



Parameter Interaksi Biner Kesetimbangan Uap-Cair Campuran Alkohol untuk Optimasi Proses Pemurnian Bioetanol

Asalil Mustain^{1, ✉}, Anang Takwanto¹, Dhoni Hartanto²

DOI 10.15294/jbat.v4i2.5126

¹Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

²Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, Kampus Sekaran Gunung Pati, Semarang 50229, Indonesia

Article Info

Sejarah Artikel:

Diterima Oktober 2016
Disetujui November 2016
Dipublikasikan Desember 2016

Keywords :

Bioetanol, desain, kesetimbangan uap-cair, parameter interaksi biner, pemurnian

Abstrak

Pada penelitian ini, parameter interaksi biner kesetimbangan uap-cair campuran alkohol primer (metanol, etanol, 1-propanol atau 1-butanol) dengan alkohol rantai C5 telah ditentukan. Total 15 sistem yang terdiri dari kesetimbangan uap-cair kondisi isobarik pada tekanan atmosfer telah dipilih. Parameter interaksi biner di-tentukan sebagai fungsi suhu dengan mengkorelasikan data kesetimbangan uap-cair yang dipilih tersebut menggunakan model koefisien aktifitas Wilson, Non-Random Two-Liquid (NRTL), dan Universal Quasi-Chemical (UNIQUAC). Parameter interaksi biner dideskripsikan sebagai fungsi suhu untuk meningkatkan kemampuan parameter tersebut dalam aplikasi pada kisaran suhu yang panjang. Korelasi menunjukkan hasil yang baik dikarenakan root mean square deviation (RMSD) antara hasil perhitungan dan data eksperimental relatif kecil. Parameter yang diperoleh sangat berguna untuk optimasi kolom distilasi dalam proses pemurnian bioetanol.

Abstract

In this work, the binary interaction parameters of vapor-liquid equilibrium for the mixtures of primary alcohols (methanol, ethanol, 1-propanol or 1-butanol) with C5 alcohols were obtained. A total of 15 systems that consisted of isobaric vapor-liquid equilibrium data at atmospheric pressure were selected. The binary interaction parameters were determined as temperature function by correlating the selected vapor-liquid equilibrium data using the Wilson, Non-Random Two-Liquid (NRTL) and Universal Quasi-Chemical (UNIQUAC) activity coefficient models. The binary interaction parameters were described as the temperature-dependent to increase the capability of the parameters for the application in wide range of temperature. The correlation showed good results because the root mean square deviation (RMSD) between the calculation values and experimental data were relatively low. The obtained parameters were very useful for optimizing the distillation column in the bio-ethanol purification process.

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang mempunyai potensi sumber daya alam terbarukan yang sangat melimpah. Sumber daya alam tersebut bisa diolah menjadi bahan yang mempunyai nilai tambah lebih tinggi seperti *biofuel* sebagai alternatif untuk pengganti bahan bakar fosil. Dalam beberapa tahun terakhir ini, *biofuel* berupaya diproduksi dalam jumlah yang besar. Salah satu jenis *biofuel* yang dijadikan bahan bakar alternatif adalah bioetanol. Pada umumnya, bioetanol diproduksi secara fermentasi dari berbagai jenis bahan alam seperti tebu (Cardona, dkk., 2010), jagung (Nikolić, dkk., 2009), jerami gandum (Talebnia, dkk., 2010), bakau (Saravanakumar, dkk., 2013) dan alga (Li, dkk., 2014).

Hasil fermentasi produksi bioetanol ini biasanya terdiri dari campuran alkohol rantai C1 sampai C5 (Dias, dkk., 2014). Produk hasil fermentasi tersebut perlu dilakukan proses pemisahan sehingga didapatkan produk bioetanol dengan kemurnian yang tinggi. Proses pemisahan yang umum digunakan dalam industri adalah metode distilasi. Metode distilasi dipilih karena memiliki keuntungan yaitu dapat menghasilkan produk dengan kemurnian yang tinggi. Pada proses pemurnian bioetanol ini, minyak fusel juga dihasilkan selama proses distilasi dapat dimanfaatkan

sebagai bahan baku untuk kepentingan industri lain. Pemanfaatan minyak fusel ini diharapkan mampu memaksimalkan keuntungan pabrik bioetanol dengan menggunakan metode fermentasi (Duran, dkk., 2013).

Dalam mendesain kolom distilasi (seperti tinggi kolom dan jumlah *tray*) diperlukan data kesetimbangan uap-cair yang akurat. Beberapa data kesetimbangan uap-cair sistem biner campuran alkohol yang diukur secara isobar pada tekanan atmosfer telah tersedia dalam literatur. Data kesetimbangan uap-cair yang tersedia di beberapa literatur tersebut dikumpulkan dan dikorelasikan dengan model koefisien aktifitas seperti Wilson (Wilson, 1964), Non-Random Two-Liquid, NRTL (Renon dan Prausnitz, 1968) dan Universal Quasi-Chemical, UNIQUAC (Abrams dan Prausnitz, 1975) sehingga diperoleh parameter interaksi biner model-model tersebut. Model koefisien aktifitas tersebut dipilih dikarenakan mampu memodelkan secara baik untuk campuran ideal dan tidak ideal. Pada penelitian ini, parameter interaksi biner kesetimbangan uap-cair campuran alkohol primer (metanol, etanol, 1-propanol atau 1-butanol) dengan alkohol rantai C5 akan ditentukan sebagai fungsi suhu untuk optimalisasi desain kolom distilasi pada proses produksi bioetanol. Pada penelitian sebelumnya, data parameter interaksi biner kesetimbangan uap-cair campuran alkohol rantai C1

Tabel 1. Sumber data kesetimbangan uap-cair sistem biner campuran alkohol primer (metanol, etanol, 1-propanol atau 1-butanol) dengan alkohol rantai C5 pada tekanan atmosfer

Kode	Komponen 1	Komponen 2	P (kPa)	N ¹	Referensi
1	Metanol	1-Pentanol	101,325	19	Wisniak dan Tamir, 1988
2	Metanol	3-Metil-1-butanol	101,300	18	Resa, dkk., 1997
3	Metanol	2-Metil-1-butanol	101,300	23	Resa, dkk., 2005
4	Metanol	2-Metil-2-butanol	101,300	26	Zhang, dkk., 2007
5	Etanol	1-Pentanol	101,325	10	Hellwig dan Van Winkle, 1953
6	Etanol	3-Metil-1-butanol	101,330	8	Duran, dkk., 2013
7	Etanol	2-Metil-1-butanol	101,300	22	Resa, dkk., 2005
8	1-Propanol	1-Pentanol	101,300	21	Lladosa, dkk., 2006
9	1-Propanol	3-Metil-1-butanol	101,300	23	Resa, dkk., 2006
10	1-Propanol	2-Metil-1-butanol	101,300	23	Resa, dkk., 2006
11	1-Butanol	1-Pentanol	101,300	21	Wang dan Bao, 2013
12	1-Butanol	3-Metil-1-butanol	100,000	18	Aucejo, dkk., 1994
13	1-Butanol	3-Metil-2-butanol	100,000	19	Aucejo, dkk., 1994
14	1-Butanol	2-Metil-1-butanol	100,000	16	Aucejo, dkk., 1994
15	1-Butanol	2-Metil-2-butanol	100,000	19	Aucejo, dkk., 1994

¹ Jumlah titik data

Tabel 2. Koefisien persamaan Antoine¹ untuk komponen murni

No	Keterangan	A	B	C	D	E
1	Metanol	75,8102	-6904,5	-8,8622	7,466 x 10 ⁻⁶	2
2	Etanol	66,3962	-7122,3	-7,1424	2,885 x 10 ⁻⁶	2
3	1-Propanol	77,7562	-8307,2	-8,5767	7,509 x 10 ⁻¹⁸	6
4	1-Butanol	99,3822	-9866,4	-11,655	1,083 x 10 ⁻¹⁷	6
5	1-Pentanol	107,842	-10643	-12,858	1,249 x 10 ⁻¹⁷	6
6	3-Metil-1-butanol	110,162	-10743	-13,165	1,167 x 10 ⁻¹⁷	6
7	3-Metil-2-butanol	105,352	-9925,7	-12,591	1,143 x 10 ⁻¹⁷	6
8	2-Metil-1-butanol	112,332	-10738	-13,522	1,427 x 10 ⁻¹⁷	6
9	2-Metil-2-butanol	108,872	-9860,1	-13,162	1,468 x 10 ⁻¹⁷	6

¹ Diambil dari kumpulan data properti fisik software *Aspen Plus* V8.

sampai C4 telah ditentukan (Mustain, dkk., 2016). Data parameter interaksi biner sebagai fungsi suhu tersebut diharapkan bisa digunakan secara akurat untuk aplikasi rentang suhu yang panjang.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini diawali dengan mengumpulkan data kesetimbangan uap-cair sistem biner campuran alkohol primer (metanol, etanol, 1-propanol atau 1-butanol) dengan alkohol rantai C5 pada tekanan atmosfer yang tersedia di berbagai literatur. Setelah itu, data kesetimbangan uap-cair yang sudah terkumpul tersebut dikorelasikan dengan persamaan koefisien aktifitas seperti Wilson, NRTL dan UNIQUAC untuk mendapatkan parameter interaksi biner. Pada kesempatan ini, parameter interaksi biner ditentukan sebagai fungsi suhu sehingga pada aplikasinya nanti bisa digunakan secara akurat untuk rentang suhu yang panjang. Total data kesetimbangan uap-cair yang dikorelasikan berjumlah 15 sistem biner dengan sumber seperti tertera pada Tabel 1.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hubungan kesetimbangan fase uap dan cair dideskripsikan sebagai berikut:

$$y_i \Phi_i P = x_i \gamma_i P_i^s \tag{1}$$

dimana x_i dan y_i adalah fraksi mol fase cair dan uap pada kondisi setimbang, Φ_i adalah faktor koreksi fase uap, γ_i adalah koefisien aktifitas, P adalah tekanan total, dan P_i^s adalah tekanan uap dari komponen murni i , yang dihitung dari persamaan Antoine:

$$\ln(P^s) = A + \frac{B}{T} + C \ln T + DT^E \tag{2}$$

Koefisien-koefisien A , B , C , D dan E yang dipakai pada penelitian ini terlampir pada Tabel 2 dengan P_i^s dalam kPa dan T dalam K.

Data eksperimental yang dipilih pada penelitian ini adalah data kesetimbangan uap-cair pada tekanan atmosfer sehingga fase uap dapat diasumsikan sebagai gas ideal dan hubungan kesetimbangan uap-cair pada Persamaan (1) untuk sistem biner dapat disederhanakan sebagai berikut:

$$y_i P = x_i \gamma_i P_i^s \tag{3}$$

Model koefisien aktifitas Wilson, NRTL dan UNIQUAC yang dipilih dalam penelitian ini seperti dideskripsikan pada persamaan berikut dengan parameter interaksi biner sebagai fungsi suhu.

Wilson:

$$\ln \gamma_i = -\ln \left(\sum_j x_j \Lambda_{ij} \right) + 1 - \sum_k \frac{x_k \Lambda_{ki}}{\sum_j x_j \Lambda_{kj}} \tag{4}$$

dimana

$$\Lambda_{ij} = \exp \left(a_{ij} + \frac{b_{ij}}{T} \right) \tag{5}$$

model NRTL:

$$\ln \gamma_i = \frac{\sum_j \tau_{ji} G_{ji} x_j}{\sum_k G_{ki} x_k} + \sum_j \frac{x_j G_{ij}}{\sum_k G_{kj} x_k} \left(\tau_{ij} - \frac{\sum_k x_k \tau_{kj} G_{kj}}{\sum_k G_{kj} x_k} \right) \tag{6}$$

dimana

$$G_{ij} = \exp(-\alpha_{ij} \tau_{ij}) \tag{7}$$

$$\tau_{ij} = a_{ij} + \frac{b_{ij}}{T} \tag{8}$$

UNIQUAC

$$\ln \gamma_i = \ln \frac{\Phi_i}{x_i} + \frac{z}{2} q_i \ln \frac{\theta_i}{\Phi_i} + l_i - \frac{\Phi_i}{x_i} \sum_j^N x_j l_j - q_i \ln \left(\sum_j^N \theta_j \tau_{ji} \right) + q_i - q_i \sum_j^N \frac{\theta_j \tau_{ij}}{\sum_k^N \theta_k \tau_{kj}} \quad (9)$$

dimana:

$$\Phi_i = \frac{r_i x_i}{\sum_k^N r_k x_k} \quad (10)$$

$$\theta_i = \frac{q_i x_i}{\sum_k^N q_k x_k} \quad (11)$$

$$l_i = \frac{z}{2} (r_i - q_i) - (r_i - 1) \quad (12)$$

$$l_j = \frac{z}{2} (r_j - q_j) - (r_j - 1) \quad (13)$$

$$\tau_{ij} = \exp \left(a_{ij} + \frac{b_{ij}}{T} \right) \quad (14)$$

dan z = 10

dimana parameter interaksi biner pada kesempatan ini ditunjukkan dengan simbol a_{ij} dan b_{ij} untuk model Wilson, NRTL dan UNIQUAC tersebut. Untuk persamaan NRTL, a_{ij} adalah konstanta *nonrandomness* dari interaksi campuran biner. Sedangkan pada persamaan UNIQUAC, z adalah bilangan koordinasi kisi, q adalah parameter area komponen murni dan r adalah parameter volume komponen murni.

Parameter interaksi biner ditentukan dengan cara mengkorelasikan data eksperimental dengan model Wilson, NRTL dan UNIQUAC. Dalam perhitungan, fase uap diasumsikan gas ideal dan ketidak-idealitas dari fase cair dinyatakan dengan model-model koefisien aktifitas tersebut. Untuk model UNIQUAC, nilai-nilai parameter r dan q yang dipakai seperti tercantum pada Tabel 3. Parameter interaksi biner yang optimal ditentukan berdasarkan prinsip likelihood maksimum dengan meminimalkan fungsi objektif (OF) berikut (Hu, dkk., 2015):

$$OF = \sum_{k=1}^{n_p} \left\{ \left[\frac{(P_k^{calc} - P_k^{expt})}{\sigma_P} \right]^2 + \left[\frac{(T_k^{calc} - T_k^{expt})}{\sigma_T} \right]^2 + \left[\frac{(x_{1,k}^{calc} - x_{1,k}^{expt})}{\sigma_{x_1}} \right]^2 + \left[\frac{(y_{1,k}^{calc} - y_{1,k}^{expt})}{\sigma_{y_1}} \right]^2 \right\} \quad (15)$$

Dimana n_p adalah jumlah titik data. Pangkat atas *calc* dan *expt* menunjukkan nilai perhitungan dan eksperimental. Deviasi standar dari tekanan (σ_P), suhu (σ_T), fraksi mol fase cair komponen 1 (σ_{x_1}) dan fraksi mol fase uap komponen 1 (σ_{y_1}) adalah 0,2 kPa, 0,1 K, 0,005 dan 0,005.

Parameter interaksi biner sebagai fungsi suhu yang optimal (a_{12}, a_{21}, b_{12} dan b_{21}) dalam

penelitian ini untuk model Wilson, NRTL dan UNIQUAC adalah seperti tertera pada Tabel 4-6. Sedangkan, *root mean square deviations* (RMSD) antara hasil perhitungan dan data eksperimental untuk model-model tersebut ditampilkan pada Tabel 7-9. Hasil penelitian menunjukkan bahwa korelasi model memberikan hasil yang baik dikarenakan nilai RMSD yang relatif kecil.

Tabel 3. Properti fisik komponen murni yang digunakan dalam korelasi model koefisien aktifitas UNIQUAC.

No	Komponen	r^1	q^1
1	Metanol	1,4311	1,432
2	Etanol	2,1055	1,972
3	1-Propanol	2,7798	2,512
4	1-Butanol	3,4542	3,048
5	1-Pentanol	4,1285	3,592
6	3-Metil-1-butanol	4,2729	3,478
7	3-Metil-2-butanol	4,2696	3,456
8	2-Metil-1-butanol	4,2848	3,394
9	2-Metil-2-butanol	4,2538	3,446

¹ Ditentukan dari metode Bondi (Bondi, 1968).

Tabel 4. Parameter interaksi biner yang optimal untuk model Wilson

Kode	a_{12}	a_{21}	b_{12} (K)	b_{21} (K)
1	11,4786	5,4396	-5943,11	-1697,99
2	0,8423	-19,6921	1,80	6219,86
3	4,9782	-2,5664	-2160,16	1140,21
4	0,0732	-0,3983	177,49	-144,61
5	-3,5938	4,1730	457,69	-1262,05
6	-2,3061	0,6885	1017,32	-549,00
7	4,6845	1,0520	-2453,12	-85,28
8	-0,5691	-1,2463	113,84	574,72
9	11,8800	-1,0995	-5081,79	701,38
10	5,3105	-0,9764	-2521,01	641,33
11	-12,0706	27,5340	5111,20	-11425,04
12	-0,6823	-0,8452	261,36	347,29
13	4,3474	9,9665	-1424,42	-4285,70
14	-1,3274	-16,0612	767,23	5930,72
15	-6,7781	2,6261	2156,21	-729,17

Tabel 5. Parameter interaksi biner yang optimal untuk model NRTL ($\alpha_{ij} = 0,3$)

Kode	a_{12}	a_{21}	b_{12} (K)	b_{21} (K)
1	-9,7053	7,3563	3098,04	-1262,13
2	19,4655	0,6761	-5904,38	-715,16
3	3,1892	-5,6605	-1452,46	2501,16
4	-0,7408	0,6222	591,04	-478,43
5	-9,5307	17,9046	3143,93	-5812,45
6	-1,3517	2,8115	871,13	-1278,57
7	-1,9104	-0,5184	311,47	886,69
8	2,8456	-0,4988	-793,25	-49,53
9	2,7030	-11,7876	-1383,16	5051,59
10	0,2158	-2,2033	-424,54	1362,00
11	0,4921	-0,0148	-363,45	157,08
12	-2,0789	3,5832	836,98	-1436,37
13	-11,2455	-3,5700	4863,31	1032,95
14	20,7082	-2,4670	-7702,95	653,49
15	13,8522	-24,8433	-5601,46	9900,58

Tabel 6. Parameter interaksi biner yang optimal untuk model UNIQUAC

Kode	a_{12}	a_{21}	b_{12} (K)	b_{21} (K)
1	0,6408	2,9116	-14,24	-1603,02
2	-5,9597	0,2113	1683,28	110,76
3	-1,2176	1,9962	607,59	-1033,84
4	0,2742	-0,6947	-58,36	141,59
5	5,2949	-11,8498	-1697,51	3831,83
6	0,2346	-1,3315	-103,90	468,98
7	0,8573	0,1095	-62,51	-485,14
8	-0,7114	0,1332	116,10	70,76
9	-1,9129	6,0588	949,08	-2643,48
10	-0,1484	1,1393	284,55	-772,11
11	-0,1746	0,0961	147,06	-114,46
12	-0,3363	-0,1455	186,68	5,53
13	8,3832	-1,4015	-3536,65	751,81
14	-13,1580	4,2505	4906,46	-1470,02
15	-6,0360	10,9794	2497,06	-4444,05

Tabel 7. *Root mean square deviation (RMSD¹)* antara hasil perhitungan dan data eksperimental untuk model Wilson

Kode	RMSD ΔT (K)	RMSD ΔP (kPa)	RMSD Δy ₁
1	0,59	0,256	0,030
2	0,53	0,167	0,015
3	0,52	0,153	0,013
4	0,04	0,012	0,001
5	0,48	0,145	0,007
6	0,17	0,041	0,004
7	0,31	0,093	0,008
8	0,68	0,199	0,010
9	0,22	0,064	0,008
10	0,20	0,059	0,003
11	0,20	0,064	0,006
12	0,33	0,096	0,005
13	0,22	0,064	0,002
14	0,43	0,122	0,007
15	0,17	0,047	0,004

$$^1 \text{RMSD } \Delta M = \left(\frac{1}{n_p} \sum_{k=1}^{n_p} (M_k^{cal} - M_k^{exp})^2 \right)^{0.5}$$

dimana n_p adalah jumlah titik data dan M merupakan T, P atau y_1 .

Tabel 8. *RMSD¹* antara hasil perhitungan dan data eksperimental untuk model NRTL

Kode	RMSD ΔT (K)	RMSD ΔP (kPa)	RMSD Δy ₁
1	0,52	0,254	0,026
2	0,54	0,140	0,011
3	0,54	0,159	0,013
4	0,04	0,012	0,001
5	0,48	0,147	0,007
6	0,17	0,041	0,004
7	0,33	0,100	0,009
8	0,62	0,184	0,009
9	0,23	0,067	0,008
10	0,20	0,060	0,003
11	0,25	0,075	0,005
12	0,33	0,096	0,005
13	0,23	0,064	0,003
14	0,43	0,122	0,007
15	0,15	0,044	0,003

$$^1 \text{RMSD } \Delta M = \left(\frac{1}{n_p} \sum_{k=1}^{n_p} (M_k^{cal} - M_k^{exp})^2 \right)^{0.5}$$

dimana n_p adalah jumlah titik data dan M merupakan T, P atau y_1 .

Tabel 9. *RMSD¹* antara hasil perhitungan dan data eksperimental untuk model UNIQUAC

Kode	RMSD ΔT (K)	RMSD ΔP (kPa)	RMSD Δy ₁
1	0,52	0,254	0,026
2	0,49	0,148	0,017
3	0,55	0,161	0,013
4	0,04	0,012	0,001
5	0,48	0,151	0,007
6	0,17	0,041	0,004
7	0,34	0,102	0,009
8	0,60	0,179	0,009
9	0,23	0,068	0,008
10	0,21	0,061	0,003
11	0,25	0,076	0,005
12	0,33	0,096	0,005
13	0,22	0,062	0,002
14	0,42	0,121	0,007
15	0,16	0,044	0,003

$$^1 \text{RMSD } \Delta M = \left(\frac{1}{n_p} \sum_{k=1}^{n_p} (M_k^{cal} - M_k^{exp})^2 \right)^{0.5}$$

dimana n_p adalah jumlah titik data dan M merupakan T, P atau y_1 .

Parameter interaksi biner sebagai fungsi suhu dalam penelitian ini diharapkan mampu meningkatkan kemampuan parameter untuk diaplikasikan di berbagai kisaran suhu yang lebar pada perhitungan kesetimbangan uap-cair dari campuran alkohol. Sehingga, parameter yang diperoleh dapat digunakan untuk merancang dan mengoptimalkan unit distilasi dalam proses pemurnian bioetanol sebagai sumber energi alternatif pengganti bahan bakar fosil.

Pada penelitian ini, hasil perhitungan nilai koefisien aktifitas mendekati satu ($\gamma \approx 1$) untuk semua sistem yang diamati karena sistem biner yang dianalisa pada kesempatan ini adalah sejenis yaitu campuran biner alkohol. Sebenarnya korelasi data kesetimbangan uap-cair sistem-sistem tersebut bisa dikorelasikan dengan persamaan sederhana yaitu Hukum Raoult. Akan tetapi, parameter interaksi biner model Wilson, NRTL dan UNIQUAC tetap dibutuhkan untuk pengembangan model kesetimbangan uap-cair campuran multi komponen antara alkohol dengan komponen lain (Wiguno, dkk., 2016).

SIMPULAN

Parameter interaksi biner sebagai fungsi suhu untuk kesetimbangan uap-cair campuran biner alkohol primer (metanol, etanol, 1-propanol atau 1-butanol) dengan alkohol rantai C5 telah ditentukan. Parameter ditentukan dari 15 data kesetimbangan uap-cair sistem biner campuran alkohol yang telah dipilih. Data yang dipilih dikorelasikan dengan baik menggunakan model Wilson, NRTL, dan UNIQUAC menggunakan parameter interaksi biner sebagai fungsi suhu. *Root mean square deviation* (RMSD) antara hasil perhitungan dan data eksperimental relatif kecil. Selain itu, parameter yang diperoleh dalam penelitian ini diharapkan dapat digunakan untuk merancang dan mengoptimalkan proses pemurnian bioetanol.

DAFTAR PUSTAKA

- Abrams, D.S. dan Prausnitz, J.M., (1975), *Statistical Thermodynamics of Liquid Mixtures: A New Expression for the Excess Gibbs Energy of Partly or Completely Miscible Systems*, AIChE J., 21, hal. 116-128.
- Aucejo, A., Burguet, M.C., Monton, J.B., Munoz, R., Sanchoello, M. dan Vazquez, M.I., (1994), *Vapor-Liquid Equilibria for Systems of 1-Butanol with 2-Methyl-1-butanol, 3-Methyl-1-butanol, 2-Methyl-2-butanol, and 3-Methyl-2-butanol at 30 and 100 kPa*, J. Chem. Eng. Data, 39, hal. 271-274.
- Bondi, A., (1968), *Physical Properties of Molecular Crystals, Liquids and Glasses*, Wiley, New York.
- Cardona, C.A., Quintero, J.A. dan Paz, I.C., (2010), *Production of Bioethanol from Sugarcane Bagasse: Status and Perspectives*, Bioresour. Technol., 101, hal. 4754-4766.
- Dias, T.P.V.B., Fonseca, L.A.A.P., Ruiz, M.C., Batista, F.R.M., Batista, E.A.C. dan Meirelles, A.J.A., (2014), *Vapor-Liquid Equilibrium of Mixtures Containing the Following Higher Alcohols: 2-Propanol, 2-Methyl-1-propanol, and 3-Methyl-1-butanol*, J. Chem. Eng. Data, 59, hal. 659-665.
- Duran, J.A., Córdoba, F.P., Gil, I.D., Rodríguez, G. dan Orjuela, A., (2013), *Vapor-Liquid Equilibrium of the Ethanol + 3-Methyl-1-butanol System at 50.66, 101.33 and 151.99 kPa*, Fluid Phase Equilib., 338, hal. 128-134.
- Hellwig, L.R. dan Van Winkle, M., (1953), *Vapor-Liquid Equilibria for Ethyl Alcohol Binary Systems*, Ind. Eng. Chem., 45, hal. 624-629.
- Hu, C.-C., Chiu, P.-H., Wang, S.-J. dan Cheng, S.-H., (2015), *Isobaric Vapor-Liquid Equilibria for Binary Systems of Diethyl Carbonate + Propylene Carbonate, Diethyl Carbonate + Propylene Glycol, and Ethanol + Propylene Carbonate at 101.3 kPa*, J. Chem. Eng. Data, 60, hal. 1487-1494.
- Li, K., Liu, S. dan Liu, X., (2014), *An Overview of Algae Bioethanol Production*, Int. J. Energy Res., 38, hal. 965-977.
- Lladosa, E., Montón, J.B., Burguet, M.C. dan Muñoz, R., (2006), *Isobaric Vapor-Liquid Equilibria for the Binary Systems 1-Propyl Alcohol + Dipropyl Ether and 1-Butyl Alcohol + Dibutyl Ether at 20 and 101.3 kPa*, Fluid Phase Equilib., 247, hal. 47-53.
- Mustain, A., Hartanto, D. dan Altway, S., (2016), *Compilation of Extended Binary Interaction Parameters for Alcohols Mixtures Encountered in Alcohol Separation Process*, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 11, hal. 3465-3472.
- Nikolić, S., Mojović, L., Rakin, M. dan Pejin, D., (2009), *Bioethanol Production from Corn Meal by Simultaneous Enzymatic Saccharification and Fermentation with Immobilized Cells of Saccharomyces cerevisiae var. Ellipsoideus*, Fuel, 88, hal. 1602-1607.
- Renon, H. dan Prausnitz, J.M., (1968), *Local Compositions in Thermodynamic Excess Functions for Liquid Mixtures*, AIChE J., 14, hal. 135-144.
- Resa, J.M., González, C. dan Goenaga, J.M., (2005), *Density, Refractive Index, Speed of Sound at 298.15 K, and Vapor-Liquid Equilibria at 101.3 kPa for Binary Mixtures of Methanol + 2-Methyl-1-butanol and Ethanol + 2-Methyl-1-butanol*, J. Chem. Eng. Data, 50, hal. 1570-1575.
- Resa, J.M., González, C. dan Goenaga, J.M., (2006), *Density, Refractive Index, Speed of Sound at 298.15 K, and Vapor-Liquid Equilibria at 101.3 kPa for Binary Mixtures of Propanol + 2-Methyl-1-butanol and Propanol*

- + *3-Methyl-1-butanol*, J. Chem. Eng. Data, 51, hal. 73-78.
- Resa, J.M., González, C., Moradillo, B. dan Ruiz, A., (1997), *Isobaric Vapor-Liquid Equilibria of 3-Methyl-1-butanol with Methanol and Vinyl Acetate at 101.3 kPa*, Fluid Phase Equilib., 132, hal. 205-213.
- Saravanakumar, K., Senthilraja, P. dan Kathiresan, K., (2013), *Bioethanol Production by Mangrove-derived Marine Yeast, Sacchromyces Cerevisiae*, Journal of King Saud University - Science, 25, hal. 121-127.
- Talebna, F., Karakashev, D. dan Angelidaki, I., (2010), *Production of Bioethanol from Wheat Straw: An Overview on Pretreatment, Hydrolysis and Fermentation*, Bioresour. Technol., 101, hal. 4744-4753.
- Wang, J. dan Bao, Z., (2013), *Investigation on Vapor-Liquid Equilibrium for 2-Propanol + 1-Butanol + 1-Pentanol at 101.3 kPa*, Fluid Phase Equilib., 341, hal. 30-34.
- Wiguno, A., Mustain, A., Irwansyah, W.F.E. dan Wibawa, G., (2016), *Isothermal Vapor-Liquid Equilibrium of Methanol + Glycerol and 1-Propanol + Glycerol*, Indones. J. Chem., 16, hal. 111-116.
- Wilson, G.M., (1964), *Vapor-Liquid Equilibrium. XI. A New Expression for the Excess Free Energy of Mixing*, J. Am. Chem. Soc., 86, hal. 127-130.
- Wisniak, J. dan Tamir, A., (1988), *Association Effects in the Methanol-1-Pentanol System*, J. Chem. Eng. Data, 33, hal. 432-434.
- Zhang, G., Weeks, B.L. dan Wei, J., (2007), *Vapor-Liquid Equilibria Data for Methanol + 2-Propanol + 2-Methyl-2-butanol and Constituent Binary Systems at 101.3 kPa*, J. Chem. Eng. Data, 52, hal. 878-883.