

# **Scheidingsprocessen**

# **Scheidingsprocessen**

J.A. Wesselingh  
H.H. Kleizen

© VSSD

Eerste druk 1990

Tweede druk, verbeterd 1994, 1998, 2002, 2006

Uitgegeven door:

VSSD

Leeghwaterstraat 42, 2628 CA Delft, The Netherlands

tel. +31 15 27 82124, telefax +31 15 27 87585, e-mail: [hlf@vssd.nl](mailto:hlf@vssd.nl)

internet: <http://www.vssd.nl/hlf>

URL over dit boek: **<http://www.vssd.nl/hlf/d002.htm>**

Voor docenten die dit boek in cursusverband gebruiken zijn de illustraties in dit boek in digitale vorm beschikbaar. Een verzoek om hierover de beschikking te krijgen kan men richten aan e-mail [hlf@vssd.nl](mailto:hlf@vssd.nl)

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

*All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.*

Printed in The Netherlands.

NUR 913

*Trefw:* scheidingsprocessen

ISBN-10 90-407-1297-2 ISBN-13 978-90-407-1297-5

# Voorwoord

Met deze inleiding in de scheidingsprocessen hopen wij niet alleen studenten in de Chemische Technologie maar ook studenten en professionals in andere vakgebieden (zoals Werktuigbouwkunde, Mijnbouwkunde, Natuurkunde en Civiele Techniek) van dienst te zijn.

Bij de behandeling wordt voorkennis verondersteld van massa- en energiebalansen, van stromingsleer en van fasen-evenwichten (oplosbaarheden). Erg veel hoeft dat niet te zijn: het vak wordt opgebouwd via eenvoudige voorbeelden.

Aan de TU Delft wordt ongeveer honderd uur voor dit vak uitgetrokken. Wie de stof in dit boek beheerst, is echter nog geen volleerd ontwerper van scheidingsprocessen. Wel is men dan in staat redelijke schattingen te maken van de stromen en hoeveelheden in gangbare processen. Daarnaast zal men ook apparatuur ruwweg kunnen dimensioneren.

Delft,  
januari 1990

J.A. Wesselingh  
H.H. Kleizen

## **Bij de tweede druk**

Een aantal fouten uit de eerste druk van dit boek, waarop studenten ons hebben gewezen, zijn aanleiding geweest voor diverse kleine en ingrijpender verbeteringen. Verder is de inleiding over stofoverdracht in het hoofdstuk Onwicht herschreven, nl. in termen van de wrijvings- of Maxwell-Stefan theorie. Deze theorie maakt het mogelijk om ook multi-component stofoverdracht consistent te behandelen. Dat is belangrijk voor de verdere ontwikkeling van het vak.

Groningen / Delft,  
januari 1992

J.A. Wesselingh  
H.H. Kleizen

# Inhoud

Voorwoord	5	
SYMBOLEN	9	
1	INLEIDING	11
	1.1. Een begin	11
	1.2. Een scheitrechter	14
	1.3. Eenheden	16
	1.4. Aspecten	18
	1.5. Samenvatting	19
2	EVENWICHT	20
	2.1. De extractie van koper	20
	2.2. Het drogen van aardgas	29
	2.3. Het wassen van polypropreen korrels	35
	2.4. Samenvatting	39
3	WARMTE	41
	3.1. Eenmaal verdampen en condenseren	41
	3.2. Een continue destillatie	46
	3.3. Een bestaande destillatiekolom	56
	3.4. Samenvatting	61
4	ONWICHT	62
	4.1. Vier modelementen	62
	4.2. Drie potjes	77
	4.3. Twee apparaten	86
	4.4. Een gepakte kolom	91
	4.5. Samenvatting	94
5	TIJD	96
	5.1. Sorptie van zwavelkoolstof	96
	5.2. Waterontharding door kationenwisseling	102
	5.3. Samenvatting	110

8	<i>Scheidingsprocessen</i>	
6	APPARATEN	112
	6.1. Mixer-settler	112
	6.2. Schotelkolom	115
	6.3. Gepakte kolom	119
	6.4. Samenvatting	123
7	ZEEWATERONTZILTING	124
	7.1. De opdracht	124
	7.2. Hyperfil	127
	7.3. Icecast engineering B.V.	131
	7.4. Comprima B.V.	134
	7.5. Atlas Multivap	137
	7.6. Conclusie	140
	7.7. Samenvatting	141
	7.8. Uitwerkingen van de rekenvoorbeelden	141
8	OVERZICHT	146
	BIJLAGEN	151
	<i>I. Evenwichtsrelaties</i>	153
	I.1. Ideale systemen	153
	I.2. Verdunde systemen	159
	I.3. Niet-ideale systemen	162
	Literatuur	166
	<i>II. Behoudswetten</i>	167
	II.1. De wet van behoud van massa	167
	II.2. De wet van behoud van energie	167
	II.3. De wet van behoud van mechanische energie	173
	<i>III. Stofoverdracht</i>	176
	<i>IV. Apparaatgegevens</i>	180
	UITWERKINGEN	186
	INDEX	217

# Symbolen\*

		<i>eenheid</i>
a	fasengrensvlak per eenheid van volume	$m^{-1}$
$A_h$	fasengrensvlak per eenheid van hoogte	m
A	fasengrensvlak	$m^2$
$\mathcal{A}$	apparaatoppervlak loodrecht op stromingsrichting	$m^2$
B	stroom bodemprodukt	mol/s
c	specifieke warmte	J/mol·K
d	karacteristieke diameter disperse fase	m
D	stroom destillaat	mol/s
$\mathcal{D}$	diameter apparaat	m
ID	diffusiecoëfficiënt	$m^2/s$
e	roervermogen per eenheid van massa dispersie	W/kg
f	fractie niet verwijderd materiaal	–
F	stroom voeding	mol/s
$F_p$	pakkingsfactor	$m^{-1}$
$\mathcal{F}$	fractie open gaten in schoteloppervlak	–
g	versnelling zwaartekracht	$m/s^2$
h	specifieke enthalpie	J/mol
$\Delta h_s$	smeltwarmte	J/mol
$\Delta h_v$	verdampingswarmte	J/mol
H	fasencontacthoogte in apparaat	m
$H_{ets}$	hoogte evenwichtstrap	m
$H_{tu}$	hoogte overdrachtstrap	m
J	flux	$mol/m^2 \cdot s$
$k_x, k_y$	stofoverdrachtcoëfficiënt	m/s
$k_{ox}, k_{oy}$	doorgangcoëfficiënt	m/s
K	verdelingscoëfficiënt	$\frac{(mol)_y(\sum mol)_L}{(mol)_x(\sum mol)_V}$
L	stroom of hoeveelheid te behandelen (vloeibare) fase	mol/s, mol
m	volumetrische verdelingscoëfficiënt	–
M	molaire massa	kg/mol
N	aantal trappen	–
$N_x, N_y$	overdrachtskental	–
$N_{ox}, N_{oy}$	doorgangskental	–
p	druk	Pa
$p_i^0$	dampspanning component i	Pa

\* Symbolen die weinig gebruikt worden zijn niet in deze lijst vermeld.

$p_i^*$	Henry-constante component i	Pa
$P$	vermogen	W
$q$	fractie vloeistof in voeding	–
$q'$	fractie voeding vloeibaar op voedingsschotel	–
$Q$	volumestroom	$m^3/s$
$Q$	warmtestroom	W
$R$	refluxverhouding	–
$R$	gas constante	J/mol·K
$S$	scheidingsfactor	–
$t$	tijd	s
$T$	temperatuur	K
$T_c$	kritische temperatuur	K
$V$	stroom of hoeveelheid noodzakelijke (gasvormige) hulpfase	mol/s, mol
$\mathcal{V}$	fasencontactvolume in apparaat	$m^3$
$x$	fractie van beschouwde component in L-fase	mol/( $\sum$ mol) <sub>L</sub>
$x_B, x_D, x_F$	fractie vluchtige component in beschouwde stroom	mol/( $\sum$ mol)
$y$	fractie van beschouwde component in V-fase	mol/( $\sum$ mol) <sub>V</sub>
$z$	lengte parameter loodrecht op doorstroomd oppervlak	m
$\gamma$	activiteitscoëfficiënt	–
$\delta$	filmdikte	m
$\varepsilon$	volumefractie disperse fase	–
$\eta$	rendement	–
$\eta_{mv}$	Murphree rendement	–
$\mu$	chemische potentiaal	J/mol
$\rho$	dichtheid	mol/ $m^3$
$\rho_x x, \rho_y y$	concentratie	mol/ $m^3$
$\tau$	verblijftijd: verhouding van volume en volumestroom	s



# 1

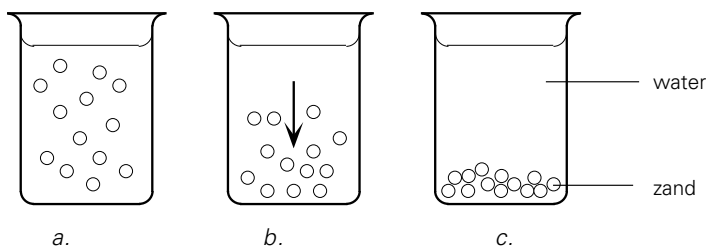
## Inleiding

### 1.1. Een begin

Om te zien dat de hele wereld uit scheidingsprocessen bestaat hoeft men alleen de goede bril op te zetten. Een schaar scheidt haar van het hoofd; kokend water scheidt thee uit het theezakje. Dit boek gaat echter niet over de hele wereld, maar over de scheidingsprocessen die in de techniek worden toegepast.

Als twee stoffen gescheiden worden moeten ze verschillende kanten op gaan. Als de ene stilstaat of rechtdoor gaat, moet de andere naar boven of naar beneden, naar links of naar rechts. Daarvoor moeten er op die stoffen verschillende krachten werken. Twee belangrijke oorzaken van die krachten zijn het zwaartekrachtveld en het chemische potentiaalveld. U kent die velden allebei: ook het tweede!

Als een bekersglas met water en deeltjes (zeg: fijn zand) wordt gevuld, dan zakken de deeltjes uit tot ze op de bodem liggen (zie figuur 1.1). Dat gebeurt door de zwaartekracht, of duurdur gezegd, door ‘verschillen in de zwaartekrachtspotentiaal’. De scheiding is echter niet volledig.

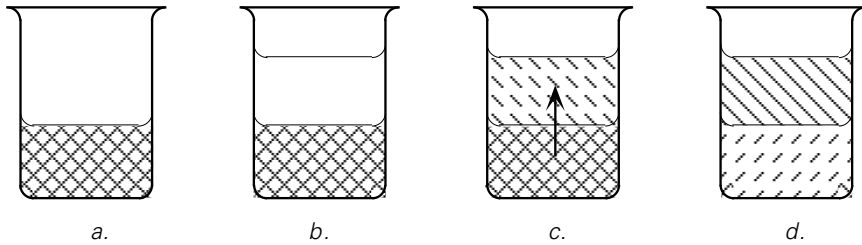


*Figuur 1.1. Scheiding van water en zand door het zwaartekrachtveld; a. zand in water dispersie, b. uitzakken zanddeeltjes, c. evenwicht tussen zand- en waterfase.*

Als een laag water met opgelost fenol in een bekersglas wordt gebracht, dan zakt het fenol niet uit (figuur 1.2). Het effect van de zwaartekracht op de uiterst kleine moleculen is te gering. Brengen wij nu voorzichtig een laag van een oplosmiddel (bijvoorbeeld benzeen) daar bovenop, dan trekt het fenol langzaam uit het water in het benzeen. Dat komt door verschillen in de chemische potentiaal van fenol in water en in benzeen.

De chemische potentiaal van een stof hangt af van het oplosmiddel, maar ook van zijn concentratie. Hij is hoog als de opgeloste stof en het oplosmiddel elkaar ‘niet lusten’. Dat is bijvoorbeeld zo bij fenol en water, die een sterk verschillende chemische

structuur hebben. De chemische potentiaal is hoog bij hoge concentraties en laag bij lage concentraties. In het bekglas is eerst de potentiaal van fenol in het water hoog. Daarom beweegt het naar het benzeen. De concentratie in het water daalt en die in het benzeen stijgt. Op den duur worden de potentialen in beide vloeistoffen gelijk en houdt het transport op. De concentratie fenol in het benzeen is dan wel een stuk hoger dan in het water, maar de scheiding is weer niet volledig.



*Figuur 1.2. Scheiding van fenol uit water met behulp van benzeen door het chemische potentiaalveld; a. water en fenol, b. toevoegen van benzeen, c. fenol transport naar benzeenfase, d. fenolevenwicht tussen benzeen- en waterfase.*

In deze voorbeelden werden de te scheiden stoffen in één lading of ‘batch’ bij elkaar gebracht. Dat kan handig zijn bij kleine hoeveelheden, maar bij grote hoeveelheden laten wij de stoffen liever door de apparatuur stromen. Zo’n ‘continue operatie’ is technisch veel handiger. Daarbij kunnen de twee stromen dezelfde kant op bewegen (*meestroom*, figuur 1.3a) of tegen elkaar in (*tegenstroom*, figuur 1.3b). In de meeste gevallen is tegenstroom beter. Waarom dat zo is wordt uitgelegd in hoofdstuk 2.

Naast ‘batch’ en ‘continue’ operatie kennen wij ook ‘semi-batch’ batch-operatie. Daarbij stroomt slechts één van de twee fasen door het apparaat. Een voorbeeld is een bezinkbak waarin de vaste deeltjes blijven liggen tot hij vol is. Bij semi-batch operaties veranderen de omstandigheden in de apparatuur ook in de tijd. Daarom is het rekenen aan dergelijke apparatuur lastig.

Deze paragraaf beëindigen wij met twee eenvoudige vraagstukken. Het is in het algemeen de bedoeling dat u de vraagstukken eerst probeert op te lossen voordat u doorleest. Uitwerkingen van de vraagstukken staan achterin.

**Vraag 1.1.** *De beweging van de deeltjes in het bekglas wordt niet alleen door het zwaartekrachtveld bepaald, maar ook door het drukveld. De zwaartekracht is:*

$$-(\text{deeltjesvolume}) \times \rho_d g.$$

*(Het minteken duidt aan dat de zwaartekracht omlaag gericht is.  $\rho_d$  is de deeltjesdichtheid). De drukkracht is:*

$$(\text{deeltjesvolume}) \times (-\text{drukgradiënt}).$$

# 2

## Evenwicht

In dit hoofdstuk worden enkele voorbeelden uitgewerkt van continue processen waarin druk en temperatuur niet of weinig veranderen. Voor de over te dragen component is dan vrij makkelijk aan te geven hoe deze zich bij evenwicht over de twee fasen verdeelt. De twee fasen worden een aantal keren met elkaar in contact gebracht, en daarbij wordt aangenomen dat zij steeds met elkaar in evenwicht komen. De stofoverdracht in de apparatuur is dan op soortgelijke wijze als bij de scheitrechter in paragraaf 1.2 te berekenen.

Wij zullen drie voorbeelden bekijken:

- de scheiding van koper uit opgelost erts;
- de scheiding van waterdamp en aardgas;
- de scheiding van laag en hoog molecuulair polypropreen.

De basis van de berekeningsmethode is steeds hetzelfde: een combinatie van stofbalansen en evenwichtsrelaties. De drie problemen worden wel op verschillende manieren uitgewerkt: numeriek, met een grafiek en met een formule.

### 2.1. De extractie van koper

Hoogwaardig kopererts wordt steeds schaarser. Wel zijn er in Zambia enorme bergen laagwaardig erts overgebleven van vroegere mijnbouw en is het momenteel economisch om deze te verwerken. Dat erts bevat slechts 0,1 à 0,2% koper, dat wordt gewonnen door een reeks van scheidingsprocessen, schematisch weergegeven in figuur 2.1.

Het fijn gemalen erts wordt ontsloten (a) met een verdunde oplossing van zwavelzuur in water. Het grootste deel van het koper lost op, naast enkele ongewenste stoffen. Uit deze oplossing wordt vervolgens het koper geëxtraheerd (b) met een organisch oplosmiddel waarin de koperionen omkeerbaar worden gebonden. Water en de andere stoffen zijn niet of nauwelijks oplosbaar in het oplosmiddel; het is dus *selectief* voor koper. Het koper is heel goed oplosbaar in meer geconcentreerd zwavelzuur, waar gebruik van wordt gemaakt in de terugwinning (c). Uit deze sterk geconcentreerde oplossing wordt het koper zuiver afgescheiden door elektrolyse (d).

Deze scheidingsfabriek is een typisch voorbeeld van een aantal *kringloop*processen, die bij scheidingen met een hulpfase zeer gebruikelijk zijn. Wij beperken ons hier tot de kringloop van extractie en terugwinning; het ontsluiten en de elektrolyse blijven buiten beschouwing.