



# Parameter Interaksi Biner Kesetimbangan Uap-Cair Campuran yang Melibatkan Alkohol Rantai Bercabang atau Aseton untuk Optimasi Proses Pemurnian Bioetanol

Asalil Mustain<sup>1,\*</sup>, Khalimatus Sa'diyah<sup>1</sup>, Agung Ari Wibowo<sup>1</sup>, Dhoni Hartanto<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, Kampus Sekaran, Gunungpati, Semarang 50229, Indonesia

\*E-mail: asalil89@polinema.ac.id

## ABSTRAK

Parameter interaksi biner kesetimbangan uap-cair campuran yang melibatkan alkohol rantai bercabang atau aseton telah ditentukan pada penelitian ini. Data kesetimbangan uap-cair kondisi isobarik pada tekanan atmosferik telah dipilih total sebanyak 14 sistem. Data kesetimbangan tersebut kemudian dikorelasikan dengan model koefisien aktifitas Wilson, Non-Random Two-Liquid (NRTL) dan Universal Quasi-Chemical (UNIQUAC) untuk diperoleh parameter interaksi binernya. Parameter tersebut ditentukan sebagai fungsi suhu pada penelitian ini untuk meningkatkan kemampuannya dalam aplikasi pada kisaran suhu yang panjang. Korelasi menunjukkan hasil yang baik dikarenakan *root mean square deviation* (RMSD) antara data eksperimental dengan hasil perhitungan relatif kecil. Sebagai tambahan, perilaku masing-masing sistem biner tersebut juga diamati pada kesempatan ini. Parameter yang diperoleh dapat digunakan untuk optimasi desain kolom distilasi pada proses pemurnian produksi bioetanol.

**Kata kunci:** Bioetanol, desain, kesetimbangan uap-cair, parameter interaksi biner, pemurnian.

## ABSTRACT

The binary interaction parameters of vapor-liquid equilibrium for the mixtures involving branched-chain higher alcohols or acetone have been determined in this study. Isobaric vapor-liquid equilibrium data at atmospheric pressure have been selected for a total of 14 systems. The VLE data were then correlated with the Wilson, Non-Random Two-Liquid (NRTL) and Universal Quasi-Chemical (UNIQUAC) activity coefficient models to obtain its binary interaction parameters. The parameters were determined as the temperature-dependent in this study to increase its ability in wide temperature range applications. The correlations showed good results because the root mean square deviation (RMSD) between the experimental data and calculation values were relatively low. In addition, the behavior of each binary systems were also observed in this study. The obtained parameters could be used to optimize the distillation column design in the purification process of bioethanol production.

**Keywords:** Binary interaction parameter, bioethanol, design, purification, vapor-liquid equilibrium.

## 1. PENDAHULUAN

Sekarang ini, cadangan bahan bakar fosil yang ada di dunia ini semakin sedikit. Oleh karena itu, pemanfaatan sumber energi lain terus dikembangkan untuk dijadikan alternatif sumber energi. Salah satu sumber energi yang cukup menjanjikan adalah bioetanol yang dapat diproduksi secara fermentasi dengan menggunakan mikroorganisme. Pembuatan bioetanol dapat dilakukan dengan cara fermentasi gula yang

diperoleh dari bahan alam seperti tebu [1] dan jagung [2]. Sedangkan jenis mikroorganisme yang sering digunakan diantaranya seperti *Mucor indicus* [3] dan *Candida shehatae* NCIM 3501 [4].

Pada pembuatan bioetanol, hasil fermentasi tidak hanya mengandung etanol murni akan tetapi bercampur dengan air dan berbagai macam komponen minor dari produk samping proses fermentasi. Adapun produk samping proses fermentasi tersebut adalah

seperti alkohol lain (metanol, propanol, organik (asam asetat, asam propionat), senyawa karbonil (asetaldehida, aseton) dan ester (etil asetat, metil asetat) [5]. Sehingga, campuran tersebut harus dimurnikan karena aplikasi bioetanol sebagai substitusi atau campuran bahan bakar fosil membutuhkan bioetanol dengan kemurnian tinggi.

Salah satu proses pemurnian yang umum digunakan untuk pemurnian produk fermentasi bioetanol adalah dengan menggunakan metode distilasi yang dioperasikan pada tekanan atmosferik. Dalam rangka optimalisasi desain kolom distilasi tersebut, data kesetimbangan uap-cair antar komponen-komponen yang terkandung dalam produk hasil fermentasi dibutuhkan. Beberapa data kesetimbangan uap-cair sistem biner tersebut telah tersedia dalam literatur. Pada penelitian sebelumnya, kompilasi data parameter interaksi biner kesetimbangan uap-cair campuran alkohol rantai C1 sampai C4 telah ditentukan sebagai fungsi suhu oleh Mustain, dkk. [6]. Selanjutnya, kompilasi data parameter interaksi biner kesetimbangan uap-cair dilanjutkan untuk campuran alkohol primer (metanol, etanol, 1-propanol atau 1-butanol) dengan alkohol rantai C5 [7]. Sebagai kelanjutan penelitian tersebut, parameter interaksi biner kesetimbangan uap-cair campuran yang melibatkan alkohol rantai bercabang atau aseton akan ditentukan pada penelitian ini. Data kesetimbangan uap-cair campuran tersebut yang tersedia di beberapa literatur dikumpulkan dan dikorelasikan dengan model koefisien aktifitas seperti Wilson [8], Non-Random Two-Liquid, NRTL [9] dan Universal Quasi-Chemical, UNIQUAC [10] sehingga diperoleh parameter interaksi biner model-model tersebut. Sebagai tambahan, perilaku masing-masing sistem biner tersebut juga diamati pada kesempatan ini.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini diawali dengan mengumpulkan data kesetimbangan uap-cair

isoamil alkohol dan sebagainya), asam sistem biner campuran yang melibatkan alkohol rantai bercabang atau aseton pada tekanan atmosferik yang tersedia di berbagai literatur. Total data kesetimbangan uap-cair yang terkumpulkan berjumlah 14 sistem biner. Keterangan kondisi, nilai *uncertainty* (ketidakpastian) data eksperimen dan sumber referensi dari sistem biner tersebut dapat dilihat pada Tabel 1. 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 penelitian ini, parameter interaksi biner ditentukan sebagai fungsi suhu supaya parameter tersebut dapat diaplikasikan secara akurat untuk rentang suhu yang panjang.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hubungan kesetimbangan fase uap dan cair dideskripsikan sebagai berikut:

$$y_i \Phi_i P = x_i \gamma_i P_i^s \quad (1)$$

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

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

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 atmosferik sehingga fase uap dapat diasumsikan sebagai gas ideal dan hubungan kesetimbangan uap-cair pada Persamaan (1) untuk sistem biner dapat disederhanakan sebagai berikut:

$$y_i P = x_i \gamma_i P_i^s \quad (3)$$

**Tabel 1.** Sumber data kesetimbangan uap-cair sistem biner campuran yang melibatkan alkohol rantai bercabang atau aseton pada tekanan atmosferik.

Kode	Komponen 1	Komponen 2	P (kPa)	N <sup>1</sup>	u(P) (kPa)	u(T) (K)	u(x <sub>1</sub> )	u(y <sub>1</sub> )	Ref.
1	2-Propanol	1-Pentanol	101,300	26	-	0,01	0,0010	0,0010	[11]
2	2-Propanol	3-Metil-1-butanol	101,300	14	0,040	0,06	0,0009	0,0009	[5]
3	2-Propanol	2-Metil-2-butanol	101,300	21	0,065	0,05	0,0010	0,0010	[12]
4	2-Metil-1-propanol	1-Pentanol	101,300	20	0,100	0,01	0,0010	0,0010	[13]
5	2-Metil-1-propanol	3-Metil-1-butanol	101,300	14	0,040	0,06	0,0009	0,0009	[5]
6	2-Metil-1-propanol	2-Metil-1-butanol	101,300	21	0,100	0,01	0,0010	0,0010	[13]
7	3-Metil-1-butanol	1-Pentanol	101,325	12	-	-	-	-	[14]
8	2-Metil-2-butanol	1-Pentanol	101,325	14	-	-	-	-	[14]
9	2-Metil-2-butanol	3-Metil-1-butanol	101,325	18	-	-	-	-	[14]
10	Aseton	Metanol	101,300	34	0,100	0,25	0,0010	0,0010	[15]
11	Aseton	Etanol	101,300	21	0,100	0,05	0,0030	0,0030	[16]
12	Aseton	1-Propanol	101,325	6	-	-	-	-	[17]
13	Aseton	2-Propanol	101,325	13	-	-	-	-	[17]
14	Aseton	2-Butanol	101,325	13	0,100	0,10	0,0010	0,0010	[18]

<sup>1</sup> Jumlah titik data.**Tabel 2.** Koefisien persamaan Antoine<sup>1</sup> untuk komponen murni.

No	Keterangan	A	B	C	D	E
1	Metanol	75,8102	-6904,5	-8,8622	7,466 x 10 <sup>-6</sup>	2
2	Etanol	66,3962	-7122,3	-7,1424	2,885 x 10 <sup>-6</sup>	2
3	1-Propanol	77,7562	-8307,2	-8,5767	7,509 x 10 <sup>-18</sup>	6
4	2-Propanol	103,812	-9040,0	-12,676	5,538 x 10 <sup>-6</sup>	2
5	2-Butanol	115,642	-10236	-14,125	2,356 x 10 <sup>-17</sup>	6
6	2-Metil-1-propanol	114,872	-10504	-13,921	1,690 x 10 <sup>-17</sup>	6
7	1-Pentanol	107,842	-10643	-12,858	1,249 x 10 <sup>-17</sup>	6
8	3-Metil-1-butanol	110,162	-10743	-13,165	1,167 x 10 <sup>-17</sup>	6
9	3-Metil-2-butanol	105,352	-9925,7	-12,591	1,143 x 10 <sup>-17</sup>	6
10	2-Metil-1-butanol	112,332	-10738	-13,522	1,427 x 10 <sup>-17</sup>	6
11	2-Metil-2-butanol	108,872	-9860,1	-13,162	1,468 x 10 <sup>-17</sup>	6
12	Aseton	62,0982	-5599,6	-7,0985	6,224 x 10 <sup>-6</sup>	2

<sup>1</sup> Sumber: Referensi [6,7,18].

Model koefisien aktifitas Wilson, NRTL dan UNIQUAC yang digunakan dalam penelitian ini seperti yang dideskripsikan pada penelitian sebelumnya [6,7] dengan parameter interaksi biner sebagai fungsi suhu:

Wilson

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

NRTL

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

UNIQUAC

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

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,

nilai  $\alpha_{ij}$  (konstanta *nonrandomness* dari interaksi campuran biner) ditetapkan sebesar 0,3 pada penelitian ini karena semua sistem biner yang diamati merupakan campuran komponen polar-polar [9]. Untuk model UNIQUAC, nilai-nilai parameter  $r$  dan  $q$  yang dipakai seperti tercantum pada Tabel 3.

Parameter interaksi biner ditentukan dengan cara mengkorelasikan data eksperimental dengan model Wilson, NRTL dan UNIQUAC. Dalam perhitungan, fase uap diasumsikan gas ideal dan ketidak-idealan dari fase cair dinyatakan dengan model-model koefisien aktifitas tersebut. Parameter interaksi biner yang optimal ditentukan berdasarkan prinsip likelihood maksimum [6,7].

Parameter interaksi biner sebagai fungsi suhu yang optimal ( $a_{12}$ ,  $a_{21}$ ,  $b_{12}$  dan  $b_{21}$ ) dari penelitian ini untuk model Wilson, NRTL dan UNIQUAC dikompilasikan seperti pada Tabel 4-6. Sedangkan, nilai *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.

Parameter interaksi biner sebagai fungsi suhu dalam penelitian ini diharapkan

mampu meningkatkan kemampuan parameter tersebut untuk bisa diaplikasikan di berbagai kisaran suhu yang lebar pada perhitungan kesetimbangan uap-cair dari campuran biner tersebut. Sehingga, parameter yang diperoleh dapat digunakan untuk merancang dan mengoptimalkan unit distilasi dalam proses pemurnian bioetanol sebagai sumber energi alternatif pengganti bahan bakar fosil. Data parameter interaksi biner sebagai fungsi suhu tersebut diharapkan bisa digunakan secara akurat untuk aplikasi rentang suhu yang panjang.

Sebagai tambahan, perilaku dari masing-masing campuran biner pada Tabel 1 juga diamati pada kesempatan ini. Berdasarkan daftar sistem biner yang dikompilasi pada penelitian ini, sistem biner nomor 1-9 menunjukkan perilaku campuran ideal (Hukum Raoult) yang ditunjukkan dengan hasil perhitungan nilai koefisien aktifitas yang mendekati satu ( $\gamma \approx 1$ ) karena campuran terdiri dari senyawa yang sejenis yaitu sesama alkohol. Sistem biner nomor 10-14 merupakan campuran tidak ideal karena campuran terdiri dari senyawa yang tidak sejenis yaitu campuran senyawa keton dan alkohol. Selain itu, campuran aseton + metanol teridentifikasi merupakan satu-satunya sistem biner yang memiliki titik azeotrop pada penelitian ini.

**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	2-Propanol	2,9137	2,528
5	2-Butanol	3,5979	3,032
6	2-Metil-1-propanol	3,4535	3,048
7	1-Pentanol	4,1285	3,592
8	3-Metil-1-butanol	4,2729	3,478
9	3-Metil-2-butanol	4,2696	3,456
10	2-Metil-1-butanol	4,2848	3,394
11	2-Metil-2-butanol	4,2538	3,446
12	Aseton	2,5735	2,336

<sup>1</sup> Ditentukan dari metode Bondi [19].

**Tabel 4.** Parameter interaksi biner yang optimal untuk model Wilson.

Kode	$a_{12}$	$a_{21}$	$b_{12}$ (K)	$b_{21}$ (K)
1	-3,3587	6,8487	1508,27	-2875,12
2	21,6440	0,9450	-9490,02	47,05
3	0,8628	0,6242	-690,15	21,05
4	-4,5034	3,5667	1932,03	-1575,21
5	-2,1862	1,7116	616,93	-513,11
6	21,4145	-6,3000	-8892,73	2739,03
7	-1,4253	-9,9472	841,59	3641,31
8	1,8027	-28,1180	-294,08	10000,00
9	1,8900	-15,4137	-349,46	5221,76
10	-3,3918	8,0170	1006,61	-2761,02
11	2,5563	3,3638	-1128,12	-1128,54
12	0,3837	0,3867	-282,54	-172,69
13	-0,5680	0,3016	147,01	-285,51
14	-12,5484	1,3246	4036,52	-286,29

**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	7,4536	-3,2592	-2312,32	841,08
2	-2,0981	-1,9314	275,62	1656,05
3	-1,9606	1,5418	392,99	-129,16
4	-6,2449	11,4081	2274,23	-4304,31
5	-2,8664	3,6211	884,99	-1086,81
6	8,3933	-22,3871	-3654,76	9353,90
7	0,3703	0,3936	-125,80	-177,05
8	14,8200	-1,3961	-4897,26	14,31
9	6,0415	-0,6374	-1617,58	-235,98
10	-8,5493	4,5840	2939,85	-1411,58
11	-3,8181	-1,2318	1223,12	735,79
12	-0,4019	-0,2810	146,88	274,36
13	-2,0400	1,9240	904,20	-642,25
14	-4,7041	17,2600	1375,72	-5576,80

**Tabel 6.** Parameter interaksi biner yang optimal untuk model UNIQUAC.

Kode	$a_{12}$	$a_{21}$	$b_{12}$ (K)	$b_{21}$ (K)
1	3,5723	-2,3097	-1523,48	1019,06
2	0,7079	0,8543	32,69	-837,77
3	1,2243	-1,3823	-273,35	273,63
4	2,6218	-3,1786	-1067,39	1289,86
5	1,3808	-1,8635	-378,45	516,81
6	-4,3061	11,9592	1939,54	-5073,01
7	-7,7983	2,7315	2909,58	-911,57
8	-9,0879	2,4400	3053,16	-648,19
9	-4,4352	1,5007	1330,91	-318,05
10	9,5097	-4,1773	-3369,34	1433,69
11	1,0611	1,4293	-350,77	-600,39
12	2,3977	-2,6558	-782,20	786,24
13	5,1232	-4,8398	-1804,28	1621,47
14	2,6147	-8,3133	-733,24	2615,58

**Tabel 7.** Root mean square deviation (RMSD<sup>1</sup>) antara hasil perhitungan dan data eksperimental untuk model Wilson.

Kode	RMSD $\Delta T$ (K)	RMSD $\Delta P$ (kPa)	RMSD $\Delta y_1$
1	0,24	0,066	0,0045
2	0,47	0,149	0,0078
3	0,13	0,033	0,0016
4	0,17	0,048	0,0053
5	0,28	0,082	0,0074
6	0,21	0,061	0,0056
7	0,12	0,038	0,0036
8	0,26	0,075	0,0085
9	0,12	0,035	0,0053
10	0,21	0,060	0,0029
11	0,10	0,028	0,0027
12	0,24	0,073	0,0023
13	0,04	0,009	0,0007
14	0,70	0,221	0,0251

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

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

**Tabel 8.** Root mean square deviation (RMSD<sup>1</sup>) antara hasil perhitungan dan data eksperimental untuk model NRTL.

Kode	RMSD $\Delta T$ (K)	RMSD $\Delta P$ (kPa)	RMSD $\Delta y_1$
1	0,25	0,070	0,0039
2	0,46	0,138	0,0082
3	0,12	0,032	0,0017
4	0,15	0,044	0,0052
5	0,28	0,081	0,0075
6	0,21	0,062	0,0058
7	0,14	0,044	0,0036
8	0,26	0,073	0,0071
9	0,12	0,036	0,0042
10	0,21	0,061	0,0030
11	0,10	0,029	0,0029
12	0,24	0,073	0,0023
13	0,04	0,009	0,0007
14	0,72	0,226	0,0246

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

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

**Tabel 9.** Root mean square deviation (RMSD<sup>1</sup>) antara hasil perhitungan dan data eksperimental untuk model UNIQUAC.

Kode	RMSD $\Delta T$ (K)	RMSD $\Delta P$ (kPa)	RMSD $\Delta y_1$
1	0,25	0,068	0,0045
2	0,47	0,141	0,0083
3	0,12	0,031	0,0017
4	0,17	0,048	0,0053
5	0,28	0,081	0,0076
6	0,20	0,059	0,0054
7	0,12	0,039	0,0036
8	0,26	0,074	0,0073
9	0,12	0,036	0,0045
10	0,21	0,060	0,0029
11	0,10	0,029	0,0030
12	0,25	0,075	0,0018
13	0,04	0,009	0,0007
14	0,76	0,235	0,0244

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

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

#### 4. KESIMPULAN

Parameter interaksi biner sebagai fungsi suhu untuk kesetimbangan uap-cair campuran yang melibatkan alkohol rantai bercabang atau aseton telah ditentukan. Parameter ditentukan dari 14 data kesetimbangan uap-cair sistem biner yang telah dipilih. Data yang dipilih telah dikorelasikan dengan baik menggunakan model Wilson, NRTL, dan UNIQUAC dengan parameter interaksi biner sebagai fungsi suhu. Nilai *root mean square deviation* (RMSD) antara hasil perhitungan dan data eksperimental menunjukkan nilai yang relatif kecil. Parameter yang diperoleh dalam penelitian ini diharapkan dapat digunakan untuk merancang dan mengoptimalkan proses pemurnian bioetanol.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Peneitian ini didanai oleh Penelitian Dosen Pemula dari Kementerian Riset, Teknoogi dan Pendidikan Tinggi, Tahun 2018.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. A. Cardona, J. A. Quintero, I. C. Paz, Production of Bioethanol from Sugarcane Bagasse: Status and Perspectives, *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 13, hal. 4754-4766, 2010.
- [2] S. Nikolić, L. Mojović, M. Rakin, D. Pejin, Bioethanol Production from Corn Meal by Simultaneous Enzymatic Saccharification and Fermentation with Immobilized Cells of *Saccharomyces cerevisiae* var. *Ellipsoideus*, *Fuel*, vol. 88, no. 9, hal. 1602-1607, 2009.
- [3] K. Karimi, G. Emtiazi, M. J. Taherzadeh, Production of Ethanol and Mycelial Biomass from Rice Straw Hemicellulose Hydrolyzate by *Mucor indicus*, *Process Biochem.*, vol. 41, no. 3, hal. 653-658, 2006.

- [4] A. K. Chandel, R. K. Kapoor, A. Singh, R. C. Kuhad, Detoxification of Sugarcane Bagasse Hydrolysate Improves Ethanol Production by *Candida shehatae* NCIM 3501, *Bioresour. Technol.*, vol. 98, no. 10, hal. 1947-1950, 2007.
- [5] T. P. V. B. Dias, L. A. A. P. Fonseca, M. C. Ruiz, F. R. M. Batista, E. A. C. Batista, A. J. A. Meirelles, 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*, vol. 59, no. 3, hal. 659-665, 2014.
- [6] A. Mustain, D. Hartanto, S. Altway, Compilation of Extended Binary Interaction Parameters for Alcohols Mixtures Encountered in Alcohol Separation Process, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, no. 5, hal. 3465-3472, 2016.
- [7] A. Mustain, A. Takwanto, D. Hartanto, Parameter Interaksi Biner Kesetimbangan Uap-Cair Campuran Alkohol untuk Optimasi Proses Pemurnian Bioetanol, *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, vol. 5, no. 2, hal. 37-44, 2016.
- [8] G. M. Wilson, Vapor-Liquid Equilibrium. XI. A New Expression for the Excess Free Energy of Mixing, *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 86, no. 2, hal. 127-130, 1964.
- [9] H. Renon, J. M. Prausnitz, Local Compositions in Thermodynamic Excess Functions for Liquid Mixtures, *AIChE J.*, vol. 14, no. 1, hal. 135-144, 1968.
- [10] D. S. Abrams, J. M. Prausnitz, Statistical Thermodynamics of Liquid Mixtures: A New Expression for the Excess Gibbs Energy of Partly or Completely Miscible Systems, *AIChE J.*, vol. 21, no. 1, hal. 116-128, 1975.
- [11] J. Wang, Z. Bao, Investigation on Vapor-Liquid Equilibrium for 2-Propanol + 1-Butanol + 1-Pentanol at 101.3 kPa, *Fluid Phase Equilib.*, vol. 341, hal. 30-34, 2013.
- [12] G. Zhang, B. L. Weeks, J. Wei, Vapor-Liquid Equilibria Data for Methanol + 2-Propanol+ 2-Methyl-2-butanol and Constituent Binary Systems at 101.3 kPa, *J. Chem. Eng. Data*, vol. 52, no. 3, hal. 878-883, 2007.
- [13] J. M. Resa, J. M. Goenaga, M. Iglesias, Vapor-Liquid Equilibria at 101.3 kPa for Binary Mixtures Containing 2-Methyl-1-propanol + 2-Methyl-1-butanol, 2-Methyl-1-propanol + 3-Methyl-1-butanol, and 2-Methyl-1-propanol + 1-Pentanol, *J. Chem. Eng. Data*, vol. 51, no. 5, hal. 1892-1895, 2006.
- [14] A. Tamir, J. Wisniak, Binary Vapor-Liquid Equilibria of Some Amyl Alcohols, *J. Chem. Eng. Data*, vol. 21, no. 2, hal. 182-185, 1976.
- [15] X. Chen, B. Yang, A. A. Abdeltawab, S. S. Al-Deyab, G. Yu, X. Yong, Isobaric Vapor-Liquid Equilibrium for Acetone + Methanol + Phosphate Ionic Liquids, *J. Chem. Eng. Data*, vol. 60, no. 3, hal. 612-620, 2015.
- [16] H.-C. Ku, C.-H. Tu, Isobaric Vapor-Liquid Equilibria for Mixtures of Acetone, Ethanol, and 2,2,4-Trimethylpentane at 101.3 kPa, *Fluid Phase Equilib.*, vol. 231, no. 1, hal. 99-108, 2005.



- [17] N. Gultekin, Vapor-Liquid Equilibria for Binary and Ternary Systems Composed of Acetone, 2-Propanol, and 1-Propanol, *J. Chem. Eng. Data*, vol. 34, no. 2, hal. 168-171, 1989.
- [18] H. Hardjono, A. Mustain, P. H. Suharti, D. Hartanto, I. Khoiroh, Isobaric Vapor-Liquid Equilibrium of 2-Propanone+2-Butanol System at 101.325 kPa: Experimental and Molecular Dynamics Simulation, *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 34, no. 7, hal. 2011-2018, 2017.
- [19] A. Bondi, Physical Properties of Molecular Crystals, Liquids and Glasses, New York: Wiley, 1968.