

Massa-oordrag in sproeikolomme

2. Die sisteem benseen/wasolie

A.J. Rautenbach en G. Kornelius
Dept Chemiese Ingenieurswese, Universiteit van Pretoria

Ontvang 16 Junie 1988; aanvaar 20 Maart 1989

UITTREKSEL

Die gebruik van sproeikolomme om kontak tussen 'n gas- en vloeistoffase te bewerkstellig, is algemeen weens die voordele wat die metode inhou i.t.v. groot massa-oordragarea per eenheid volume en lae gaskantweerstand. Vir 'n verskeidenheid sisteme is massa-oordragparameters egter nie beskikbaar nie en word daarom eksperimenteel verkry vir o.a. die sisteem benseen/wasolie. Die eksperimentele tegniek en ontwerp wat gebruik is, word beskryf. Die variasie in massa-oordragkoëffisiënt as funksie van gasvloeitempo, kolomhoogte en vloeistofvloeitempo stem ooreen met gepubliseerde resultate van ander navorsers.

ABSTRACT

Mass transfer parameters in spray columns 2. The system benzene-wash oil

Spray columns are widely used in industry as a gas-liquid contacting apparatus because of the advantages of a high transfer area per unit volume and the low gas side resistance. For a large number of systems, mass transfer parameters are not available and an experimental determination for the system benzene/wash oil was therefore carried out. The experimental technique and design are described. The variation in mass transfer coefficient as function of gas flow rate, liquid flow rate and column height agrees with those published elsewhere.

NOMENKLATUUR

a	= oordragoppervlak per eenheid volume	m^{-1}
C _i	= konsentrasie van benseen in wasolie by intervlak	$kmol\ m^{-3}$
C _l	= konsentrasie van benseen in wasolie by vloeistofmassa	$kmol\ m^{-3}$
G	= gasvloeitempo	m^3h^{-1}
H	= kolomhoogte	m
K _g	= totale massa-oordragkoëffisiënt gebaseer op gaskant	$kg\ m^{-2}s^{-1}Pa^{-1}$
K _{ga}	= massa-oordragtempo per eenheid parsiele drukverskil	$kg\ s^{-1}m^{-3}Pa^{-1}$
K _l	= totale massa-oordragkoëffisiënt gebaseer op die vloeistofkant	$kg\ m^{-2}s^{-1}/kgm^{-3}$
L	= vloeistofdruk voor spuitstuk	kPa
p _g	= parsiele druk van benseen in lugmassa	kPa
p _i	= parsiele druk van benseen by intervlak	kPa
P	= druk voor spuitstuk	kPa
Q	= vloeistofvloeitempo deur spuitstuk	m^3s^{-1}
S, V	= kolomvolume	m^3
W/θ	= massa-oordragtempo	$kg\ s^{-1}$

pelgrootteverspreiding en sodoende massa-oordragarea per eenheid volume vir verskillende bedryfstoeestande verkry is, is eksperimente uitgevoer om massa-oordragkoëffisiënte vir die sisteem te verkry d.m.v. 'n 2-faktoriaal eksperiment-ontwerptegniek.

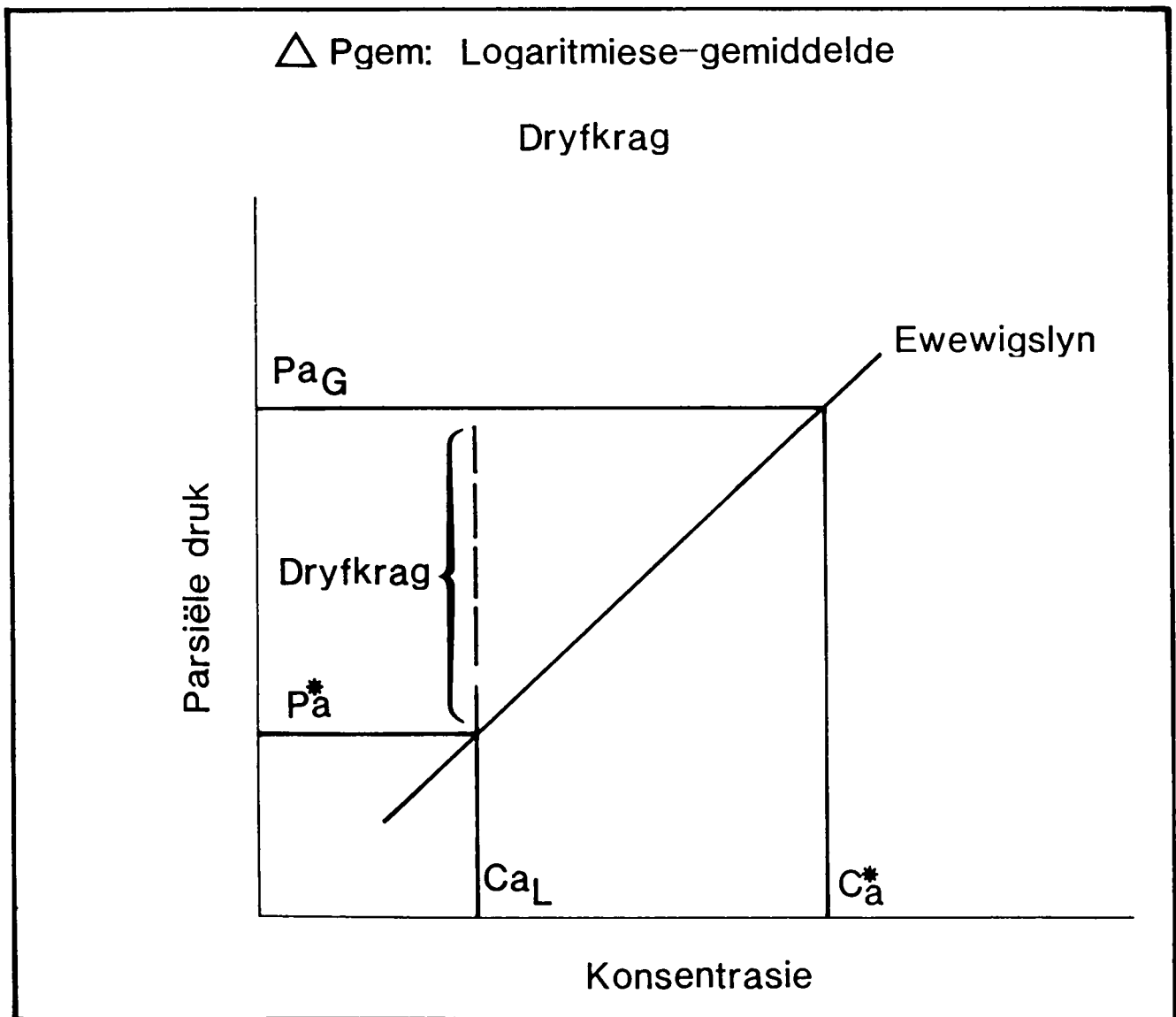
LITERATUUROORSIG

Massa-oordrag na enkele vallende druppels is goed bestudeer. Alhoewel die uitgebreide data handig is om meer te wete te kom van massa-oordrag in 'n sproei, kan massa-oordragtempo's vir 'n sproeistuk nie hieruit bereken word nie. Die meeste van die werk op individuele druppels is gedoen deur die druppels deur kort absorpsiebuis wat 'n stagnante of stadig bewegende gas bevat, te laat val. Data i.v.m. druppelgrootteverspreiding uit sproeistukke en die afhanklikheid daarvan van bedryfsveranderlikes word egter benodig vir ontwerpdoeleindes.

Die invloed van verskillende tipes sproeistukke, gastempo's, vloeistofvloeitempo's en kolomhoogtes op massa-oordrag is ook reeds bestudeer. Verskillende sisteme word gebruik en data is nog ver van volledig, selfs vir die meer algemene gase soos swaeldioksied en ammoniak. Die werking van die sproeistuk, die druppelgrootteverspreiding wat verkry word, die gemiddelde deursnee van die druppels en die toepassing is redelik volledig beskryf.^{1,13,14} 'n Tekortkoming is egter dat baie van die data in die afwesigheid van 'n teen- of saamstromende gas bepaal is. 'n Teenstromende gas verander die oordragarea en die druppelverspreiding. Dit is moeilik om druppelkarakteristieke onder sulke toestande te bepaal, omdat gesofistikeerde apparaat benodig word. Verskeie navorsers¹⁶⁻²² het wel sulke werk aangepak. Resultate en vergelykings van oordragarea is

INLEIDING

Elders is die voordele van sproeikolomme vir gebruik in absorpsietoerusting bespreek en eksperimentele data vir die druppelgrootteverspreiding gegee.²⁹ Nadat drup-



FIGUUR 1: Log-gemiddelde dryfkrag.

Verklaring van simbole

P_{aG} Werklike parsiële druk

P_{aG}^* Parsiële druk ooreenstemmend met werklike vloeistofkonsentrasie

Ca_L Werklike vloeistofkonsentrasie

Ca_L^* Vloeistofkonsentrasie ooreenstemmend met werklike parsiële druk

$$(\Delta)_{gem} = \frac{\Delta P_{ingang} - \Delta P_{uitgang}}{\log \frac{\Delta P_{ingang}}{\Delta P_{uitgang}}}$$

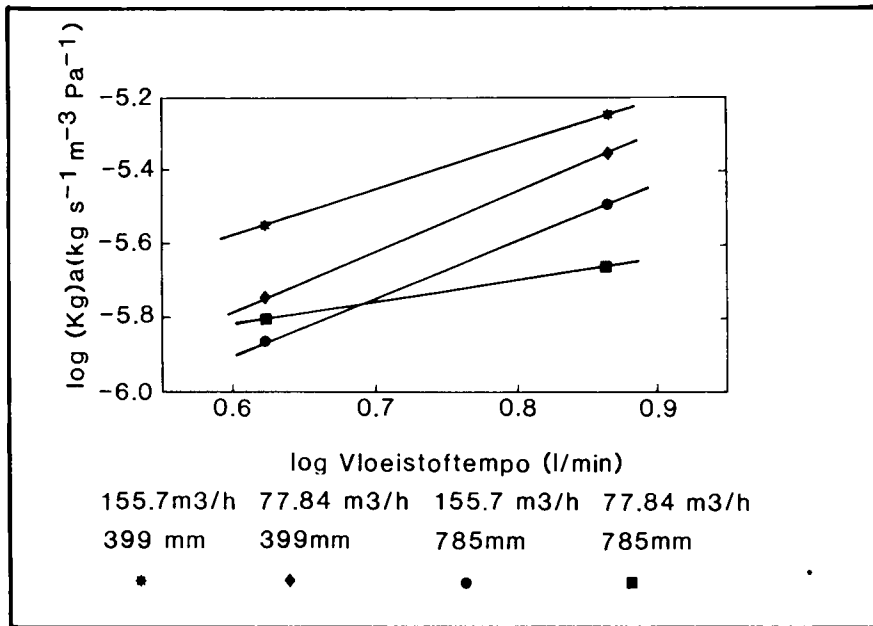
of empiries van aard of is deur wiskundige manipulasie bepaal. Verder bestaan redelik volledige data oor massa-oordragmodelle en hul toepassings.^{2,3,4,5} Data oor die parameters wat in hierdie besondere sisteem nodig is om massa-oordrag te voorspel, was egter nie beskikbaar nie en moes eksperimenteel verkry word.

Eksperimentele opstelling

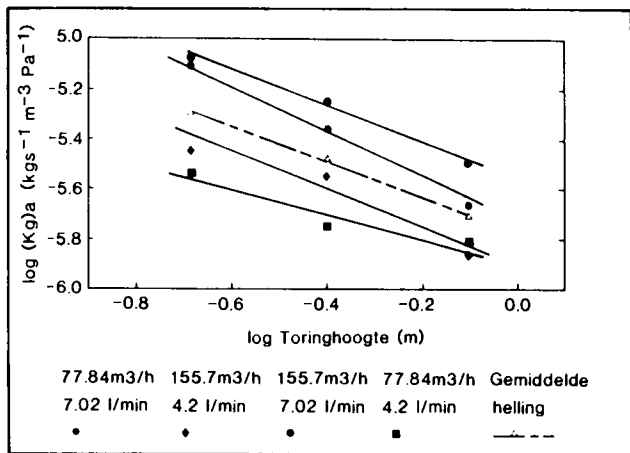
Die opstelling is reeds elders beskryf.²⁹ Benseen is by die lug gevoeg waar die verhitte lug die hitteuiler verlaat. Die benseen is m.b.v. 'n atomiseersproeistuk (1/4J; Spraying Systems Co) in die lug gesproei. Die benseenvloeitempo is m.b.v. 'n rotameter en klep op die verlangde vloeitempo beheer. (Kalibrasiekrommes is vooraf bepaal.)

EKSPERIMENTELE PROSEDURE

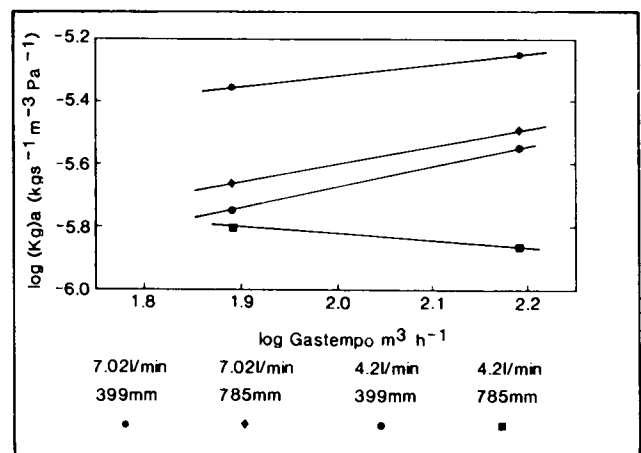
Die verlangde lengte kolom is opgestel, die verhitingslus vir die olie aangeskakel en 45 minute gelaat vir die olie om 32°C te bereik. Die gas- en benseensisteme is vervolgens aangeskakel. Uit retensiydberekeninge het geblyk dat gestadigde toestande na een minuut bereik is. Vyf minute is daarom telkens gelaat voordat monsterneming begin het. Gasvloeitempo, vloeistof-druk en benseenvloeitempo is genoteer. Monsters van die in- en uitlaatgas is geneem en m.b.v. 'n gaschromatograaf geanaliseer. Die proses is herhaal vir elke stel waardes van die veranderlikes. Slegs ongebruikte olie is gebruik vir die bepaling van die massa-oordragskoeffisiënte.



FIGUUR 2: Massa-oordragkoeffisiënt as funksie van vloeistof tempo.



FIGUUR 3: Massa-oordragkoeffisiënt as funksie van toringhoogte.



FIGUUR 4: Massa-oordragkoeffisiënt as funksie van gastempo.

TOEGEPASTE MODEL

Die massa oordra per eenheid tyd en volume word gegee deur

$$\frac{dw}{Sde} = K_g(p_g - p_i) = K_l(c_i - c)$$

Na integrasie:¹⁰

$$W/\theta = K_g a V(\Delta P)_{gem}$$

waar ΔP_{gem} die logaritmiess-gemiddelde dryfkrag vir massa-oordrag is. Dit word verkry uit die verskil tussen die parsiele druk van benseen in die gas- en vloeistoffase by die kolomingang en -uitgang soos getoon in fig. 1.

RESULTATE EN BESPREKING

Bepaling van die beherende fase

Die gasfase is aanvaar as die beherende fase vir

massa-oordrag. Dit word bevestig deur ander navorsers.^{10,12} 'n Breedvoerige uiteensetting vir 'n tipiese sisteem soos in die ondersoek word ook in Foust³ gegee.

Drukval oor spuitstukke

Druppelgrootte neem af met die drukval oor die spuitstukke. Volgens basiese spuitstukteorie bestaan daar 'n verband van die vorm $Q = b(P)^{0.5}$ tussen die vloeitempo deur 'n spuitstuk en die drukval daarvoor.²⁸

In die werk is van standaard soliede koniese sproei-stukke gebruik gemaak. Kalibrasie het die volgende gelever:

Druk (kPa)	100	150	200	300
Vloeitempo (l/min)	1,4	:1,73	:2,0	:2, 3 4

Daar is gevind dat die gaskantdrukval slegs met 0,15% varieer vir die reeks gastempo's ondersoek. In

TABEL 1

Reël	Loopnommer	Vloeistof tempo $\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	Gastempo $\text{m}^3 \cdot \text{uur}^{-1}$	Totale toringhoogte	Massa benseen oorgedra $\text{kg} \cdot \text{uur}^{-1}$	Uitlaatfraksie (massa/massa)	K _a $\text{kgm}^{-3} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$
1	1	7,02	77,84	0,785	1,1236	0,27	2,171
	6	7,02	"	"	1,6198	0,38	3,999
2	2	4,2	155,67	0,785	0,9151	0,36	1,39
	4	4,2	"	"	0,8881	0,35	1,342
3	3	4,2	77,84	0,785	0,9691	0,38	1,809
	9	4,2	"	"	0,7801	0,31	1,354
4	5	7,02	155,67	0,785	1,8457	0,43	3,224
	7	7,02	"	"	1,8457	0,43	3,224
5	13	4,2	77,84	0,399	0,9151	0,36	3,288
	17	4,2	"	"	0,5644	0,23	1,787
6	14	4,2	155,67	0,399	0,8881	0,35	2,639
	16	4,2	"	"	0,9961	0,39	3,020
7	15	7,02	155,67	0,399	1,8005	0,42	6,134
	20	7,02	"	"	1,5747	0,37	5,144
8	18	7,02	77,84	0,399	1,1236	0,27	4,271
	21	7,02	"	"	1,1687	0,28	4,528
9	8	4,2	77,84	0,206	0,4837	0,20	2,888
	10	7,02	"	"	1,6786	0,26	7,790
10	11	4,2	155,67	0,206	0,6453	0,26	3,558
	12	7,02	"	"	1,3490	0,32	8,204
11	MP1	6,03	110	0,592	1,2750	0,35	2,90
	MP3	6,03	"	"	1,3526	0,37	3,140

- Notas: (i) Lopies in die eerste 8 reëls verteenwoordig die eksperimentele toestande benodig vir die 2-faktoriaalontwerp. Elke lopie is ewekansig gedupliseer. Lopie 6 is dus die duplikaat van lopie 1, ens.
(ii) Lopies in die 9de en 10de reël is addisionele eksperimente uitgevoer om data vir baie kort kolomme te verkry.
(iii) Lopies MP1 en MP3 is die eksperimente op die middelwaardes van elke veranderlike soos deur die faktoriaalontwerp vereis.

verdere berekening is gaskantdrukval as konstant aanvaar.

Wandeffekte

Die effek is elders deeglik bestudeer.^{10,21,24} Metha & Sharma⁸ ondersoek sowel die wandvloeistof as die sentrale spoei. Hulle vind dat wandeffekte weglaatbaar is en tot konserwatiewe ontwerpwaardes lei.

In die werk is wandeffekte geïgnoreer. Druppels uit die sentrale gasvolume is toegelaat om met die wandvloeistof te meng waarna 'n monster vir analise geneem is.

Terugmenging

Slegs by baie lae gastempo's, hoë vloeistof tempo's en baie fyn druppels (< 50 mikron) kan terugmenging van die gas wel 'n invloed hê. Metha & Sharma⁸ vind egter kwantitatief dat die effektiewe oordragsarea vir praktiese doeleindes nie deur terugmenging geraak word nie.

Vloeistof tempo

Die vloeistof tempo word bepaal deur die drukval oor die spoeistuk. Die oordragsarea neem toe met toenemende vloeistof druk, hoofsaaklik a.g.v. groter oppervlakarea en die hoër snelheid van die druppels.⁸⁻¹³

Dit kan egter wees dat die oordragsarea 'n konstante waarde bereik of deur 'n maksimum gaan m.b.t. die vloeistof tempo. Die voordeel van die fyner druppels en die hoër druppelsnelhede by hoër vloeistof tempo's word teengewerk deur toenemende koagulasie en botsings tussen die druppels. Uit die huidige ondersoek kan nie 'n voorspelling gemaak word of die oordragsarea deur 'n maksimum gaan al dan nie. Vloeistofvloeitempo's is m.b.v. die faktoriaaltegniek op 3 vlakke gevarieer, nl. 4,2, 6,03 en 7,02 l/min, waarvan 6,03 l/min die ontwerpvlak is. Die faktoriaaltegniek is elders volledig beskryf.^{25,26}

Figuur 2 dui die massa-oordragkoeffisiënt (K_a) as funksie van vloeistofvloeitempo aan. Uit die figuur blyk dit dat groter vloeistofvloeitempo's tot groter K_a -waardes lei. Daar moet egter op gewys word dat aangesien 'n faktoriaaltegniek gebruik is, onvoldoende datapunte gegenereer is vir deeglike passing van grafieke. Grafieke kan slegs as 'n aanduiding van die effek van die veranderlike op K_a gebruik word.

'n Gemiddelde helling van 1,3 is verkry. Hixon & Scott verkry 'n helling van 0,9 vir benseenabsorpsie in wasolie. Bonilla *et al.*¹¹ verkry 'n helling van 0,8 vir benatting van lug. Metha & Sharma⁸ verkry 'n helling wat wissel vanaf 0,47-0,93 vir absorpsie van ammonia, koolstofdiksied en swaeldiksied. Redelike ooreenstemming met ander navorsers is dus verkry.

Gasvloeiempo's

Die gasvloeiempo het 'n groot effek op die relatiewe snelheid, die interne sirkulasie en die vryval-snelheid van die druppels. Dit het ook 'n invloed op die druppelverspreiding, omdat dit neig om groter druppels op te breek en kleiner druppels te laat koaguleer.

Gasvloeiempo's is ook op drie vlakke gevarieer, nl. 77,84; 155,67 en 110 h³/m (sien tabel 1). Uit figuur 4 blyk dat groter gastempo's tot groter massa-oordragtempo's lei. Omdat weer eens slegs 2 datapunte m.b.v. die faktoriaaltegniek verkry is, kan slegs benaderd uitspraak oor die effek van die veranderlike gegee word. Die feit dat die grafiek vir 'n hoogte van 785 mm en vloeistoftempo van 4,2 l/min 'n negatiewe helling het, kan slegs toegeskryf word aan onvoldoende data. Die algemene neiging van groter K_ga-waardes vir groter gastempo's is in ooreenstemming met ander navorsers.⁸⁻¹¹

'n Gemiddelde helling van 0,54 word verkry (negatiewe helling nie in ag geneem nie). Metha & Sharma vind ook 'n helling van 0,54. Bonilla¹¹ verkry 'n gemiddelde waarde van 0,68 vir die effek op K_ga. Goeie ooreenstemming met ander navorsers is dus verkry.

Toringhoogte

Figuur 3 dui K_ga teen die toringhoogte aan by verskillende vloeistof- en gastempo's. Dit blyk dat vir ander toringhoogtes laer massa-oordragkoëffisiënte verkry word.

'n Gemiddelde helling van -0,61 is gevind. Akkuraatheid is nie voldoende om twee desimale te regverdig nie, sodat -0,6 aanvaar word. Hixson & Scott¹⁰ verkry 'n helling van -0,5; Metha & Sharma⁸ verkry 'n helling van -0,38. Bonilla¹¹ verkry 'n helling van -1,03 wat hoër is as ander navorsers se waardes. Die waardes in die huidige ondersoek verkry is dus in redelike ooreenstemming met ander navorsers se waardes. Dit moet in gedagte gehou word dat die sisteme deur navorsers gebruik, baie varieer en die verskille dus aanvaarbaar is.

Massa-oordragkoëffisiënte

Tabel 1 bevat die waardes van die massa-oordragkoëffisiënte vir die sisteem soos bepaal deur middel van benseenanalises op die in- en uitlaatwasolie.

Vir berekening van die massa benseen oorgedra, die vloeistof- en gas in- en uitlaatfraksies, log-gemiddelde dryfkragwaardes, massa-oordragkoëffisiënte, ens. is 'n rekenaarprogram geskryf vir 'n SHARP PC1211. Die inlaatfraksie van die wasolie van lope 6 en 13 het nie ooreengestem met dié van skoon wasolie nie en die lope is vir die stip van die grafieke en statistiese evaluasie van data buite rekening gelaat.

Uit die tabel blyk dat die grootste hoeveelheid benseen by 'n hoë vloeistoftempo oorgedra word. Die maksimum hoeveelheid benseen oorgedra is by lope 5 en 7 bereik. (Kyk figuur 4, tabel 1.)

MODEL

'n 2-Faktoriaal ontwerp-tegniek is op die proses toegepas vanweë die lineêre eienskappe van die sisteem. Vir volledige ontwerpmetode sien^{6,25,26}. Die totale massa-oordragkoëffisiënt word met 'n 95% vertrouensinterval gegee deur:

$$K_g a = 2,003 \times 10^{-6} (-0,06 - 0,1192H + 0,005G + 0,0106L - 0,00964LH)$$

met K_ga in kg s⁻¹ m⁻³ Pa⁻¹

Waardes van K_ga wissel van (1,342-8,204) × 10⁻⁶ by die eksperimentele toestande.

Uit die analise het geblyk dat tweede- en derde-orde interaksies weglaatbaar is, behalwe vir die gesamentlike effek van vloeistoftempo en toringhoogte. Dit dui daarop dat die sisteem relatief lineêr is wat een van die voorwaardes vir die gebruik van die (2)k-faktoriaalmodel is. Dit moet in gedagte gehou word dat die model slegs 'n 95%-vertrouensinterval binne die grense van die waardes van die veranderlikes ondersoek weergee. Ekstrapolasie van die model kan tot foutiewe waardes lei. By hoë waardes kan die lineêre karakter van die model afneem en tweede- en derde-orde interaksies begin domineer. 'n Hoër orde model sal dan gepas moet word.²⁵

Vanweë die aard van die faktoriaaltegniek is vergelyking met ander navorsers moeilik en is die volgende model benaderd vir vergelykingsdoeleindes verkry

$$K_g a = \text{konst } L^{1,3} H^{-0,6} G^{0,54}$$

SAMEVATTING

Die effek van die gasvloeiempo, vloeistoftempo en kolomhoogte is as volg:

1. K_ga neem af met kolomhoogte
2. K_ga neem toe met vloeistofvoertempo
3. K_ga neem toe met gastoevoertempo

Dit is moontlik dat die gekombineerde effek van die gastempo, vloeistoftempo en kolomhoogte tot maksimumwaardes vir K_ga kan lei. Sodanige waardes is nie in die ondersoek verkry nie.

Die grootste massa benseen, nl. 8,92 kg h⁻¹ m⁻³, is oorgedra by 'n hoë wasolie- en gastoevoertempo.

Oordraging van olie uit die kolom was weglaatbaar in die betrokke studie. Probleme met oordraging by te groot gasvoertempo's kan egter resulteer.

Uit die voorgestelde model blyk dit dat die effek van die gasvloeiempo onafhanklik van die kolomhoogte, vloeistoftempo en waarskynlik die fisiese eienskappe van die sisteem is.

LITERATUURVERWYSINGS

1. Masters, K. (1960). *Spray drying*. (Halsted Press, New York).
2. Sherwood, T.K. et al. (1975). *Mass transfer*. (McGraw-Hill, New York).
3. Foust, A.S. et al. (1960). *Principles of Unit Operations*. (Wiley, New York).
4. Eckert, E.R.G. et al. (1963). *Heat and Mass Transfer* (McGraw-Hill, New York).

5. Treybal, R.E. (1968). *Mass Transfer Operations 2nd ed.* (McGraw-Hill, New York).
6. Walpole, R.E. (1978). *Probability and Statistics for Engineers and Scientists* (Collier MacMillan, London).
7. Allen, T. (1981). *Particle Size Measurement* (Chapman and Hall, New York).
8. Mehta, K.C. & Sharma, M.M. (1970). Mass transfer in spray columns, *Brit. Chem. Eng.*, 15(11), 1440.
9. Murty, K.N. (1981). Quick estimate of spray-nozzle mean drop size, *Chem. Engng.*, 88, 15, p 96-98.
10. Hixson, A.W. & Scott, C.E. (1935). Absorption of gases in spray towers, *Ind. & Eng. Chem.*, 27(3), 307.
11. Bonilla, C.F. *et al.* (1942). Air humidification coefficients in spray towers, *Ind. & Eng. Chem.*, 42(12), 2521.
12. Long, G.E. (1978). Spraying theory and practice, *Chem. Engng.*, 85(6), p 73-84.
13. Fraser, R.P. *et al.* (1957). Liquid atomization in chemical engineering. Part 3: Pressure nozzles, *Brit. Chem. Eng.*, 2, 536.
14. Fraser, R.P. & Eisenklam, P. (1956). Liquid atomization and the drop size of sprays, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 34, 294.
15. Rothe, P.H. & Block, J.A. (1977). Aerodynamic behaviour of liquid sprays. *Int. J. Multiphase Flow*, 3, 263.
16. Damon, K.G. *et al.* (1966). A simple technique for photographing liquid drops. *Ch. Eng. Sci.*, 21, 813.
17. Dombrowski, N. *et al.* (1971). Measurement of the surface-volume mean diameter of sprays. *Aerosol Sci.*, 2, 405.
18. Buchanan, J.E. (1971). Axial dispersion and back mixing in packed columns in gas-liquid operation, *AIChE. J.*, 17(3), 746.
19. Harriot, P. (1962). A review of mass transfer to interfaces, *Can. J. Chem. Eng.*, 40, 60.
20. Janerus, I. *et al.* (1973). A technique for measuring drop size distributions for sprays and tests with two oil nozzles, *J. Inst. Fuel*.
21. Johnstone, H.F. & Silcox, H.E. (1947). Gas absorption and humidification in cyclone spray towers, *Ind. & Eng. Chem.*, 39(7), 808.
22. Reddy, K.V.S. *et al.* (1969). Stereophotogrammetry in particle-flow investigations, *Can. J. Ch. Eng.*, 47, 85.
23. Sada, E. *et al.* (1978). Drop size distribution for spray by full cone nozzle, *Can. J. Ch. Eng.*, 56, 455.
24. Pigford, R.L. & Pyle, C. (1951). *Ind. Eng. Chem.*, 43, 1649.
25. Myers, R.H. (1971). *Response Surface Methodology* (Allyn & Bacon, Boston).
26. Box, G.E.P. *et al.* (1961). The 2^{k-p} fractional factorial design, *Technometrics*, 3, 333.
27. Engel, F.E. (1968). *Photography for the scientist* (Academic Press, New York).
28. Streeter, V.L. (1966). *Fluid mechanics*. (McGraw-Hill, New York).
29. Rautenbach, A.J. & Kornelius, G. (1989). Massa-oordrag in sproeikolomme. 1. Druppelgrootte en -verspreiding, *S. Afr Tydskr. Natuurwet. en Tegnol.*, 8(2), 56.

Die Akademie bedank die Universiteit van Pretoria wat hierdie artikel geborg het.