

De geschiedenis van de scheikunde in Nederland 3

De ontwikkeling van de chemie
van 1945 tot het begin van de jaren tachtig

Redactie:
Ernst Homburg en Lodewijk Palm

Uitgegeven door Delft University Press in 2004
(Copyright 2004 by Delft University Press)

Met toestemming van IOS Press, Amsterdam
op de KNCV/CHG website geplaatst

Onderzoek, onderwijs en industrie: enkele hoofdlijnen

Hoofdstuk 4

Jan M.H. Fortuin
Procestechnologie en chemische industrie

(Oorspronkelijke pagina's: 61-83. Noten: 345-347)

4. Procestechnologie en chemische industrie

*Jan M.H. Fortuin**

EEN NIEUW BEGIN

De ontwikkeling en bloei van de procestechnologie in Nederland in de jaren 1945-1980 houdt nauw verband met de ingrijpende gebeurtenissen, die nationaal en internationaal in de daaraan voorafgaande periode plaats vonden. In de Tweede Wereldoorlog werden universiteiten gesloten en waren studenten, docenten en hoogleraren voor een deel uitgeweken, ondergedoken, elders tewerk gesteld of gedeporteerd naar het buitenland. Wetenschappelijke contacten met onderzoekers buiten Nederland waren nagenoeg onmogelijk.

Toen Nederland in 1945 werd bevrijd en universitair personeel terugkeerde naar woonplaats en werkkring, moest een grote achterstand in kennis en kunde op het gebied van de toegepaste natuurwetenschappen worden ingehaald. Bovendien vormden een ongewoon groot aantal goed gemotiveerde studenten en verschillende jaargangen abituriënten van middelbare scholen een 'stuwmeer' voor de hogere onderwijsinstellingen. Na heropening van de instituten voor hoger onderwijs bleken de financiële middelen schaars, de onderzoeksfaciliteiten primitief en de collegezalen en practica overbezet. Door het grote aantal studenten kon de selectie streng zijn, wat zowel de kwaliteit als de motivatie van de gemiddelde afgestudeerde gunstig beïnvloedde.

Na het beschikbaar komen van de Marshall-hulp was enige communicatie met het wetenschappelijk potentieel in de Angelsaksische landen weer mogelijk. Bovendien verschenen aanzienlijke aantallen voor de procestechnologie waardevolle CIOS- en BIOS-rapporten, die betrekking hadden op wetenschappelijke oorlogsbuit, verkregen door het afnemen van interviews met wetenschappers werkzaam in de Duitse chemische industrie. De thuiskomst van honderdduizenden in het buitenland tewerkgestelden en de daarop volgende geboortegolf, waren er de oorzaak van dat industrialisatie van Nederland algemeen als een noodzaak werd gezien. Na de politionele acties in Indonesië en de daarop volgende soevereiniteitsoverdracht werd dit gevoel nog versterkt door de afname van de handel met het voormalig overzees gebiedsdeel, en door de repatriëring van circa driehonderdduizend personen met de Nederlandse nationaliteit.

* Voor verschillende passages in dit hoofdstuk is dankbaar gebruik gemaakt van enkele voorstudies die zijn verricht door E.J. de Jong, D. Thoenes, S.T. Sie en D. Medema en P.A. Gautier. Verder dankt de auteur de heren L.J. Revallier en L.M. Kretzers voor hun opmerkingen bij de afronding van het manuscript en mevrouw R. Hippert voor de voltooiing van het typescript.

Het snelle herstel van de economie, na de verliezen tijdens de Tweede Wereldoorlog en de afscheiding van Indonesië, werd ook mogelijk gemaakt door de gunstige geografische ligging van Nederland, de arbeidsdiscipline, de geldsanering, het economisch herstel van het Duitse achterland en het vergroten van de afzetmogelijkheden op de Europese markt door de Europese integratie. Verder waren het massavervoer via waterwegen, de open zeehaven van Rotterdam, het relatief grote aantal belangrijke ondernemingen zoals Shell, Unilever, Philips, AKU (later Akzo) en Staatsmijnen (nu DSM) en de goed functionerende onderwijsinstellingen als erfenis van de negentiende-eeuwse activiteiten, de katalysatoren voor de ontwikkeling van de procesindustrie in Nederland.¹

GROEI VAN ONDERWIJS EN ONDERZOEK

In de eerste naoorlogse jaren werd vooral aandacht besteed aan het opleiden van een nieuw kader voor de onderwijsinstellingen, het overheidsapparaat en de nijverheidssectoren en voor het op peil brengen van de energievoorziening en het transportwezen. Deze factoren vormden de basis voor een industriële ontwikkeling in Nederland. Veiligheid en leefmilieu werden toen van ondergeschikt belang geacht. De werkgelegenheid van de snelgroeiende bevolking had wél hoge prioriteit. Vele beroepskeuzeadviseurs wezen op het belang van technische opleidingen, omdat in de procesindustrie een groeiende werkgelegenheid kon worden verwacht.

Zo is in deze periode de raffinagecapaciteit door binnen- en buitenlandse olieconcerns in het Rotterdamse havengebied en de kolenproductie door particuliere en staatsmijnen in Zuid-Limburg opgevoerd om de grondstof- en energievoorziening veilig te stellen voor de industriële ontwikkeling en de Nederlandse economie. Bedrijven die hierbij betrokken waren trokken hooggeschoold personeel aan dat chemische processen kon ontwikkelen.

De relatief omvangrijke investeringen in procestechnologisch onderzoek tijdens de periode 1950-1960 bij de Koninklijke/Shell en Staatsmijnen, die beiden zelfs tijdens de bezetting hun basisonderzoek redelijk hadden kunnen voortzetten, resulteerden in ontwerpen voor een groot aantal nieuwe of verbeterde processen, die tussen 1960 en 1970 konden worden gerealiseerd. Hierbij ging het bijvoorbeeld om verschillende kraakprocessen, processen voor de ontzwaveling van oliefracties en processen voor de bereiding van bulkproducten zoals ureum, melamine, rubber, hogedichtheidspolyetheen, caprolactam, benzoëzuur, fenol en oplosmiddelen. Andere processen werden gekocht zoals fabrieken voor de productie van etheen, ammoniak, lagedichtheidspolyetheen, polypropeen en acrylonitril.

Uit het toepassingsgerichte onderzoeksmilieu van Shell en Staatsmijnen, maar ook van AKU, Philips en Unilever, zijn talrijke hoogleraren in de procestechnologie voortgekomen, waardoor onderwijs en onderzoek werden gestimuleerd en de opleiding van een nieuw kader van internationaal niveau mogelijk was.

EXTERNE INVLOEDEN

Vooraf na de exploitatie van het in 1959 ontdekte aardgas in Groningen en de daaropvolgende overschakeling van steenkool als grondstof en energiedrager op aardolie en aardgas in het begin van de jaren zestig en de door marktwerking gestimuleerde schaalvergroting van productie-eenheden in de chemische industrie tussen 1960 en 1970 werd de productiecapaciteit per werknemer in deze sector op een ongekend hoog niveau gebracht.²

Omdat schaalvergroting van productie-eenheden tot gevolg had, dat niet alleen de arbeidsproductiviteit en de welvaart vermeerderden, maar ook de potentiële gevaren en de

milieubelasting aanzienlijk toenamen, hebben in de periode van consolidatie, tussen 1970 en 1980, veiligheid en milieubescherming meer aandacht gekregen. Mede door de energiecrisis in diezelfde periode, trad een zekere stabilisatie op in de chemische procesindustrie, werden nieuwe investeringen uitgesteld en werd ook door de activiteiten van de Club van Rome, die op de grenzen van de groei wezen, de aandacht meer gericht op grondstof- en energiebesparing en op verhoging van de efficiëntie van onderzoek en productie.

Om deze doeleinden te kunnen bereiken, is door procestechnologen een nuttig gebruik gemaakt van een combinatie van informatietechnologie, modelvorming van processtappen en procesintegratie. Bovendien werden in omvangrijke productie-eenheden van de chemische industrie de procesregeling en automatisering zodanig uitgebreid, dat met een voorheen ongekend lage personeelsbezetting kon worden volstaan.

Toepassing van deze combinatie van disciplines heeft bij veel chemische industrieën geleid tot aanzienlijke besparingen op personeel, energie en grondstoffen en een aanmerkelijke relatieve vermindering van de milieubelasting, meer in het bijzonder bij de bereiding van bulkproducten. Verder konden later door gebruikmaking van deze verworven faciliteiten en de opgedane ervaring, nieuwe bulkprocessen sneller, goedkoper en meer bedrijfzeker worden ontworpen en bestaande processen worden verbeterd. Bovendien is de efficiëntie van de ontwikkeling van nieuwe processen in de chemische industrie in de periode 1970-1980 verhoogd door niet-processpecifieke technologische kennis gezamenlijk met andere geïnteresseerde industrieën te laten genereren door internationale instituten voor coöperatieve research. De daardoor voor relatief lage kosten per onderneming verkregen kennis kon vervolgens worden geïmplementeerd in het procesontwerp dat in eigen bedrijf was ontwikkeld.

De kennis omtrent processen die in grote laboratoria van de chemische industrie waren ontwikkeld, vond spoedig een weg naar de Nederlandse universiteiten, mede dankzij de bereidheid van het management van enkele grote chemische concerns een aantal bij de ontwikkeling betrokken medewerkers als deeltijdhoogleraar in de gelegenheid te stellen wetenschappelijke kennis over te dragen aan een nieuwe generatie.

De Stichting Scheikundig Onderzoek in Nederland (SON) heeft veel researchprojecten van universitaire onderzoekers met geld van ZWO (later NWO) ondersteund. De procestechnologie heeft echter tot 1980 geen subsidie via SON ontvangen, omdat de werkgemeenschap op dit gebied pas daarna in SON kon participeren.³ De Vereniging van de Nederlandse Chemische Industrie (VNCI) verzorgde de gemeenschappelijke belangen van de chemische industrie en de contacten met de overheid op het gebied van grondstoffenvoorziening, het chemisch onderwijs, de veiligheid en het milieu.

AARD EN OMVANG VAN HET VAKGEBIED

Procestechnologie is een verzameling van disciplines die hechte wortels hebben in de scheikunde en de natuurkunde.⁴ De inspiratiebronnen voor innovaties in de procestechnologie zijn wetenschappelijke vorderingen en maatschappelijke behoeften. Zij vormen respectievelijk de inwendige stuwkracht en de uitwendige zuigkracht voor vernieuwingen in het vakgebied. Procestechnologie speelt een sleutelrol in industrieën waarin zeer verschillende stoffen worden vervaardigd, zoals petrochemische producten, kunststoffen, papier, glas, verfstoffen, lakken, metalen, keramische materialen, kunstmest en farmaceutische producten. De in de procestechnologie toegepaste werkwijzen kunnen ook worden gebruikt bij energiebesparing, verhoging van de veiligheid van de procesvoering, in de biotechnologie en ten behoeve van de milieubescherming, zoals bij afgasreiniging, afvalwaterzuivering en bodemsanering. Procestechnologie is het vakgebied waarin de samenhang tussen ontwerpen en produceren werd

erkend en deze erkenning is een van de belangrijkste redenen geweest van de succesvolle toepassing.⁵

Wetenschappelijk onderzoek en technologische ontwikkeling hebben lange tijd een gescheiden ontwikkeling doorgemaakt. Chemische omzettingen en fysische bewerkingen kunnen worden uitgevoerd zonder enige theoretische kennis. Zo hebben de Romeinen bij het begin van onze jaartelling reeds vloeistofextractie toegepast om goud en zilver te scheiden van vloeibaar koper door gebruik te maken van vloeibaar lood als oplosmiddel, zonder enige kennis van activiteitscoëfficiënten, de faseregels en stofoverdrachtcoëfficiënten.⁶

Ladingsgewijze destillaties waren reeds bekend in de tijd van Cleopatra (circa 50 jaar voor Christus). Destillatiekolommen voorzien van schotels met borrelkapjes, van geperforeerde platen, van watergekoelde condensoren, van reflux, van voorverhitte voeding en van de ontwikkeling van de continue fractionering werden de afgelopen 400 jaar uitgevonden. Gedurende driekwart van deze periode werd nauwelijks een poging ondernomen destillatieprocessen kwantitatief te beschrijven. Niet eerder dan aan het einde van de negentiende eeuw hebben E. Hausbrand in Berlijn (1893) en E. Sorel in Parijs (1894) de eerste kwantitatieve mathematische beschouwingen over destillatie gepubliceerd. In het begin van de twintigste eeuw hebben zij betrekkingen opgesteld die nog steeds de basis vormen van ontwerpberoeeningen, zoals de massabalans, de energiebalans en evenwichtsbetrekkingen.⁷

Een soortgelijke ontwikkeling is ook opgetreden bij het ontwerpen van apparatuur voor warmtetransport. In de periode 1700 tot 1900 werd de basiskennis gegenereerd door natuurkundigen als J.B.J. Fourier, A.L. Lavoisier, N.L.S. Carnot, Lord Kelvin, G.R. Kirchhoff, W. Wien, O. Reynolds en L. Graetz. Tussen 1900 en 1940 werden warmteoverdrachtsproblemen meer pragmatisch aangepakt door onderzoekers als W. Nusselt, L. Prandtl, M. Jakob, W.H. McAdams, A.P. Colburn, E. Schmidt, E.R.G. Eckert en R.C. Martinelli. De procesindustrie profiteerde hiervan.⁸

Na de Tweede Wereldoorlog werden ontwerpers geconfronteerd met nieuwe gebieden waar warmteoverdracht een rol speelde, zoals kernenergie, raketlanceringen, ruimtevaart en nieuwe, complexe en grootschalige chemische processen, die in grote mate afhankelijk waren van het oplossen van warmteoverdrachtsproblemen die zich voorheen niet hadden gemanifesteerd. Zo had een vooraanstaand chemisch bedrijf in de Verenigde Staten zelf een grootschalige, zeer efficiënt geachte, warmtewisselaar ontwikkeld, die echter na ingebruikname binnen 24 uur door onverwacht optredende vibraties onklaar raakte. In een Nederlands chemisch bedrijf dacht men een meer efficiënte grootschalige warmtewisselaar te kunnen realiseren door het ontwerp te baseren op betrekkingen die waren verkregen door extrapolatie van bestaande correlaties. Na ingebruikname bleek echter dat de capaciteit van de warmtewisselaar ten gevolge van een slechte verdeling van het te koelen gas aanzienlijk tekortschoot, waardoor in de betreffende fabriek slechts een deel van de geplande productiecapaciteit kon worden gerealiseerd.

Soortgelijke gevallen deden zich ook voor bij talrijke andere bedrijven. Deze buitengewoon kostbare ervaringen hadden tot gevolg dat vele industrieën, *contractors* en fabrikanten de noodzaak inzagen van aanvullend onderzoek onder gebruikmaking van grootschalige warmtewisselende apparatuur.

In de chemische procesindustrie worden op technische schaal grondstoffen of halffabrikaten in besloten ruimten omgezet in producten met een vereiste specificatie. De bewerkingen die een systeem tijdens de procesvoering achtereenvolgens ondergaat, kunnen van fysische of chemische aard zijn. De fysische bewerkingen hebben meestal tot doel componenten te verwarmen, te koelen, te mengen, te scheiden en te zuiveren, of reactanten en producten in de gewenste vorm en op de vereiste specificatie te brengen. De chemische omzettingen hebben meestal plaats in al of niet continu doorstroomde reactoren, waarin zich een- of meerfasige systemen bevinden, welke diverse componenten bevatten. In een chemische reactor kan een gewenste omzetting worden verwezenlijkt als de juiste reactiecondities voor de betreffende omzetting worden gekozen.

Reactanten die aan de vereiste specificatie voldoen, kunnen in een vaste verhouding continu aan een bepaald type reactor worden toegevoerd en daarin tezamen met hulpstoffen en/of katalysatoren gedurende een zekere verblijftijd op een voorgeschreven temperatuur en druk worden gehouden. Hierbij is van belang dat voldoende warmte wordt toe- of afgevoerd, het systeem voldoende wordt gemengd en in meerfasige systemen de vereiste stofoverdracht plaats vindt. Hiertoe dienen ook de afmetingen en de geometrie van het reactorinterieur aan de nodige eisen te voldoen.

Een fysische standaardbewerking, die een systeem in een apparaat ondergaat wordt in het Engels aangeduid als *unit operation*. In het Nederlandse taalgebied spreekt men van eenheidsbewerking, unitaire operatie of standaard-processtap. Enkele bekende *unit operations* zijn destillatie, extractie, kristallisatie, filtratie, absorptie, adsorptie, verdamping, condensatie en droging. In verband met het voorafgaande is het duidelijk dat het onderzoek in de procestechnologie is gericht op drie onderdelen van elke processtap: de aard van de bewerking, de fysische eigenschappen van het een- of meerfasige systeem en de geometrie van het interieur van het procesapparaat. Daarnaast behoren ook kennis van procesintegratie, procesregeling, schaalvergroting, beheersing van het energiegebruik en zorg voor veiligheid en milieu tot het vakgebied.

In de periode 1950-1980 is de procestechnologie tot volle wasdom gekomen. Dit blijkt onder meer uit de schaalvergroting bij de productie van veel bulkchemicaliën, waardoor tussen 1960 en 1970 de productiecapaciteit per productie-eenheid met een factor tien tot twintig kon worden vergroot. Deze schaalvergroting werd mede mogelijk gemaakt door het gebruik van rekenmodellen waarmee het gedrag van systemen in kleinschalige en grootschalige apparatuur met een redelijke nauwkeurigheid kon worden voorspeld. Deze rekenmodellen worden toegepast voor evaluatie, ontwerp, schaalvergroting en sturing van chemische processen op technische schaal, waarbij producten van vereiste specificatie veilig kunnen worden bereid met een minimum aan kosten, energie, afval, milieubelasting en potentiële gevaren. De veranderingen die plaats vinden in materiële stromen die aan bewerkingen worden onderworpen, kunnen in veel gevallen worden beschreven met behulp van een technologisch model. Dit is een stelsel vergelijkingen dat het verband aangeeft tussen relevante fysische grootheden welke de situatie van de systemen in de chemische procesapparaten kwantitatief karakteriseren: kortweg een processtap in formules. Technologische modellen kunnen worden samengesteld door toepassing van dimensieanalyse, stromingsleer, behoudswetten, toestandsvergelijkingen, evenwichtsbetrekkingen, transportvergelijkingen, chemische kinetiek, thermodynamica en stabiliteitsanalyse van chemische systemen. Het belang van het laatste onderwerp moge blijken uit het feit dat, als tijdens een continue procesvoering de temperatuur van het reagerend systeem enigszins oploopt, de reactor soms niet méér, maar minder gekoeld moet worden om een explosie te voorkomen.

VORMING VAN PROCESMODELLEN

Afhankelijk van het doel waarvoor een stelsel vergelijkingen wordt opgesteld, kan men onderscheid maken tussen een evaluatiemodel, een ontwerpmodel en een stuurmodel van een proces. Om de vergelijkingen voor dergelijke modellen en in het bijzonder ontwerpmodellen op te stellen, maakt de procestechnoloog gebruik van de hierboven genoemde wetten en theorieën en van additionele informatie omtrent fysische grootheden en veronderstelde stromingsregimes. Elke parameter in de vergelijkingen dient een fysische betekenis te hebben en een fysisch verdedigbare waarde met een aanvaardbare nauwkeurigheid te bezitten, die door een afzonderlijk experiment kan worden bepaald. Een dergelijk model is geschikt om het gedrag te voorspellen van een systeem in een apparaat tijdens een stationaire of tijdens een overgangstoestand.

Een procestechnoloog heeft modellen nodig in een zodanige vorm, dat hij ze kan gebruiken met inzicht en vertrouwen en onder zeer verschillende omstandigheden. Alle details van het model dienen bij te dragen tot het verbeteren van de betrouwbaarheid van de met het model voorspelde resultaten. Details die de nauwkeurigheid van de voorspelde waarden niet verbeteren zijn technologisch overbodig.

Modelvorming en processimulatie werden mogelijk door vergroting van de vakkennis, en de snel verbeterende rekenfaciliteiten. De waarde van elke fysische grootte wordt thans aangegeven door een product van een getal en een fysische eenheid uit het zogeheten Internationale Eenhedenselsel (SI) dat sinds 1969 in Nederland formeel van kracht is en zeven grondeenheden omvat.⁹

Verder wordt in de Procestechnologie ook veel gebruik gemaakt van dimensieloze kengrootheden die met de eerste twee letters van de naam van een in het vakgebied verdienstelijke wetenschapper worden aangeduid (bijv. *Re, Nu, Sh, Pr, Sc, Le*). Het voordeel hiervan is dat deze kengrootheden vaak in schaalonafhankelijke betrekkingen kunnen worden gebruikt voor het ontwerpen van procesapparaten of voor het berekenen van fysische grootheden zoals het drukverval en de warmteoverdrachtscoëfficiënt in turbulent doorstroomde buizen.

Omstreeks 1960 werden technologische modellen gemaakt van enkelvoudige processtappen, bijvoorbeeld van continue destillaties van (pseudo)-binaire systemen of continue vloeistof-vloeistofextracties van multicomponentsystemen. Tussen 1960 en 1970 werden de eerste processpecifieke modellen gemaakt, bijvoorbeeld voor de bereiding van salpeterzuur bij DSM (F.J.G. Kwanten). Hierdoor was het mogelijk de productie van salpeterzuur te simuleren en de condities te vinden voor optimaal ontwerp en optimale bedrijfsvoering.

In 1970 startte bij DSM een werkgroep onder leiding van J.A. de Leeuw den Bouter met het opzetten van het Technologisch Informatie Systeem (TIS), bestaande uit niet-processpecifieke programmatuur. Dit pakket was modulair opgebouwd en geschikt voor het ontwerp van elk continu chemisch proces. Een belangrijk onderdeel werd gevormd door de programmatuur voor procesintegratie, waarmee voor elk beschouwd proces een stromenmatrix kon worden samengesteld, die de debieten bevat van alle componenten in de stromen tussen de processtappen. Verder bevatte het pakket programmatuur voor het afzonderlijk doorrekenen van elk van de *unit operations*, voor de dimensionering van de apparatuur en voor het gegevensbestand van alle componenten. Er waren bovendien subroutines voor procesberekeningen en voor economische optimalisatie van het ontwerp en de bedrijfsvoering van het proces. Dergelijke programmatuurpakketten worden thans gebruikt in alle stadia van het ontwerp, de bedrijfsvoering en de optimalisatie van processen. Het gebruik van door procestechnologen van DSM ontwikkelde programmatuur heeft in de jaren zeventig aanzienlijk bijgedragen tot cumulatieve besparingen van energiekosten in fabrieken van deze onderneming.

Voor een snelle ontwikkeling van een nieuw proces zijn experimenteel onderzoek en modelvorming complementair. Na 1960 werden deze beide hulpmiddelen ondersteund door de vorderingen van de metathermodynamica (J.M. Prausnitz) en na 1970 door toepassing van de pinchtechnologie (B. Linnhoff). De metathermodynamica, is de thermodynamica van de fysische evenwichten waarbij van een empirisch verband tussen de extra vrije Gibbs-energie en de samenstelling van een multicomponentsysteem wordt uitgegaan. Prausnitz (University of California te Berkeley) die vertrouwd was met de Europese (J.D. van der Waals, J.J. van Laar) en Amerikaanse (J.W. Gibbs) traditie van thermodynamica en fasenleer, wist dankzij de ontwikkeling van rekenautomaten de meta-thermodynamica voor toepassing in de chemische industrie geschikt te maken. Hierdoor kunnen tijdrovende en kostbare experimentele evenwichtsbepalingen worden beperkt tot het meten van slechts enkele empirische parameters die het eigen volume van en de wisselwerking tussen moleculen van verschillende soort representeren. Ook de ontmenging van vloeistofmengsels kan op deze wijze worden beschreven.¹⁰

Linnhoff heeft als professor aan UMIST te Manchester met een team van medewerkers de Linnhoff March Company opgericht, om adviezen te geven met betrekking tot het minimaliseren van het energieverlies van een proces. Vooral na de energiecrises in de jaren zeventig hebben diverse chemische industrieën in Nederland van de adviezen van deze organisatie gebruik gemaakt om de behoefte aan energiedragers te beperken.¹¹ De grote doorbraak op het gebied van modelvorming van de chemische processen is, zoals uit het voorgaande blijkt, aanzienlijk bevorderd door de ontwikkeling van computerfaciliteiten in de periode 1960 - 1980.¹²

WISSELWERKING TUSSEN INDUSTRIE EN WETENSCHAP

De wisselwerking tussen ondernemingen en universiteiten die in het begin van de twintigste eeuw door ondernemers (G.L.F. Philips) en wetenschappers (A.M.A.A. Steger, H.R. Kruyt, en H.I. Waterman) was aanbevolen, heeft een gunstige invloed gehad op de ontwikkeling van de procestechnologie. In Nederland werden kort na de Tweede Wereldoorlog de kernvakken chemische technologie, *unit operations* en fysische technologie op academisch niveau alleen onderwezen aan de Technische Hogeschool te Delft (thans TUD). De hoogleraren die deze kernvakken doceerden waren Waterman voor chemische technologie, P.M. Heertjes voor *unit operations* en H. Kramers voor fysische technologie. De combinatie van deze kernvakken wordt in Angelsaksische landen aangeduid met *chemical engineering* en was oorspronkelijk sterk georiënteerd op de petrochemische industrie, die vooral in de Verenigde Staten een snelle ontwikkeling had doorgemaakt. Het vergelijkbare vakgebied in Duitsland is *Chemische Verfahrenstechnik*, dat echter een sterkere werktuigbouwkundige component bevat.¹³

Een belangrijke stimulans voor onderwijs en onderzoek in de procestechnologie in Nederland was de destijds enorme gift van drie miljoen gulden, die de N.V. Bataafsche Petroleum Maatschappij (BPM) op 13 februari 1946 de Nederlandse Staat aanbood om in de Technische Hogeschool te Delft twee proeffabrieken te bouwen, een voor Chemische Technologie en een voor Fysische Technologie. Deze laboratoria werden in 1951 officieel in gebruik genomen. Een soortgelijke gift werd door Shell geschonken aan de Rijksuniversiteit te Leiden en aan de University of Cambridge (UK), waar T.C.R. Fox tot 'Shell professor' werd benoemd. Hij werd later opgevolgd door P.V. Danckwerts, internationaal een van de meest vooraanstaande *chemical engineers*.¹⁴

Om de voortgang van de ontwikkeling van de chemische en petrochemische industrie in Nederland te bevorderen, werden tussen 1955 en 1965 de onderwijsfaciliteiten in de procestechnologie aanzienlijk uitgebreid, zodat dit vak na 1965 ook werd onderwezen aan de Technische Hogeschool Eindhoven (THE), de Technische Hogeschool Twente (THT), de Rijksuniversiteit Groningen (RUG), de Universiteit van Amsterdam (UvA) en de Landbouwhogeschool Wageningen (LH).

Toen Waterman in 1919 werd benoemd tot hoogleraar in de scheikundige technologie aan de Technische Hogeschool te Delft, verdedigde hij in zijn oratie de opvatting dat de industrie in hoge mate gebaat is met wetenschappelijk onderzoek en sprak hij de hoop uit mee te kunnen werken aan de wisselwerking tussen chemische industrie en wetenschap. In de veertig jaren van zijn hoogleraarschap (1919-1959) heeft hij daaraan een wezenlijke bijdrage geleverd, meer in het bijzonder door het grote aantal personen dat, opgeleid in zijn laboratorium, later invloedrijke posten in de chemische industrie en het hoger onderwijs bezette.¹⁵

Heertjes, een van de assistenten van Waterman, werd in 1939 benoemd tot lector in de chemische technologie met als leeropdracht de *unit operations*. Hij heeft zijn loopbaan, na zijn verzetswerk tijdens de bezetting, voortgezet als ordinarius in de periode 1946-1978.¹⁶

Kramers werd in 1947 op dertigjarige leeftijd benoemd tot hoogleraar in de fysische

technologie. Hij had als natuurkundig ingenieur enige jaren bij Shell gewerkt en zich onder meer bekwaamd in de fysische transportverschijnselen. Hij was de opvolger van de eveneens van Shell afkomstige fysicus W.J.D. van Dijck, die sinds 1936 deeltijdhoogleraar was in Delft. Kramers was de eerste hoogleraar, die na de Tweede Wereldoorlog voor studenten een door hemzelf geautoriseerd collegedictaat uitgaf, dat later een inspiratiebron zou worden voor het internationaal gebruikte standaardwerk *Transport Phenomena* van R.B. Bird, W.E. Stewart and E.N. Lightfoot, waarvan de eerste druk in 1960 verscheen. In het voorwoord van hun boek memoreren deze auteurs dat het collegedictaat van Kramers de eerste poging was om ‘Fysische Transportverschijnselen’ te onderwijzen. Tevens vermelden zij dat Bird veel geprofiteerd had van de discussies betreffende onderwijs van transportverschijnselen tijdens zijn verblijf aan de T.H. te Delft gedurende een semester in 1956.¹⁷

Samen met zijn medewerker K.R. Westerterp publiceerde Kramers in 1963 ook een internationaal vermaard leerboek op het gebied van de reactorkunde. Twintig jaar later bracht Westerterp samen met W.P.M. van Swaaij en A.A.C.M. Beenackers een sterk uitgebreide, herziene versie op de markt.¹⁸

De wisselwerking tussen de chemische industrie en de procestechnologie aan de universiteiten blijkt ook uit de bezetting van leerstoelen in de procestechnologie in die tijd. Veel hoogleraren hadden ruime ervaring opgedaan in de procesindustrie bij Shell, Staatsmijnen, AKU, bij andere bedrijven of bij TNO. Zij konden hun daar opgedane kennis en ervaring overdragen aan nieuwe generaties. Hierbij kunnen worden genoemd P.J. van de Berg, Kramers, J.C. Vlugter, N.W.F. Kossen, J.A. Wesselingh en F.J. Zuiderweg van de THD, W. van Loon, K. Rietema, H.A.C. Thijssen, H.S. van der Baan van de THE, J. Groot Wassink, D. Thoenes, Van Swaaij, Westerterp van de THT, D.J. Gerritsen, S. Stemerding en G.E.H. Joosten van de RUG, C. Boelhouwer van de UvA en S. Bruin van de LH.¹⁹

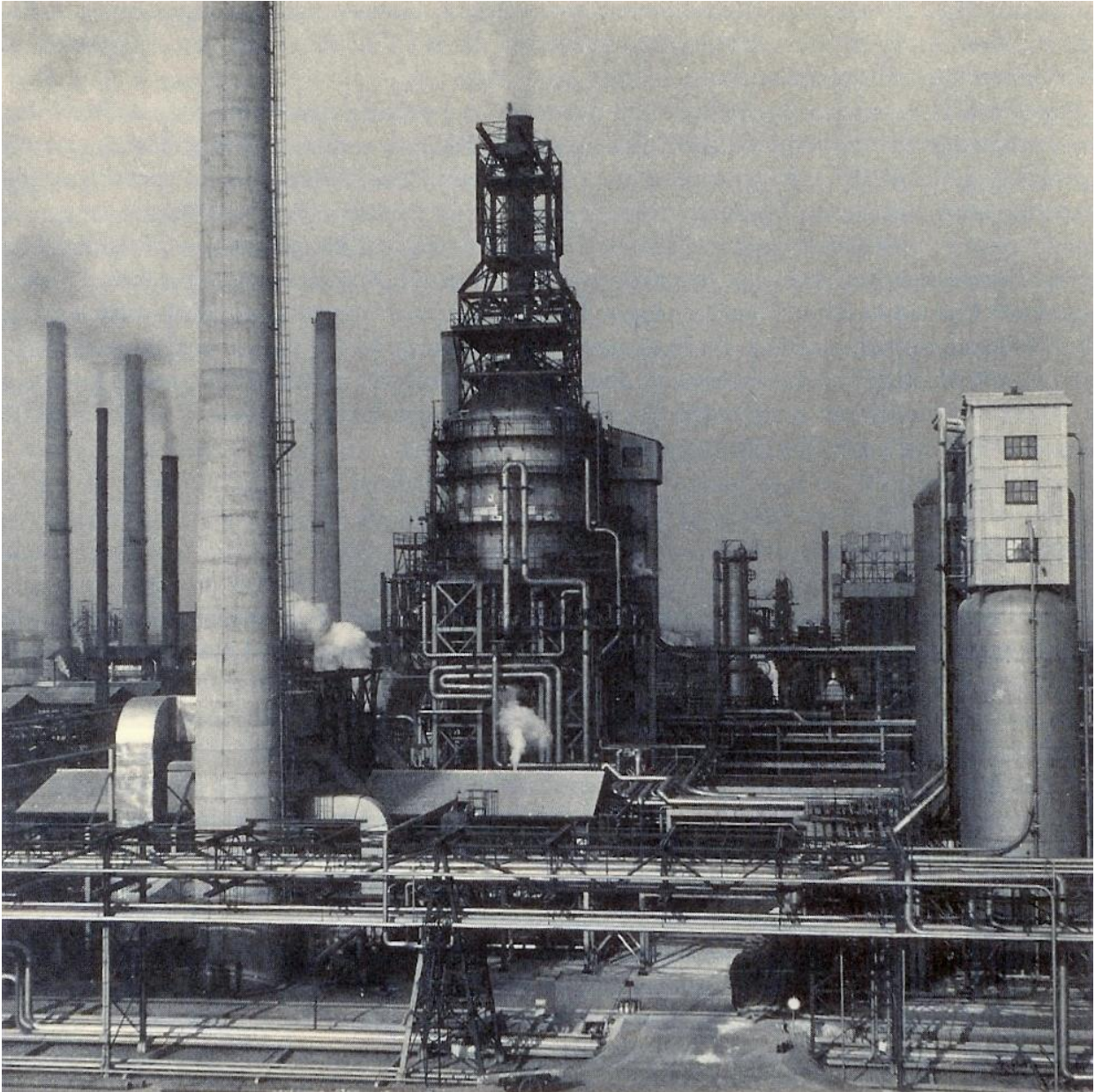
Andere in de procestechnologie werkzame academici uit de industrie waren in die tijd tevens actief als deeltijd hoogleraar, zoals D.W. van Krevelen, J.H. de Boer, J.G. Hoogland, J.J.F. Scholten van de THD, P.M.E.M. van der Grinten (THE), C. van Heerden (KUN) en M. Tels en J.M.H. Fortuin van de UvA.²⁰

RESEARCH BIJ SHELL

Op het gebied van de procestechnologie is het Koninklijke/Shell Laboratorium te Amsterdam (KSLA) in Nederland geruime tijd toonaangevend geweest. Deze researchinstelling ondersteunde de expansie en schaalvergroting van de petrochemische industrie, die vooral na de Tweede Wereldoorlog mondiaal een ongekende groei vertoonde. Olieraffinage, die aanvankelijk hoofdzakelijk een destillatieve scheiding betrof, evolueerde daarbij naar koolwaterstofchemie. In het KSLA werden processen ontwikkeld of verbeterd voor katalytisch kraken, katalytisch reformen, hydrogenerend kraken en ontzwavelen, paraffine-isomerisatie, hydrodemetallisering en rookgasontzwaveling (S.T. Sie). *Unit operations* werden theoretisch ontwikkeld en experimenteel beproefd in de afdelingen Equipment Engineering (Zuiderweg) en Fysische Scheidingen (J.G. van der Vusse).²¹

De afdeling van Zuiderweg, die met een omvang van circa 90 medewerkers destijds de grootste researchgroep procestechnologie in Nederland was, heeft resultaten van blijvende waarde voortgebracht voor het vakgebied. Ongeveer 10 hoogleraren kwamen uit deze afdeling voort, waaronder Stemerding en Joosten (RUG), Wesselingh en C.J. Hoogendoorn (THD), Rietema (THE), Van Swaaij (THT), R.C. Darton (Oxford, UK) en Zuiderweg zelf, die na zijn pensionering bij Shell in 1973 hoogleraar in Delft werd.

Zuiderwegs eigen werk was veelzijdig. In een beroemd artikel heeft hij met J.J. van Deemter



Figuur 4.1: Deel van de Shell-raffinaderij in Pernis, begin jaren vijftig. Gedurende de gehele periode 1945-1980 was het complex van raffinaderijen en chemische fabrieken van Shell-Pernis een van de grootste, zo niet dé grootste, procestechnologische 'sites' van ons land.

en A. Klinkenberg een klassiek geworden mathematische beschrijving gegeven van een gaschromatografische kolom.²² Met Stermerding werd de bij Shell ontwikkelde Rotating Disc Contactor (RDC) voor vloeistof-vloeistofextractie bestudeerd en met J.H. de Groot en Van Deemter ontwikkelde hij modellen voor stofoverdracht en chemische reacties in *fluid beds* (*two-phase model*). Op het gebied van destillatie was Zuiderweg's onderzoek van het Marangoni-effect en de gevolgen voor de efficiëntie van gepakte destillatiekolommen van groot belang. Dit onderzoek is later voortgezet door Stermerding en F.P. Moens in Groningen.

Nieuwe ontwikkelingen van elders, werden door Zuiderweg in een vroegtijdig stadium opgenomen in eigen bedrijfsonderzoek, zoals het gebruik van geordende pakking in destillatiekolommen (Sulzerpakking) en de toepassing van de metathermodynamica voor mathematische modellen voor fysische evenwichten van meerfasige systemen. Zuiderweg streefde

naar een zo open mogelijke wetenschappelijke discussie met collega's van universiteiten en bedrijven op het gebied van de procestechnologie, wat sterk tot de ontwikkeling van het vakgebied in Nederland heeft bijgedragen.

Op het KSLA werden, in andere afdelingen, ook processen ontwikkeld voor de bereiding van polymeren, synthetische wasmiddelen, oplosmiddelen, insecticiden, herbiciden en octaangetalverhogers (MTBE). Kenmerkend voor de periode 1950-1980 is ook de vooruitgang in experimentele technieken bij de procesontwikkeling. De continue *bench-scale unit* kreeg een plaats tussen 'reageerbuis' en proeffabriek. Ontwikkelingen op het gebied van procesregeling en *on-line*-analyse maakten het mogelijk veel van deze *bench-scale units* onbemand te laten opereren. Processimulatie en verbetering van het inzicht in de vergrotingsregels leidden ook tot steeds kleinere proeffabrieken. Zo bleek de schaalvergrotingsfactor, dat wil zeggen de verhouding tussen de productiecapaciteit van de commerciële fabriek en die van de *pilot plant*, van 1200 voor polypropreen (circa 1965), via 25.000 voor hogere olefinen (circa 1970) tot 100.000 voor MTBE (circa 1980) te zijn toegenomen.²³

RESEARCH BIJ DSM

Bij de Staatsmijnen, het latere DSM, is het opvallend dat dankzij de vooruitziende blik van enkele leden van de directie, zoals F.K.Th. van Iterson, D.P. Ross van Lennep en J.S.A.J.M. van Aken, geruime tijd een relatief hoog percentage van de omzet aan chemisch onderzoek kon worden besteed. In 1940 werd het Centraal Laboratorium opgericht. Na de Tweede Wereldoorlog groeide dit laboratorium uit tot een van de grootste in zijn soort in Nederland. Op het gebied van de procestechnologie werden door onderzoekers als Van Krevelen, die van 1948 tot 1959 (research)chef van het Centraal Laboratorium was, en Van Heerden belangrijke bijdragen geleverd die wereldwijde erkenning kregen.

Van Krevelen, die eind 1939 in Delft promoveerde bij Waterman en in 1940 bij de Staatsmijnen in dienst trad, heeft aanmerkelijk bijgedragen tot de verwetenschappelijking van het onderzoek van chemische processen in het algemeen en in Nederland in het bijzonder. Na zijn benoeming in 1948 tot chef van het Centraal Laboratorium van DSM in Geleen, heeft hij niet alleen medewerkers gestimuleerd tot het verrichten van grondslagenonderzoek, maar zich ook persoonlijk bezig gehouden met vele researchonderwerpen. In 1959 beëindigde hij zijn werk bij DSM en werd hij lid van de Raad van Bestuur van AKU in Arnhem.²⁴

In de periode 1937-1976 omvatte zijn wetenschappelijk werk drie gebieden: 'Chemical Engineering Science', 'Coal Science' and 'Polymer Science'. Bij de aanvang van zijn industriële loopbaan heeft hij met diverse medewerkers processen voor de bereiding van ammoniak, salpeterzuur en zwavelzuur fundamenteel onderzocht. Hierbij bleek al spoedig, dat in procesapparaten niet alleen chemische reacties en fysische scheidingen van belang waren, maar dat ook het transport van stof, warmte en impuls een belangrijke rol speelde. Een succesvolle samenwerking met naaste medewerkers waaronder P.J. Hoftyzer, H.A.G. Chermin, Van Heerden, P. Mars en F.J. Huntjens heeft een serie waardevolle publicaties opgeleverd die een stimulans waren voor de ontwikkeling van de procestechnologie.²⁵

Met Hoftyzer ontwikkelde Van Krevelen de theorie van de door chemische reactie versnelde gasabsorptie. Zij berekenden het zogenaamde 'rangeerterrein', waarmee versnellingsfactoren van deze soort gasabsorptie zijn te bepalen. Met Chermin ontwikkelde hij methoden voor de bepaling van de vrije vormingsenthalpieën van organische verbindingen. Samen met Van Heerden, tenslotte, onderzocht Van Krevelen het mechanisme van de warmteoverdracht in *fluid beds* en bepaalde hij de correlaties die nodig waren om de betreffende warmteoverdrachtscoëfficiënten te berekenen.

Het toepassingsgerichte wetenschappelijke onderzoek verricht door Van Krevelen en zijn medewerkers heeft in belangrijke mate ertoe bijgedragen, dat de procestechnologie in Nederland al vroeg in de jaren vijftig een internationaal niveau bereikte. Van Krevelen was gedurende enige jaren editor geweest van *Chemical Engineering Science* en voorzitter van de Working Party on Chemical Reaction Engineering (WPCRE). Op internationale symposia en congressen was hij een gevierd spreker, die in de slotdiscussie op een onovertroffen wijze de door andere sprekers gerapporteerde vorderingen op het vakgebied samenvatte. Van 1952 tot 1980 was hij bovendien deeltijdhoogleraar aan de Technische Hogeschool Delft.

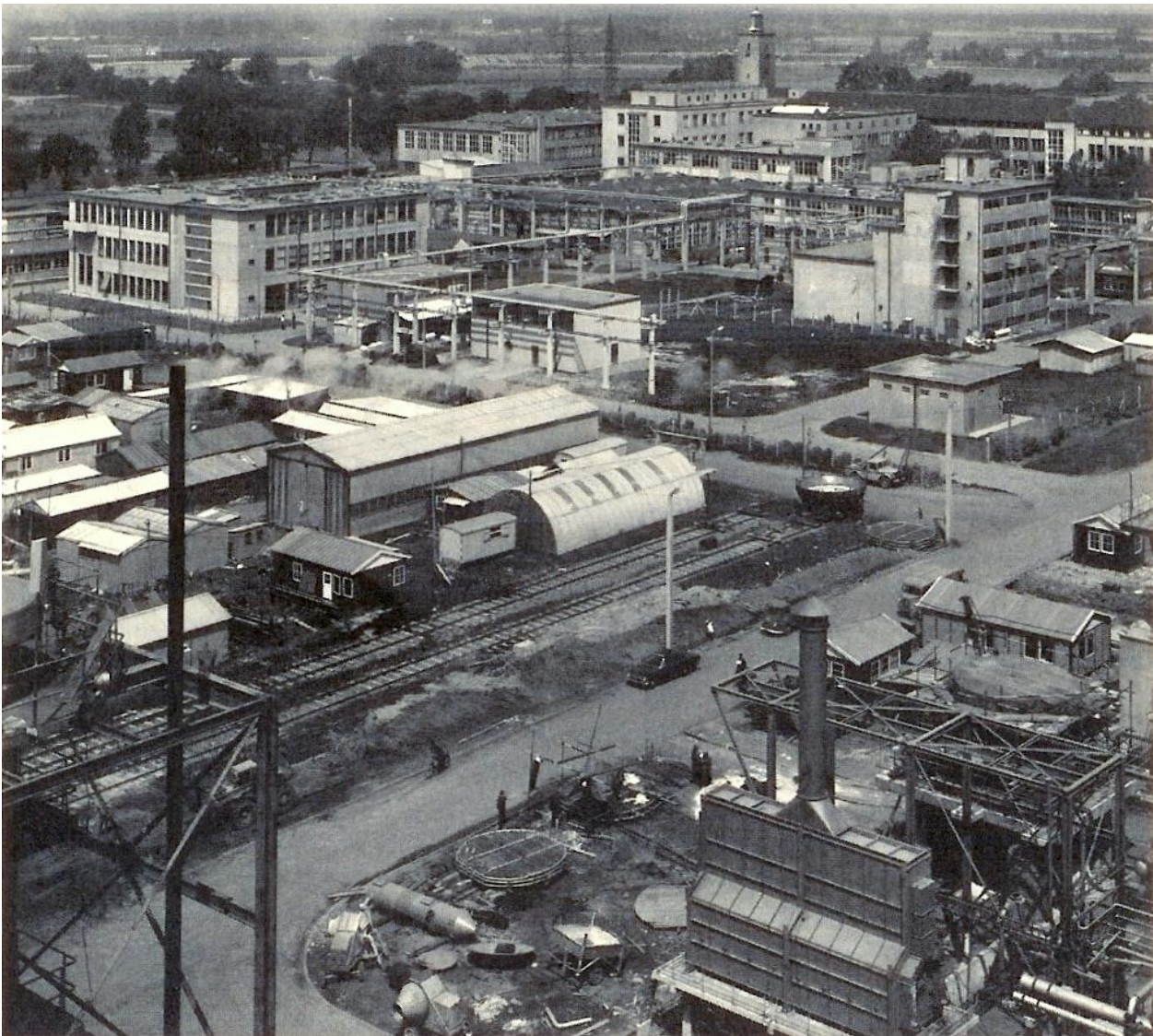
Van Krevelens medewerker Van Heerden, die in Utrecht natuurkunde had gestudeerd, werd, na zijn werk in de afdelingen voor Fysische Technologie en Katalyse van het Centraal Laboratorium chef van de sector Basis- en Ondersteuningsresearch van dat laboratorium, tot zijn pensionering in 1978. Van Heerden had een wetenschappelijke instelling en zocht naar de 'first principles' waarvan betrekkingen tussen relevante grootheden konden worden afgeleid.

Van Heerden heeft, voortbouwend op het werk aan de ammoniaksynthese bij Staatsmijnen, de theorie van de autotherme reactor ontwikkeld en het bestaan van meervoudige stationaire toestanden theoretisch vastgelegd, waardoor zijn naam op het gebied van de Chemical Reaction Engineering internationale bekendheid kreeg. Deze theorie werd twee jaar later uitgebreid door de Amerikaan N.R. Amundson, die de stabiliteit en sensitiviteit van reagerende systemen in de stationaire toestand erbij betrok. In 1975 ontving Van Heerden ter gelegenheid van het 50-jarige bestaan van Dechema de prestigieuze Dechema Preis, "für seinen Beitrag zur Entwicklung der Chemischen Reaktionstechnik in Europa". Naast zijn werk bij DSM was Van Heerden ook ruim tien jaar buitengewoon hoogleraar chemische technologie aan de KU Nijmegen.²⁶

Het basisonderzoek dat op het Centraal Laboratorium op procestechnologisch gebied door Van Krevelen en zijn medewerkers en later onder leiding van F.L.J. Sixma (1960-1963) en L.J. Revallier (1963 - 1980) kon worden verricht, heeft ertoe bijgedragen dat het vroegere mijnbedrijf kon worden getransformeerd in een levensvatbaar, geprivatiseerd chemisch concern, waarin voldoende deskundig kader aanwezig was om nieuwe processen te ontwikkelen en te implementeren. Bovendien zijn met de gegenereerde kennis door de dochteronderneming Stamicarbon talrijke fabrieken aan afnemers elders in de wereld geleverd.²⁷

Eén van de meest succesvolle DSM-processen betrof de bereiding van ureum. Deze hoogwaardige stikstofmeststof, tevens grondstof voor kunststoffen, werd vanaf 1918 door het Duitse bedrijf BASF (later opgegaan in I.G. Farben) op commerciële schaal geproduceerd uit kooldioxyde en ammoniak. In de jaren vijftig startte bij Staatsmijnen de productie op de klassieke wijze, bij 180° tot 185°C en 120 tot 150 bar. Het gevormde ureum werd vervolgens uit de ureumsyntheseoplossing (USO) gewonnen door de niet-omgezette ammoniak en kooldioxyde door expansie af te scheiden. Daarna werden de vrijgekomen gassen weer gecomprimeerd en naar de reactor gerecirculeerd. Deze veel energie kostende processtappen hadden een nadelig effect op de kostprijs.

P.J.C. Kaasenbrood, later de 'vader van de moderne ureumprocessen' genoemd, betoogde bij DSM in 1959 op grond van zijn kennis van de fasenleer, dat strippen van ammoniak en kooldioxyde uit de USO met kooldioxyde bij synthesesdruk mogelijk moest zijn, wat een aanzienlijke energiebesparing tot gevolg zou hebben. Het strippen van de USO zou echter bijzonder snel moeten geschieden om zowel de vorming van biureet als het teruglopen van de reactie tijdens het ontgassen tot een minimum te beperken. Een procestechnoloog bij DSM heeft hem na uitvoerig overleg, begin 1961, voorgesteld de ontgassing uit te voeren in een nattewandkolom, een apparaat dat op het Centraal Laboratorium vaker kleinschalig werd toegepast om stofoverdrachtscoëfficiënten bij gasabsorptie te bepalen. In de loop van 1961 gaf researchleider Sixma toestemming een *pilot plant* met een eenpijpsstripper te bouwen. Hierbij verleenden procestechnologen ondersteuning bij het onderzoek van de USO-rectificatie (J. Buiten), de



Figuur 4.2: De bouw van de melaminefabriek van DSM halverwege de jaren zestig, met op de achtergrond het Centraal Laboratorium. In dat laboratorium en de bijbehorende proeffabrieken ontwikkelde DSM een eigen proces om melamine uit ureum te bereiden, waaraan J.J. Steggerda een beslissende bijdrage leverde (copyright DSM NV).

ureumreactor (L.L. van Dierendonck), alsmede van het stromingsgedrag (J.C. Theron Mulder), de stabiliteit (C.W.J. van Koppen, P. Hendriks) en de bedrijfsvoering (J. Logemann, D.J. Venderbos) van de stripper. Uit dit semi-technisch onderzoek bleek dat de USO-stripper moest voldoen aan een groot aantal eisen, wat betreft materiaalkeuze, ontwerp, constructie, vóórbehandeling, afwerking, corrosiebeheersing en bedrijfsvoering.²⁸

In 1965 werd door DSM de eerste ureumstripfabriek gebouwd. Na de opstart bleek dat het verwachte lagere stoomverbruik per ton geproduceerde ureum en de daarmee gepaard gaande kostprijsverlaging konden worden gerealiseerd. Dit gunstige resultaat was vooral van belang na de oliecrises van de jaren zeventig en had tot gevolg dat door Stamicarbon over de hele wereld fabrieken volgens het ureumstripproces werden gebouwd. In het begin van de jaren zeventig werd maar liefst de helft van de wereldproductie van ureum volgens dit DSM-proces gefabriceerd. In die periode werden door Venderbos, de latere directeur van DSM Research, alleen al aan China twaalf ureumfabrieken verkocht, elk met een capaciteit van 1700 ton ureum per dag.

Gesmolten ureum werd geprild in een priltoren en daarna grotendeels als kunstmest gebruikt. Een deel van de ureumprils werd later omgezet in melamine volgens een bij DSM ontwikkeld proces. Hieraan heeft J.J. Steggerda een beslissende bijdrage geleverd vóór zijn benoeming tot hoogleraar aan de KUN in 1962. Dit proces wordt uitgevoerd in een *fluid bed* van silicadeeltjes bij een temperatuur van 390 °C. Als fluïdisatiegas wordt ammoniak gebruikt, terwijl in het bed warmte wordt toegevoerd via een bundel pijpen, waardoor een gesmolten zoutmengsel van circa 450 °C werd gevoerd. Melamine is een grondstof voor hoogwaardige thermoharders. Door Stamicarbon zijn ook elders in de wereld veel melaminefabrieken gebouwd.

De ontwikkeling en verbetering van nagenoeg alle chemische processen van DSM was mogelijk dankzij de inbreng van kennis en kunde van procestechnologen, werkzaam bij DSM Research op het gebied van *unit operations*, reactorkunde, fysische transportverschijnselen, procesintegratie en energiebesparing. Bij al deze activiteiten is ook gebruik gemaakt van de nog te behandelen wetenschappelijke en commerciële netwerken.

DE ONTWIKKELING VAN PROCESAPPARATEN

In de chemische industrie worden procesapparaten gebruikt van zeer verschillende aard, zoals reactoren, destillatie- en extractiekolommen, warmtewisselaars, kristallisatoren, filters, centrifuges, condensoren en reboilers, pompen en compressoren verbonden door pijpleidingen voor een- of meerfasige stroming. Een procestechnoloog is geïnteresseerd in de behandeling van een één- of meerfasig systeem in het interieur van een procesapparaat. Van een werktuigbouwer wordt verlangd een apparaat te construeren met het vereiste interieur en binnenwerk, dat corrosiebestendig is en bestand tegen de toe te passen temperatuur en druk tegen beperkte kosten.

Zowel in de industrie als op de universiteitslaboratoria werden procesapparaten ontwikkeld en beproefd. Het gedrag van meerfasige systemen in grootschalige procesapparaten werd bijvoorbeeld bestudeerd in het laboratorium Apparaten voor de Procesindustrie van de TUD, waar Zuiderweg en E.J. de Jong met hun medewerkers scheidingsprocessen zoals destillatie en kristallisatie onderzochten.

In de Nederlandse procesindustrie werden ook apparaten gebruikt die in eigen beheer waren ontwikkeld zoals de RDC bij Shell voor vloeistof-vloeistofextractie. In de periode 1960 tot 1980 zijn bij DSM ontwikkeld de Pulsed Packed Column (PPC) voor vloeistof-vloeistofextractie met chemische reactie voor het HPO-proces, de USO-stripper voor het ureumstripproces en de Speciaal Reactor voor de bereiding van EPT-rubber. Voorts is elders ontwikkelde nieuwe apparatuur in de Nederlandse procesindustrie toegepast, zoals trillingsvaste warmtewisselaars, roerwerken voor speciale doeleinden, geordende pakking voor destillatie- en extractiekolommen en doorstroommengers voor het homogeen verdelen van additieven in viskeuze vloeistoffen en polymeersmelten.²⁹

Toen de procesindustrie snel begon te groeien, hoopten de Nederlandse overheid en diverse chemische bedrijven dat de kennis van scheidingsprocessen ook wortel zou schieten in de kring van Nederlandse apparatenbouwers. In 1960 werd daartoe de stichting Nederlandse Apparaten voor de Procesindustrie (NAP) opgericht door vertegenwoordigers van de metaalnijverheid (FMI) en de chemische industrie (VNCI). Ondanks ruime overheidssteun lukte het niet in Nederland een levensvatbare bedrijfstak voor de apparatenbouw op te zetten, in tegenstelling tot de situatie in Duitsland en Zwitserland. In 1977 werd 85 procent van de apparaten voor scheidingsprocessen geïmporteerd. Van de vijftig Nederlandse leveranciers van apparaten voor scheidingsprocessen in 1950 waren er in 1980 nog maar vijf over. De door Nederlandse procestechnologen ontworpen apparatuur werd meestal door buitenlandse ondernemingen geleverd.³⁰

Een voorbeeld van een succesvol toegepast procesapparaat waarvan de ontwikkeling te danken is aan twee verschillende concerns, is de reeds genoemde gepulseerde, gepakte kolom (PPC). Dit is een met Raschig-ringen gevulde verticale buis, waardoor een continue en een disperse vloeistoffase in tegenstroom passeren, terwijl de vloeistof in de pijp met een zodanige snelheid (circa 1 cm/s) op en neer wordt bewogen, dat de gewenste druppelgrootte, volumefractie van de disperse fase, stofoverdracht en contacttijd tussen beide fasen worden bereikt, terwijl de pakking onbeweeglijk blijft.

De PPC is uitgevonden bij Shell door Van Dijk. Dit apparaat is echter bij Shell niet op grote schaal toegepast vanwege de te grote versnellingskrachten die via toe- en afvoerleidingen door de vloeistof op grote kolommen werden uitgeoefend. Bij Shell is daarom voor grootschalige extractieprocessen de voorkeur gegeven aan de eveneens in dat bedrijf ontwikkelde RDC.

Bij DSM is de PPC later doelgericht onderzocht, omdat dit apparaat eenvoudiger is te vergroten dan een RDC en daarom geschikter is voor extractie met chemische reactie zoals die voorkomt bij de bereiding van cyclohexanonoxime, waaruit caprolactam wordt verkregen. Door gebruikmaking van een zogeheten pomppulsator, uitgevonden bij DSM door F.J. Fontein, werden de versnellingskrachten op de PPC gecompenseerd. Hiertoe werd onder in de kolom de vloeistof door horizontale, kruisvormig geplaatste toe- en afvoerbuizen periodiek in tegengestelde radiale richting getransporteerd, waardoor de resulterende versnellingskrachten, zelfs bij grootschalige kolommen met een diameter van ongeveer 2,70 meter, ruim beneden de maximaal toelaatbare waarden bleven.

WETENSCHAPPELIJKE NETWERKEN

Communicatie met vakgenoten in binnen- en buitenland is ook voor de ontwikkeling van de procestechnologie van groot belang geweest. Na de periode 1945-1950, waarin contacten van zowel chemici als procestechnologen in Nederland de nationale grenzen nauwelijks overschreden en veel procestechnologen hun externe contacten beperkt zagen tot die met collega's in de sectie Chemische Technologie van de Nederlandse Chemische Vereniging (CT/NCV) en de afdeling Chemische Techniek van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs (CT/KIVI), was in de jaren vijftig weer enige communicatie mogelijk met vakgenoten elders in Europa. Zo bracht in 1953 tijdens de viering van het vijftigjarig bestaan van de Nederlandse Chemische Vereniging een groot aantal vertegenwoordigers van buitenlandse zusterverenigingen hun gelukwensen over. Bij die gelegenheid ontving de NCV het predicaat Koninklijke.

In dezelfde tijd werd niet alleen een aanzet gegeven tot de integratie van de Europese economie (EGKS, 1952; EEG, 1957) maar kwam ook een samenwerkingsverband in Europa tot stand op het gebied van de *Chemical Engineering*. De Shell-research-directeur en latere hoogleraar Vlugter was een van de oprichters van de European Federation of Chemical Engineering (EFCE), waarin chemische en ingenieursverenigingen van diverse landen participeerden. Zij benoemden hun vertegenwoordigers in het Science Advisory Committee (SAC) en het Executive Committee (EC) van de EFCE, waarin voor Nederland Westerterp vele jaren zitting had. De secretariaten van deze organisatie werden gevestigd bij de nationale verenigingen in Londen, Parijs en Frankfurt am Main. Nederlandse procestechnologen hadden vooral contacten met het secretariaat in Frankfurt.³¹

Vanaf 1955 richtte de EFCE werkgroepen op om de procestechnologie in Europa te stimuleren. De eerste werkgroep kreeg tot taak zich aan de chemische reactiekunde te wijden. Tegelijkertijd startten enkele Nederlandse procestechnologen voorbereidingen voor een Europees symposium om de kennis van de chemische reactiekunde te bevorderen. Deze activiteiten resulteerden in het eerste symposium op dit vakgebied – het (First) European Symposium on

Chemical Reaction Engineering (ESCRE 1) – dat in 1957 te Amsterdam werd gehouden. De contacten tussen experts uit Duitsland, Engeland, Frankrijk en Nederland hadden tot gevolg dat door Nederlandse procestechnologen, onder auspiciën van KIVI en KNCV, bij de EFCE een voorstel werd ingediend om een werkgroep te vormen “to prepare (and not to organise) federal symposia on the subject of Chemical Reaction Engineering to promote the exchange of findings and knowledge in this field” (citaat uit een brief gedateerd 19 juli 1958, van Van Krevelen en Rietema aan het Executive Committee van de EFCE).³²

Het EC van de EFCE steunde dit initiatief en benoemde negen experts uit vier Europese landen als leden van de WPCRE: E. Wicke, F. Patat en K. Schoenemann (D); Danckwerts en K.G. Denbigh (GB); J. Cathala en M. Letort (F); en Van Krevelen en Rietema (NL). In de verdere geschiedenis van deze Working Party speelden Nederlanders een grote rol. Achtereenvolgens traden als voorzitter op: Van Krevelen (1959-1960), Kramers (1960-1963), Van Heerden (1963-1972) en Thoenes (1972-1990). De functie van secretaris werd vervuld door Rietema (1957-1962), Van de Vusse (1962-1972) en Fortuin (1972-1993).

In de werkgroep werd de organisatie van symposia op hoofdlijnen voorbereid. De concrete organisatie was in handen van de nationale vereniging van het land waar het symposium zou plaatsvinden. Nadat in 1960 en 1964 ESCRE-2 en ESCRE-3 in Amsterdam waren gehouden, werd ESCRE-4 in 1968 georganiseerd in Brussel, waar G.F. Froment, hoogleraar in Gent (B), contacten tot stand bracht met de American Chemical Society (ACS) en het American Institute of Chemical Engineers (AIChE).

In aansluiting hierop werd door vertegenwoordigers van de ACS/AIChE en de EFCE het eerste internationale symposium op het gebied van de chemische reactiekunde georganiseerd dat onder het acronym ISCRE-1 ((First) International Symposium on Chemical Reaction Engineering) in 1970 te Washington werd gehouden. Tijdens dit symposium kwamen gedelegeerden van ACS, AIChE, en EFCE onder voorzitterschap van Van Heerden tot het besluit elk schrikkeljaar een International Symposium on Chemical Reaction Engineering te houden in Europa en elk ander even jaar in Noord-Amerika. Deze regel is gehandhaafd tot het jaar 2000.³³

Op soortgelijke wijze, soms wat minder gestructureerd, opereerden ook latere EFCE-werkgroepen. Vooral de werkgroep ‘Distillation, Absorption, Extraction’ heeft onder voorzitterschap van Zuiderweg, hoofd Equipment Engineering van het KSLA en later hoogleraar in Delft, een belangrijke wetenschappelijke bijdrage tot de ontwikkeling van deze *unit operations* geleverd. Andere werkgroepen waarin Nederlandse procestechnologen participeerden, behandelden ‘mengen en roeren’, ‘documentatie’, ‘het gedrag van niet-Newton vloeistoffen’ en ‘het gebruik van computers in de procestechnologie’.

De positie die de procestechnologie in Nederland omstreeks 1970 internationaal had weten te verwerven blijkt ook uit het verzoek van de EFCE en de ICChE (Interamerican Confederation of Chemical Engineering) om in 1976 in Amsterdam het First World Congress on Chemical Engineering (WCCE-1) te organiseren. Het Executive Committee en het Science Committee, die het congres voorbereidden, bestonden uit leden werkzaam bij de ‘Grote Vijf’ en enkele universiteiten: Westerterp (Philips-Duphar), Van Swaaij (THT), W.T. Koetsier (THT), T. Reith (Akzo), W.J. Beek (Unilever), A.A.H. Drinkenburg (RUG), Fortuin (DSM) en De Groot (Shell). Onder de titel ‘Chemical Engineering in a Changing World’ wilde het congres de vorderingen in de procestechnologie bij de wetenschappelijke en commerciële netwerken tonen. Het werd gehouden van 28 juni tot 1 juli 1976, gaf aansluiting op de Achema, de driejaarlijkse tentoonstelling van procesapparaten in Frankfurt, en werd geopend met een toespraak door Z.K.H. Prins Bernhard.³⁴

Sindsdien zijn om de vijf jaar dergelijke wereldcongressen door buitenlandse collega’s georganiseerd (Montreal, 1981; Tokio, 1986; Karlsruhe, 1991 en San Diego, 1996). De activiteiten van het internationale wetenschappelijke netwerk waren vooral mogelijk dankzij de gezamenlijke

inzet van Nederlandse procestechnologen uit industrie en universiteit binnen het kader van de sectie CT/KNCV en de afdeling CT/KIVI, waarvan de bestuursvergaderingen steeds gemeenschappelijk waren. In de tweede helft van de jaren zeventig werd bij de activiteiten ook een sectie van het Nederlands Instituut van Register-Ingenieurs en Afgestudeerden van HTS'en (NIRIA) betrokken, zodat in 1978 een fusie van deze onderdelen van KNCV, KIVI en NIRIA tot stand kon komen. Deze nieuwe groepering van Nederlandse Procestechnologen (NPT) organiseert sindsdien wetenschappelijke bijeenkomsten en symposia, houdt gezamenlijke bestuurs- en jaarvergaderingen en onderhoudt contacten met buitenlandse collega's, waarbij elk van de drie onderdelen echter deel blijft uitmaken van een van de drie Nederlandse moederverenigingen.

COMMERCIEËLE NETWERKEN

Bij de ontwikkeling en verbetering van processen was vaak betrouwbare aanvullende informatie nodig, bijvoorbeeld omtrent het hydrodynamisch gedrag en de overdrachtsverschijnselen bij *unit operations* in grootschalige apparatuur. Omvangrijke procesapparaten kunnen meestal pas betrouwbaar worden ontworpen als er ook gegevens beschikbaar zijn, verkregen uit proeven met apparatuur op technische schaal. Daar een dergelijk onderzoek in de regel kostbaar is, willen participerende ondernemingen meestal niet dat dergelijke gegevens in de open wetenschappelijke literatuur worden opgenomen.

In dit verband kan worden vermeld dat in de periode 1955 tot 1970 bij Shell in het KSLA een grootschalige proefdestillatie-opstelling (*pilot plant*) in bedrijf is geweest om gegevens te genereren waarmee de efficiëntie van grootschalige destillaties van bij Shell veel voorkomende systemen verhoogd kon worden. Bij Akzo onderzocht men op technische schaal een verdampingskristallisator om de keukenzoutproductie energie-zuiniger te doen verlopen. Bij DSM werden experimenten grootschalig uitgevoerd in een absorptiekolom, een natte-wandkolom, een proefkristallisator, een verticale eentrapsverdamer, een gas-vloeistofreactor, een reactor voor viskeuze niet-Newton vloeistoffen, een proefkoeltoren, een pulsatiekolom en een zeefplatenkolom. Hierbij werd waardevolle kennis gegenereerd omtrent het hydrodynamisch gedrag en stoftransport in een- of meerfasige systemen in grootschalige procesapparaten.

Dergelijk onderzoek is echter kostbaar, vooral wanneer een continue bedrijfsvoering in een aparte *pilot plant* nodig is, die veel arbeidskracht vergt. Bovendien waren voor een continue bedrijfsvoering grote debieten nodig van stromen die de apparatuur moesten passeren, waardoor soms een parallelschakeling in een bestaande fabrieksinstallatie nodig was, die vaak veel 'off-spec'-producten leverde en een extra belasting voor het stafpersoneel meebracht. Door de buitengewoon sterke stijging van arbeidskosten eind zestiger jaren, werd dit type onderzoek vanaf 1970 veelal te kostbaar voor één bedrijf en moesten alternatieven in beschouwing worden genomen. De introductie van geautomatiseerde *bench-scale units* en de toepassing van processimulatie om tot betere vergrotingsregels te komen waren mogelijkheden om de kostenstijgingen het hoofd te bieden. Daarnaast kozen steeds meer bedrijven voor de mogelijkheid grootschalig procestechnologisch onderzoek op coöperatieve basis te verrichten.³⁵

Een onderneming die lid is van een dergelijke organisatie voor coöperatieve research, kan jaarlijks voor slechts ongeveer 5 % van de werkelijke kosten beschikken over alle onderzoeksresultaten. Hierbij moet echter wel worden opgemerkt dat dergelijk onderzoek 'confectie-research' is en geen 'maatwerk'. Door actieve participatie van bedrijfsgedelegeerden in de 'Technical Advisory Committees' kan men het onderzoeksprogramma bijsturen in de door zijn bedrijf gewenste richting. Wil men echter bedrijfsspecifiek maatwerk, dan moeten hiervoor extra financiële middelen beschikbaar worden gesteld.

Een belangrijk deel van het gegenereerde kennispakket kan worden toegepast voor het uitbreiden, verbeteren en in stand houden van de eigen chemische procesindustrie. Het is gebleken, dat een goede benutting van de elders gegenereerde kennis, werktijd vereist van eigen deskundig personeel, dat met het beheer, de verwerking, de distributie van het kennispakket en de begeleiding van de gebruikers binnen de onderneming is belast. De kosten van beheer in eigen bedrijf komen inclusief overhead gemiddeld overeen met een bedrag dat ongeveer twee maal zo hoog is als de jaarlijkse contributie.

Verscheidene Nederlandse bedrijven sloten zich bij één of meer van deze coöperatieve researchorganisaties aan. Naast grote internationale productiebedrijven als Shell, Unilever, Akzo en DSM, gold dit bijvoorbeeld voor Gist Brocades en voor *engineering contractors* als Fluor Daniel (Haarlem), Comprimo (Amsterdam) en Tebodin (Den Haag). Vanwege het belang dat deze coöperatieve organisaties hebben gehad voor de expansie van de (petro)chemische industrie in Nederland, zullen in het navolgende enkele samenwerkingsverbanden nader worden toegelicht.³⁶

VLAMONDERZOEK

In de Nederlandse procesindustrie werd niet alleen de behoefte gevoeld aan, maar werden ook initiatieven ontplooid voor de oprichting van coöperatieve researchorganisaties. Zo zag J.E. de Graaf, destijds hoofd van de Research Afdeling van Hoogovens in IJmuiden, reeds in 1947 de noodzaak in van een verbetering van de efficiëntie en veiligheid van grootschalige vuurhaarden. Hij wilde door experimenteel onderzoek de wetenschappelijk verantwoorde optimale condities vastleggen voor het smelten van staal. Het eerste onderzoek was gericht op de stralingskarakteristieken van oliegestookte branders en de invloed hierop van de soort olie en de constructie van de branders. Ook elders in Nederland werd vlamonderzoek verricht, zoals bij Shell ten behoeve van kraakovens in raffinaderijen en bij Staatsmijnen dat cokesovengas leverde aan bedrijven en gemeenten in Zuid-Nederland.

Het onderzoek van grootschalige vuurhaarden bleek spoedig te kostbaar voor één enkele onderneming en zelfs voor één land. Daarom kwamen reeds vanaf 1948 internationale contacten tot stand, die in 1955 leidden tot de oprichting van de International Flame Research Foundation (IFRF), gevestigd bij Hoogovens in IJmuiden, waarvan nationale verenigingen voor vlamonderzoek lid waren. Sindsdien werd het onderzoek bij IFRF gericht op de warmteoverdracht, aerodynamica en samenstelling van afgassen van branders in vuurhaarden die met gas, olie of poederkool werden gestookt. Ook fakkels voor raffinaderijen en naftakrakers werden beproefd en verbeterd. In 1976 verrichtte IFRF onderzoek waarin nationale organisaties voor vlamonderzoek uit veertien landen op vier continenten participeerden. De personeelskosten konden worden beperkt doordat IFRF op het terrein van Hoogovens was gevestigd en op afroep technisch personeel van Hoogovens kon huren.³⁷

IFRF ontving toen naast de jaarlijkse contributies van de nationale verenigingen sinds tien jaar aanzienlijke financiële ondersteuning van de EEG. Ook de United States Environmental Protection Agency (USEPA) ondersteunde het vlamonderzoek ter reductie van de bij verbranding gevormde SO_x en NO_x. IFRF verstreekte haar leden de resultaten van onderzoek en gaf onder meer adviezen inzake het gebruik van brandstoffen voor ondervuring van ketels.

Een belangrijk onderdeel van het onderzoek van vlammen en branders was de karakterisering van de kwaliteit en eigenschappen van het gedistribueerde gas. Gasbedrijven leverden vóór 1960 stadsgas, hoogovengas en cokesovengas die verschilden wat betreft de zogeheten Wobbe-index. De constructie en opstelling van gasverbruiksapparaten en de uitwisselbaarheid van gassen waren onderwerp van onderzoek op diverse laboratoria, waaronder het

Gas Instituut van de Vereniging van Exploitanten van Gasbedrijven (GIVEG). Tussen 1961 en 1966 werden in Nederland nagenoeg alle gasverbruiksapparaten omgebouwd of vernieuwd om ze geschikt te maken voor Gronings aardgas. Het onderzoek van de uitwisselbaarheid van gassen was na 1970 in de afzonderlijke bedrijven minder relevant, omdat toen aan verbruikers in Nederland maar één soort gas werd geleverd. Onderzoek van gasverbruiksapparaten voor kleinverbruikers werd daarna meer geconcentreerd bij de Gasunie in Groningen en bij het GIVEG in Apeldoorn. Grootverbruikers konden een beroep doen op het IFRF in IJmuiden.³⁸

DESTILLATIEONDERZOEK

Initiatieven voor coöperatieve research waren er vanaf 1950 ook in het buitenland. Vooral in de Verenigde Staten bestond behoefte aan dit type onderzoek. In 1952 werd daar door dertig Amerikaanse partners ten behoeve van grootschalig destillatieonderzoek het bedrijf Fractionation Research, Inc. (FRI) opgericht.³⁹

In 1976 had FRI een budget van \$ 750.000 per jaar, had de opgestelde apparatuur een vervangingswaarde van \$ 2.300.000 en waren 90 ondernemingen over de hele wereld lid van die organisatie. De kern van het personeel werd gevormd door zeven *chemical engineers*. De personeelskosten konden worden beperkt doordat FRI in South Pasadena (Californië) was gevestigd op het terrein van de *contractor* C.F. Braun & Co., waarvan technisch personeel op afroep kon worden gehuurd, net als bij IFRF en Hoogovens. Het doel van FRI, waarvan Zuiderweg gedurende vele jaren adviseur was, was onderzoek te verrichten in commerciële apparatuur voor fractionering, absorptie en strippen. In twee kolommen, die van verwisselbare 'contactorganen' (zeefplaten, vullichamen, e.d.) konden worden voorzien, konden destillaties met representatieve modelsystemen worden uitgevoerd bij drukken van 0,3 tot 34 bar. Additionele apparatuur stond ook ter beschikking zoals opslagvaten, pompen, reboilers, condensoren en warmtewisselaars, die op diverse gewenste manieren konden worden geschakeld. Beide kolommen bevatten vensters voor visuele waarneming, het nemen van foto's of het maken van films van het intensieve contact tussen gas en vloeistof op verschillende soorten contactorganen in de kolom. Tijdens deze grootschalige experimenten werd onderzocht tussen welke grenzen van de debieten van de damp en vloeistofstromen op diverse contactorganen de stofoverdracht optimaal was en de meesleuring van druppels naar een hogere plaat (*entrainment*) en het doorlekken van vloeistof naar een lagere plaat (*weeping*) zo klein mogelijk was. Het rendement per plaat en andere gegevens werden verzameld in handboeken, computerprogramma's en films, die konden worden gebruikt bij het ontwerp van commerciële destillatiekolommen.

WARMTEWISSELING

In de petrochemische en chemische industrie moet een belangrijk deel van de investeringskosten worden besteed aan warmtewisselaars. In een optimaal ontwerp moet een zo groot mogelijke warmtewisselingscapaciteit per volume-eenheid gepaard gaan met een lage drukval en moeten de apparaten betrouwbaar en efficiënt zijn in het gebruik, niet trillen, niet corroderen en eenvoudig te reinigen zijn.

In dit verband is op initiatief van Phillips Petroleum Company en E.I. du Pont de Nemours & Co, Inc. door elf ondernemingen in de Verenigde Staten in 1962 een nieuwe organisatie voor coöperatieve research opgericht om warmtewisselaars, reboilers en condensoren grootschalig te onderzoeken. Ook deze organisatie, genaamd Heat Transfer Research, Inc. (HTRI) en gevestigd in Alhambra (Californië), kon rekenen op technische en administratieve ondersteuning door

C.F. Braun & Co. In 1976 bestond de staf uit 14 *engineers*, meestal met een academische opleiding en een jarenlange ervaring op het gebied van warmteoverdracht. Van de ruim 120 ondernemingen die toen lid waren, bevonden zich ongeveer 80 in de Verenigde Staten en 40 elders, voornamelijk in Europa. Hieronder waren 25 procesindustrieën, 45 fabrikanten van warmtewisselaars en 50 *engineering contractors*. De 120 leden hadden circa 190 dochterondernemingen, zodat deskundigen op ruim 300 locaties in de ‘vrije wereld’ over het kennispakket van HTRI konden beschikken. In de periode 1962-1976 werd jaarlijks voor ongeveer een miljoen dollar aan research besteed; de vervangingswaarde van de apparatuur was ongeveer twee miljoen dollar. Van de relatief goedkope *know-how* heeft ook de procesindustrie in Nederland geprofiteerd, omdat in 1976 bij een vijfjaarlijks contract de contributie per onderneming slechts tussen \$ 3.000 en \$ 20.000 per jaar bedroeg.⁴⁰

Een andere organisatie die grootschalig onderzoek verrichtte aan warmtewisselaars was Heat Transfer and Fluid Flow Service (HTFS). Deze organisatie voor coöperatieve research, die werd opgezet in 1967 en operationeel was in 1969, kwam voort uit het grootste wetenschappelijk laboratorium van het Verenigd Koninkrijk, in Harwell. In dit Atomic Energy Research Establishment werkten in 1976 5000 stafmedewerkers, waarvan 1000 *graduate engineers*. Door de verminderende belangstelling voor kernenergie moest het management van deze organisatie zijn aandacht meer richten op toepassing van de gegenereerde kennis in de chemische industrie. Na 1970 werden ook sponsors gevonden buiten Engeland. G.F. Hewitt, die met de leiding van HTFS was belast, werd later hoogleraar in Imperial College in Londen. Bij een jaarlijkse contributie van £ 1.400 tot £ 2.800 ontving een lid ontwerprapporten, handboeken en een serie computerprogramma's.⁴¹

HTFS had in 1976 ongeveer 110 sponsors. Het werk van HTFS was verdeeld in zes gebieden, namelijk cryogene warmteoverdracht, warmteoverdracht bij koken en tweefasige stroming, warmteoverdracht bij eenfasige stroming, koelers, straling en vlammen, en condensatie. Ook werden cursussen gegeven voor het gebruik van computerprogramma's en samen met universiteiten werden meettechnieken ontwikkeld en toegepast waaronder laser-Doppler-anemometrie.

ANDER COÖPERATIEF ONDERZOEK

Een instituut dat op soortgelijke wijze opereerde als HTFS, was Separation Processes Services (SPS) dat eveneens voortkwam uit het Laboratorium van de Atomic Energy Authority in Harwell. SPS leverde aan sponsors kennis omtrent scheidingsprocessen zoals kristallisatie, extractie, filtratie, drogen en gasreiniging. De kosten van de contributie van zowel HTFS als SPS waren beperkt, omdat aanvankelijk ongeveer de helft van de uitgaven voor onderzoek voor rekening van de Engelse overheid kwam.

Verder waren diverse ondernemingen in Nederland lid van Particulate Solid Research, Inc. (PSRI), gevestigd in Manhattan College, New York. Deze organisatie voor coöperatieve research verrichtte, onder leiding van de fluïdisatiespecialist en consultant F.A. Zenz, onderzoek aan *fluid beds*, cyclonen, pneumatisch transport en attritie van deeltjes. In 1976 had PSRI een jaarlijks budget van \$ 200.000 en bedroeg de jaarlijkse contributie \$ 4.800 voor *engineering companies* en \$ 7.200 voor *processing companies*.⁴²

Een andere organisatie, die gericht was op *fine particle technology*, was het International Fine Particle Research Institute (IFPRI). Deze in 1980 opgerichte organisatie had geen eigen researchfaciliteiten, maar was een samenwerkingsverband van industrieën en universiteiten om onderzoek op het betreffende vakgebied te verrichten en te coördineren. IFPRI, waarvan onder andere Exxon, Shell, ICI, Du Pont en Unilever lid waren, had toegang tot de beste experts op het vakgebied en bood zo een kader voor de uitwisseling van informatie op dit gebied.

De door het instituut begeleide fundamentele research werd gericht op problemen die voor de participerende industrieën relevant waren. Per onderneming berekende men jaarlijks een contributie die ongeveer 5 % van de toegevoegde waarde was.

Met betrekking tot fluïdisatie kan nog worden opgemerkt dat uitstekende faciliteiten voor grootschalig fluïdisatieonderzoek aanwezig zijn in het Institut Français du Pétrole in Lyon, waarvan de directeur P. Trambouze als gedelegeerd lid voor Frankrijk vele jaren zitting had in de WPCRE van de EFCE. De unieke faciliteiten in dit instituut werden voornamelijk bekostigd uit een opslag op de benzineprijs in Frankrijk.

Naast het onderzoek van het gedrag van systemen in grootschalige apparatuur waren in de periode 1950-1980 ook organisaties op coöperatieve basis werkzaam die fysische eigenschappen en de voor scheidingsprocessen zo belangrijke evenwichten van systemen bepaalden. Bij het ontwerpen van bijvoorbeeld warmtewisselaars moet men beschikken over betrouwbare waarden van de transporteigenschappen van de gassen en vloeistoffen zoals warmtegeleidingscoëfficiënten, viscositeiten, dichtheden, soortelijke warmten en oppervlaktespanningen van componenten en mengsels bij diverse temperaturen en drukken. Daartoe is in 1973 Fluid Properties Research, Inc. (FPRI) opgericht. Het onderzoek werd uitbesteed aan Oklahoma State University.⁴³

Soortgelijke activiteiten werden ook verricht in het Instituut for Kemiteknik van de Deense Technische Hogeschool te Lyngby, bij Kopenhagen. Daar werden gegevens gegenereerd, die niet alleen transporteigenschappen betroffen, maar die ook betrekking hadden op gas-vloeistof- en vloeistof-vloeistofevenwichten. Bovendien werden vergelijkingen opgesteld om deze evenwichten thermodynamisch verantwoord te kunnen beschrijven. Naast de contributie van participerende bedrijven werd dit onderzoek ook financieel ondersteund door de Danish Council for Scientific and Technical Research. Verder kan nog worden opgemerkt dat ook in andere universiteiten projecten op commerciële basis werden ontwikkeld voor procesindustrieën. Zo was de organisatie Process Simulation Associates, Inc. (PSAI) gelieerd met het gerenommeerde MIT (Cambridge, Mass.). Programmatuur voor ladingsgewijze destillatie werd door PSAI ontwikkeld, en geleverd voor een eenmalige donatie van \$ 25.000 en een jaarlijkse contributie van \$ 5.000 voor actualisering van de computerprogramma's. Sinds eind zeventiger jaren werd in MIT ook programmatuur ontwikkeld voor *flowsheet simulation* (ASPEN) dat in de procesindustrie kon worden toegepast voor procesintegratie en bij het ontwerpen en verbeteren van processen.

ECONOMISCHE ASPECTEN VAN SCHAALVERGROTING

In de chemische industrie in Nederland zijn vóór 1960 vaak processen ontwikkeld zonder uitvoerige marktanalyse en kostprijsberekening. Deze aspecten van procesontwikkeling waren aanvankelijk minder belangrijk, omdat in die periode door de relatief geringe productiecapaciteit en de grote vraag naar producten, de afzet meestal was gegarandeerd. Na 1970, toen talrijke grootschalige productie-eenheden operationeel waren geworden, ondervonden producenten echter dat niet alleen productiecapaciteit en afzet, maar ook researchinspanningen begrenzingen kunnen hebben.

Economische overwegingen zorgden ervoor dat toen in een vroeg stadium van de procesontwikkeling alleen die processen voor verder onderzoek of schaalvergroting in aanmerking konden komen waarvan redelijkerwijs verwacht mocht worden dat: (a) daarvoor voldoende financiële middelen beschikbaar waren; (b) de kostprijs van het product aanmerkelijk lager was dan de marktprijs; (c) schaalvergroting de kostprijs per eenheid product voldoende verminderde; (d) de researchkosten met inachtneming van 'de wet van de verminderende meeropbrengst' verantwoord

waren (gold dit niet, dan was aanvullend onderzoek alleen nog relevant, als een sprongsgewijze procesverbetering was te verwachten of als aanvullend onderzoek goedkoper dan voorheen kon geschieden, bijvoorbeeld door overgang op coöperatieve research); en, tenslotte, (e) verlaging van de kostprijs het toepassingsgebied van een product en daardoor zowel afzet als totale opbrengst kon vergroten.

Verder bleek dat rekening moest worden gehouden met het feit, dat ingebruikname van een grootschalige productie-eenheid, bijvoorbeeld een naftakraker die 500.000 ton etheen per jaar produceerde, een schoksgewijze productiestijging kon veroorzaken, waardoor het aanbod de afzet tijdelijk oversteeg en de marktprijs daalde. Als daarna de afzet zodanig groeide dat het aanbod werd overschreden, dan steeg de marktprijs weer. Deze cyclus veroorzaakte vooral in de chemische industrie voor bulkproducten periodiek prijsbederf. Sommige ondernemingen hebben in de beschouwde periode een dergelijke cyclus juist benut door anticyclisch te investeren en daarmee extra opbrengst voor het bedrijf te verkrijgen. Deze procedure is echter riskant en kan alleen worden toegepast als de onderneming in een periode van prijsbederf toch over voldoende durfkapitaal beschikt.⁴⁴

Om de gevolgen van een schoksgewijze verandering van de productiecapaciteit van etheen te beperken, hebben een zestal bedrijven in Nederland, België en Duitsland de Äthylen-Rohrleitungs-GmbH (ARG) opgericht, welke een etheenleiding exploiteert die locaties in Rotterdam, Moerdijk, Antwerpen, Zuid-Limburg en het Ruhrgebied verbindt en die door de participerende ondernemingen als buffer voor geproduceerde en benodigde etheen kan worden gebruikt.⁴⁵

NEVENVERSCIJNSELEN DER GROOTSCHALIGE PRODUCTIE

De snelle expansie van de procesindustrie heeft in de beschouwde periode de samenleving ingrijpend beïnvloed. De toename van de welvaart was voor een groot gedeelte een gevolg van de beschikbaarheid van de relatief goedkope energiedragers aardgas en aardolie en van de ontwikkeling en schaalvergroting van productieprocessen. Volgens de gangbare technisch-economische modellen van processen veroorzaakt schaalvergroting in de procesindustrie een kostprijsverlaging per massa-eenheid van een product. Dankzij het vertrouwen dat Raden van Bestuur van grote ondernemingen hadden in de geldigheid van dit technisch-economische model en dankzij het feit dat de ontwikkelingsfase waarin de procestehnologie verkeerde de technische middelen ter realisering verschafte, zijn tussen 1960 en 1970 de capaciteiten van vele productie-eenheden in de chemische industrie meer dan vertienvoudigd. De verwerking van de producten tot hoogwaardige gebruiksgoederen bevorderde de nijverheid en de werkgelegenheid en vermeerderde de toegevoegde waarde aanzienlijk. Als gevolg van deze ontwikkeling kon de samenleving worden voorzien van grote hoeveelheden veelsoortige producten tegen relatief lage prijzen, waardoor welvaart en welzijn toenamen.⁴⁶

Na 1970 is de samenleving echter geconfronteerd met nadelige verschijnselen die met een te snelle groei van de productie gepaard gaan. Door deze nadelige effecten werden twijfels opgeroepen omtrent de algemene geldigheid van het gangbare technisch-economische model. Men moet bedenken dat dit model alleen voldoet, wanneer geen beperkingen worden gesteld door afzet, grondstoffenschaarste, energievoorraad, milieu, sociale structuur, logistiek, veiligheid, organisatie, menselijke motivatie en flexibiliteit van mens en samenleving. Is aan deze voorwaarden niet voldaan dan kunnen er ongewenste neveneffecten optreden.

Schaduwzijden van te snelle groei van de productiecapaciteit kunnen zijn overcapaciteit, prijsbederf, schoksgewijs aanbod, dreiging van schaarste aan energiedragers en grondstoffen, groter percentage stilstand van productie-eenheden, moeilijker sturing, milieubederf, omvangrijke

potentiële gevaren, onmenselijk imago, langere communicatielijnen, vervreemding, motivatievermindering, arbeidsonrust en werkloosheid. In de jaren zeventig, toen het economische getij keerde, kreeg de Nederlandse chemische industrie met betrekking tot de meeste van deze problemen ruimschoots haar deel.

VEILIGHEID EN MILIEU

In de periode 1950 tot 1970 was het wettelijk kader voor bewaking van de veiligheid en de bescherming van het milieu ingesteld op relatief kleinschalige industriële productie-installaties. Ook werd bij een geringe milieubelasting vaak het natuurlijk herstellingsvermogen voldoende geacht. De nadelen van de industrialisatie voor veiligheid en milieu werden door de overheid en de bedrijfsdirecties geaccepteerd als onvermijdelijk nevenverschijnselen. Jonge ingenieurs en chemici die op deze ongewenste neveneffecten wezen, vonden geen gehoor in universiteit en industrie en werden van bedrijfswege gemaand zich te conformeren aan bestaande normen.

Toen ná 1970 grootschalige productie-eenheden op vele locaties waren gerealiseerd en de potentiële gevaren en de milieubelasting aanzienlijk waren gegroeid, namen de risico's toe. In die periode werden bovendien veel bedrijven door toegenomen concurrentie zodanig tot kostenbesparing gedwongen, dat zelfs preventief onderhoud van bedrijfsinstallaties moest worden nagelaten. Verder werden initiatieven voor verbetering binnen de bedrijven gefrustreerd door het ontbreken van een geëigend wettelijk kader, de sterk gestegen olieprijs en de hoge fiscale lasten en rentestand in een teruglopende conjunctuur.

Mede hierdoor deden zich bijvoorbeeld gevaarlijke situaties en ongevallen voor bij elektrostatische oplading optredend tijdens het transport van koolwaterstoffen via pijpleidingen naar opslagtanks, of bij het reinigen van mammoettankers met hogedruk-waterkanonnen in de tropen, bij drukveranderingen in afgesloten opslagtanks als gevolg van absorptie of desorptie van goed oplosbare gassen, tijdens het opstarten of beëindigen van een continu productieproces, bij het mengen van gassen, bij fijnverdeelde vaste stoffen (stofexplosies) of fijndisperse vloeistoffen (nevelexplosies), door lekkende flenzen, na een guillotinebreuk van gas- of olieleidingen, door wegloupreacties en door ondeskundige behandeling van (kunst)meststoffen. In de betreffende periode zijn slachtoffers gevallen door explosies in Flixborough, Groot-Britannië (1974) en Geleen (1975) en door verspreiding van gifwolken in Seveso (Italië, 1976) en Bhopal (India, 1984).⁴⁷

Tussen 1970 en 1980 zijn mondiaal in de chemische en olie-industrie 121 geregistreerde explosies opgetreden waarbij vijf of meer personen per ongeval werden gedood. Het totaal aantal geregistreerde dodelijke slachtoffers was 2702, waarvan 1617 in fabrieken en 1085 bij transport. Als voorbeeld van een ernstig ongeval in de Nederlandse chemische industrie kan de explosie van Nafta-kraker II van DSM in Geleen worden genoemd. Op 7 november 1975 kwam vloeibare propeen in een daarvoor niet bestemde leiding, met het gevolg dat door koude brosheid deze leiding scheurde en een wolk propeengas ontsnapte. Enkele seconden later bereikte deze wolk de kraakovens en werd ontstoken. Er ontstond een enorme vuurzee, gevolgd door een explosie. De NAK II veranderde in een laaiend inferno, waarbij 14 doden en 104 gewonden vielen te betreuren. Op het DSM-terrein werd schade aangericht voor meer dan 100 miljoen gulden. Buiten het bedrijf bracht de explosie aan ruim 2500 woningen en gebouwen glasschade toe.⁴⁸

Als gevolg van zulke gebeurtenissen kon nadere regelgeving niet uitblijven. De landelijke overheid droeg TNO op een map samen te stellen met veiligheidsvoorschriften voor de chemische industrie. Deze waren zo streng, dat bij doorvoering ervan grootschalige petrochemische activiteiten

in Nederland nagenoeg onmogelijk zouden worden. Nader overleg tussen overheid en industrie kon dan ook niet uitblijven. Er werd een aantal commissies gevormd, waarin deskundigen van chemische bedrijven en vertegenwoordigers van de overheid en TNO zitting hadden om nieuwe, voor de industrie aanvaardbare, veiligheidsvoorschriften op te stellen. Een voor de industrie bevredigend resultaat werd daarbij bereikt.

Om kennis omtrent potentiële gevaren uit te breiden hebben chemische industrieën ook zelf activiteiten ontplooid door onderzoek in eigen laboratoria en door medewerkers te laten deelnemen aan seminars, symposia en wetenschappelijke en commerciële netwerken. Zo werd het Third International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, dat in 1980 in Bazel is gehouden, door ruim 600 personen bijgewoond. Van de bijna 100 voordrachten waren er 19 uit Nederland. Verder participeerde ook een aantal Nederlandse ondernemingen in het Design Institute for Emergency Relief Systems (DIERS), dat op coöperatieve basis in Burr Ridge bij Chicago onderzoek liet verrichten op het gebied van procesbeveiliging door Fauske and Associates, Inc.⁴⁹

BESLUIT

De procestechnologie is van wezenlijk belang voor de handhaving en verbetering van de positie van de Nederlandse chemische, olie- en agro-industrie, omdat dit vakgebied de technisch-wetenschappelijke basis vormt van vele in die industrieën toegepaste werkwijzen. Tezamen vormen deze bedrijfstakken het industriële complex waarvan meer dan de helft van het Nederlandse bruto nationale product afhankelijk is.

De wetenschappelijke basis van de procestechnologie is in Nederland van het begin af ontwikkeld door zowel het bedrijfsleven als de universiteiten, waarbij door verschillende onderzoekers en ondernemers pionierswerk is verricht. Onderzoekscentra konden tot dusver altijd over voldoende goed opgeleide en gemotiveerde krachten beschikken. Als echter de huidige trend zich in Nederland voortzet, dat steeds minder personen tot goede onderzoekers worden opgeleid, zullen deskundigen van elders moeten worden aangetrokken of gehele instituten naar andere landen worden overgeplaatst. Werkgelegenheid, investeringen en bijdragen aan het BNP zullen daardoor afnemen en ook de zo nodige duurzame technologische ontwikkeling (DTO) zal stagneren.

Noten

HOOFDSTUK 4: PROCESTECHNOLOGIE

¹ ‘De na-oorlogse groei’, *NCI: Orgaan van de Vereniging van de Nederlandse Chemische Industrie* 35 (11) (3 juni 1993), 37-45.

² J.P. Smits en B.P.A. Gales, ‘Olie en gas’, in: J.W. Schot e.a. (red.), *Techniek in Nederland in de twintigste eeuw*, deel 2 (Zutphen 2000), 66-89; E. Homburg, A. van Selm en P. Vincken, ‘Industrialisatie en industrie-complexen: de chemische industrie tussen overheid, technologie en markt’, in Schot, *ibidem.*, 376-401.

³ Zie ook hoofdstuk 2: Wim Hutter, ‘Chemie, chemici en wetenschapsbeleid.’

⁴ [N.R. Amundson (ed.)], *Frontiers in chemical engineering: research needs and opportunities* (Washington, D.C. 1988).

⁵ Voor de geschiedenis van de procestechnologie, zie: W.F. Furter (ed.), *History of chemical engineering* (Washington D.C. 1980); W.F. Furter (ed.), *A century of chemical engineering* (New York 1982); N.A. Peppas (ed.), *One hundred years of chemical engineering. From Lewis N. Norton (M.I.T. 1888) to present* (Dordrecht 1989); C. Divall en S.F. Johnston, *Scaling up: The Institution of Chemical Engineers and the rise of a new profession* (Dordrecht 2000).

⁶ R.E. Treybal, *Liquid extraction*, 2de druk (New York 1963), viii.

⁷ M. van Winkle, *Distillation* (New York 1967), 1; R.J. Forbes, *Short history of the art of distillation from the beginnings up to the death of Cellier Blumenthal* (Leiden 1948); G. Sifalakis, *A century of distillation*, proefschrift Universiteit van Amsterdam, 13 december 1967.

⁸ E.T. Layton jr. en J.H. Lienhard (red.), *History of heat transfer: essays in honor of the 50th anniversary of the ASME Heat Transfer Division* (New York 1988).

⁹ Vgl. bijv. M.L. McGlashan, *Physico-chemical quantities and units: The grammar and spelling of physical chemistry*, 2de druk (Londen 1971).

¹⁰ R.C. Reid, J.M. Prausnitz, en T.K. Sherwood, *The properties of gases and liquids*, 3de druk (New York 1977), 298.

¹¹ B. Linnhoff, D.W. Townsend en D. Boland, *Process integration for the efficiënt use of energy: A user guide*, 3de druk (Rugby 1985).

¹² Vgl. E. van Oost e.a. (red.), *De opkomst van de informatietechnologie in Nederland* (Den Haag 1998).

¹³ H.A.M. Snelders, *De geschiedenis van de scheikunde in Nederland. Deel 2: De ontwikkeling van chemie en chemische technologie, 1900-1950* (Delft 1997), 167, 170-174; H. Kramers, ‘Chemical engineering in the Netherlands 1935-1965’, in: Peppas (red.), *One hundred years*, 143-152.

¹⁴ A.F.A. Reynhart, *De proeffabrieken voor fysische en chemische technologie van de Technische Hogeschool te Delft* (Den Haag 1951); A.F.A. Reynhart, *De modernisering van het Kamerlingh Onnes Laboratorium der Rijksuniversiteit te Leiden* (Den Haag 1952); Divall en Johnson, *Scaling up*, 187-188, 193.

¹⁵ [C.J. van Nieuwenburg e.a.], *De oogst. Een overzicht van het wetenschappelijk werk van Prof. dr. ir. H.I. Waterman (etc.)* (z.p., juni 1959); C. Boelhouwer, ‘De Waterman ringanalyse’, in: H. van Bekkum en J. Reedijk (red.), *Chemie achter de dijken. Uitvinders en uitvindingen in de eeuw na Van 't Hoff* (Amsterdam 2001), 44-45; C. Boelhouwer, ‘Hein Israël Waterman: kringen van hoge druk’, in: K.F. Wakker e.a. (red.), *Delfts goud: leven en werken van achttien markante hoogleraren* (Delft 2002), 64-79.

¹⁶ *1e Eeuwboek van het Technologisch Gezelschap te Delft, 1890-1990* (Delft 1989), m.n. 234-236.

¹⁷ R.B. Bird, W.E. Stewart en E.N. Lightfoot, *Transport phenomena* (New York 1960), x; Kramers, ‘Chemical engineering’; H.E.A. van den Akker en C.R. Kleijn (red.), *Het gewicht van de witte olifant: 50 jaar Kramers Laboratorium voor Fysische Technologie, 1949-1999* (Delft 1999).

¹⁸ H. Kramers en K.R. Westerterp, *Elements of chemical reactor design and operation* (Amsterdam 1963); K.R. Westerterp, W.P.M. van Swaaij en A.A.C.M. Beenackers, *Chemical reactor design and operation* (New York/Chichester 1984).

¹⁹ Zie o.a. [M.S.A. Vrijland en A.G.J. van der Ham (red.)]. *Westerterp and his coworkers in Twente 1977-1998 and beyond ... 20+ years of CT/IPP* (Enschede 1998); G.C.N. van den Aardweg e.d. (red.), *C. Boelhouwer 40 jaar chemisch technoloog* (Alblasserdam 1987).

²⁰ Zie o.a. J. Ellenberger en P. Hamersma (red.), *J.M.H. Fortuin, hoogleraar fysische technologie Universiteit van Amsterdam, 1976-1992* (Amsterdam 1992).

²¹ Vgl. S.T. Sie, 'Ontwikkelingen in de petroleumverwerkingsindustrie in de periode 1950-1980', voorstudie voor het onderhavige boek, Hilversum, 2 september 1998; en J.C. Vlugter, 'Eigenlijk geen scheikundige gebleven', in: *Werken aan scheikunde: 24 memoires van hen die de Nederlandse Chemie deze eeuw groot hebben gemaakt* (Delft 1993), 65-87.

²² J.J. van Deemter, F.J. Zuiderweg en A. Klinkenberg, 'Longitudinal diffusion and resistance to mass transfer as causes of nonideality in chromatography', *Chemical Engineering Science* 5 (1956), 271; *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, (1999), 473.

²³ Vgl. D. Medema en P.A. Gautier, 'Ontwikkelingen in de industriële scheikunde over de periode 1950-1980', voorstudie voor het onderhavige boek, Maarn/ Landsmeer, 16 september 1998.

²⁴ D.W. van Krevelen, 'Vijftig jaar activiteit in de Chemische Technologie', in: *Werken aan scheikunde*, 243-263; D.W. van Krevelen, *In retrospect: Een keuze uit de voordrachten* (Amsterdam 1980); J.A. Moulijn en H. van Bekkum, 'De alleskunner. Van Krevelen: recordhouder chemische vernoemingen', in: H. van Bekkum en J. Reedijk (red.), *Chemie achter de dijken. Uitvinders en uitvindingen in de eeuw na Van 't Hoff* (Amsterdam 2001), 46-47.

²⁵ D.W. van Krevelen, *Selected papers on chemical engineering science* (Amsterdam 1976).

²⁶ C. van Heerden, 'Autothermic processes, properties and reactor design', *Industrial & Engineering Chemistry* 45 (1953), 1242; O. Bilous en N.R. Amundson, 'Chemical reactor stability and sensitivity', *AIChE Journal* 4 (1955), 513-521; J.J. Heiszwolf en J.M.H. Fortuin, 'Design procedure for stable operations of first-order reaction systems in CSTR', *AIChE Journal* 43 (1997), 1060-1068.

²⁷ H.W. Lintsen (red.), *Research tussen vetkool en zoetstof: Zestig jaar DSM Research 1940-2000* (Zutphen 2000).

²⁸ P.J.C. Kaasenbrood, 'The urea stripping process. The technical manufacture of urea, with carbon dioxide used both as reactant and as stripping gas', in: *Proceedings of the Fourth European Symposium on Chemical Reaction Engineering, Brussels, 9-11 September 1968* (Oxford 1971), 317-328.

²⁹ N.M. Spaay, A.J.F. Simons en G.P. ten Brink, 'Design and operation of a pulsed packed column for liquid-liquid extraction', in: J.G. Gregory, B. Evans en P.C. Weston (red.), *Solvent extraction: proceedings of the international solvent extraction conference, ISEC 71, The Hague, 19-23 April, 1971*, 2 vols. (Londen 1971), 281; D.F. Ryan, L.P.B.M. Janssen en L.L. van Dierendonck, 'Circulation-time prediction in the scale-up of polymerization reactors with helical ribbon agitators', *Chemical Engineering Science* 43 (1988), 1961-1966; J.M.H. Fortuin en C. Boelhouwer, 'Nieuwe reactiemedia voor de fijnchemie in 2040', in: *Duurzaamheid en chemie: Een bundel essays geschreven op verzoek van het Interdepartementaal Onderzoekprogramma Duurzame Technologie (DTO)* (Delft 1996), 45-105.

³⁰ E.J. de Jong, 'Procesttechnologie: scheidingsprocessen en fysische transportverschijnselen', voorstudie ten behoeve van het onderhavige boek, Delft 20 augustus 1998.; vgl. ook [Stichting Nederlandse Apparaten voor de Procesindustrie], *N.A.P. catalogus 1962* (Den Haag 1962).

³¹ In Frankfurt waren D. Behrens en mevrouw L. Schubel van de Dechema de steunpilaren van de EFCE. Behrens ontving in 1984 het erelidmaatschap van het KIVI.

³² J.M.H. Fortuin, 'The Working Party on Chemical Reaction Engineering', *Chemical Engineering Science* 47 (1992), 2977-2982.

³³ J.M.H. Fortuin, 'Dertig jaar chemische reactiekunde', *Procesttechnologie*, no. 1 (1985), 12-13; Fortuin, 'The Working Party'; J.M.H. Fortuin, 'Chemical Reaction Engineering: 40 years of pan-European co-operation', *European Federation of Chemical Engineering Newsletter*, nr. 2 (1996), 23-25.

³⁴ W.T. Koetsier (red.), *Chemical engineering in a changing world: Proceedings of the plenary sessions of the First World Congress on Chemical Engineering, Amsterdam, June 28 - July 1, 1976* (Amsterdam 1976), 47-124.

³⁵ *ibidem*.

³⁶ Voor de rol van engineering contractors in Nederland, zie: A. van Rooij en E. Homburg, *Building the plant: A history of engineering contracting in the Netherlands* (Zutphen 2002).

³⁷ J.M. Beér en P.J. Kreyger, 'The research work of the International Flame Research Foundation', in: Koetsier (red.), *Chemical engineering in a changing world*, 47-62.

- ³⁸ Vgl. J.L. Schippers en G.P.J. Verbong, 'De revolutie van Slochteren', in: Schot e.a. (red.), *Techniek in Nederland in de twintigste eeuw*, deel 2, 202-219.
- ³⁹ R.H. Jones, 'Fractionation Research Inc. – a successful cooperative research in action', in: Koetsier (red.), *Chemical engineering in a changing world*, 95-108.
- ⁴⁰ J. Taborek en J.W. Clegg, 'Fourteen years of cooperative research at HTRI', in: Koetsier (red.), *Chemical engineering in a changing world*, 63-72.
- ⁴¹ G.F. Hewitt, 'HTFS: An industrial heat transfer and fluid flow service operating in a government laboratory framework', in: Koetsier (red.), *Chemical engineering in a changing world*, 81-94.
- ⁴² F.A. Zenz, 'Research on particulate solids at PSRI', in: Koetsier (red.), *Chemical engineering in a changing world*, 109-122.
- ⁴³ F.T. Selleck en R.N. Maddox, 'Cooperative research in chemical engineering, Fluid Properties Research, Inc.', in: Koetsier (red.), *Chemical engineering in a changing world*, 73-80.
- ⁴⁴ J.M.H. Fortuin, *Grootschaligheid kleinkrijgen. Voordracht uitgesproken ter gelegenheid van de ontvangst van de Akzo-prijs 1978, op vrijdag 7 april 1978, te Arnhem*.
- ⁴⁵ D. Mittmann, *Die chemische Industrie im nordwestlichen Mitteleuropa in ihrem Strukturwandel* (Wiesbaden 1974), 29, 35-36, 64-65, 80-82, 134-135, 210-211, 262-263, 272.
- ⁴⁶ J.M.H. Fortuin, *Aspecten van de procestechnologie. Afscheidsrede gehouden op 15 oktober 1992 in de aula van de Universiteit van Amsterdam* (Amsterdam 1992).
- ⁴⁷ Fortuin en Boelhouwer, 'Nieuwe reactiemedia voor de fijnchemie'; E.R. Koch en F. Vahrenholt, *Seveso ist überall: die tödlichen Risiken der Chemie* (Keulen 1978); *Seveso ist nicht überall: chemische Industrie zum Buch 'Seveso ist überall'* (Frankfurt a/M 1978); *Bhopal gas tragedy: Delhi Science Forum Report* (Delhi 1984).
- ⁴⁸ T.A. Kletz, *Myths of the chemical industry, or 44 things a chemical engineer ought not to know* (Rugby 1984); J. Hendriks, 'Tien jaar na de DSM-ramp', *Dagblad de Limburger*, 2 maart 1985.
- ⁴⁹ *Proceedings of the Third International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries* (Bazel 1980).