

PREDIKSI KESETIMBANGAN UAP-CAIR SISTEM BINER TERT-BUTANOL+ISOAMIL ALKOHOL PADA BERBAGAI TEKANAN MENGGUNAKAN MODEL UNIFAC

Susan Tiarawati dan Asalil Mustain

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia
susantiarawati14@gmail.com ; [\[asalil89@polinema.ac.id\]](mailto:asalil89@polinema.ac.id)

ABSTRAK

Sebagai negara agraris, Indonesia memiliki potensi besar dalam pengembangan bioetanol sebagai sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan. Produk hasil fermentasi bioetanol umumnya masih berupa campuran etanol, air, dan *fusel oil* yang mengandung komponen seperti tert-butanol dan isoamil alkohol, sehingga diperlukan pemisahan lanjutan. Salah satu metode pemurnian yang umum digunakan adalah distilasi, yang memerlukan data kesetimbangan uap-cair (*Vapor-Liquid Equilibrium*) untuk merancang proses pemisahan yang efisien. Penelitian ini bertujuan memprediksi data kesetimbangan uap-cair sistem biner tert-butanol+isoamil alkohol menggunakan model UNIFAC (*Univeral Quasi-Chemical Functional Group Activity Coefficients*) pada tekanan 20, 50, dan 101,325 kPa. Prediksi dilakukan melalui pendekatan kontribusi gugus fungsional untuk menghitung koefisien aktivitas masing-masing komponen. Hasil prediksi kesetimbangan uap-cair sistem biner tert-butanol+isoamil alkohol tidak menunjukkan azeotrop, sehingga pemisahan dapat dilakukan dengan distilasi sederhana.

Kata kunci: *bioetanol, isoamil alkohol, kesetimbangan uap-cair, tert-butanol, UNIFAC*

ABSTRACT

As an agrarian country, Indonesia has great potential in the development of bioethanol as an environmentally friendly renewable energy source. The product of bioethanol fermentation generally consists of a mixture of ethanol, water, and fusel oil containing components such as tert-butanol and isoamyl alcohol, thus requiring further separation. One of the commonly used purification methods is distillation, which requires vapor-liquid equilibrium (VLE) data to design an efficient separation process. This study aims to predict the vapor-liquid equilibrium data of the binary system tert-butanol+isoamyl alcohol using the UNIFAC (Univeral Quasi-Chemical Functional Group Activity Coefficients) model at pressures of 20, 50, and 101.325 kPa. The prediction is carried out through a functional group contribution approach to calculate the activity coefficients of each component. The predicted vapor-liquid equilibrium results for the binary system of tert-butanol+isoamyl alcohol do not show an azeotrope, so separation can be carried out using simple distillation.

Keywords: *bioethanol, isoamyl alcohol, vapour-liquid equilibrium, tert-butanol, UNIFAC*

1. PENDAHULUAN

Permintaan energi di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan pertambahan jumlah penduduk. Energi yang paling banyak dikonsumsi saat ini masih berasal dari bahan bakar fosil [1]. Ketergantungan terhadap energi fosil ini berdampak negatif terhadap lingkungan dan ekonomi nasional, seperti peningkatan emisi gas rumah kaca dan ketidakstabilan harga energi akibat fluktuasi pasar global [2].

Corresponding author: Asalil Mustain

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang

Jl. Soekarno-Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

E-mail: asalil89@polinema.ac.id



Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), konsumsi energi nasional pada tahun 2023 mencapai 1.220 juta SBM (setara barel minyak), meningkat sebesar 6,29% dibandingkan tahun sebelumnya [3]. Sementara itu, kapasitas produksi energi domestik belum mampu memenuhi permintaan yang terus meningkat. Oleh karena itu, pengembangan dan pemanfaatan energi terbarukan menjadi sangat penting untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil [4].

Salah satu sumber energi terbarukan yang potensial di Indonesia adalah bioetanol. Indonesia sebagai negara agraris memiliki banyak bahan baku potensial untuk produksi bioetanol seperti tebu [5], molase [6], singkong [7], dan jagung [8]. Bioetanol memiliki keunggulan dibandingkan bahan bakar fosil karena pembakarannya lebih bersih dan menghasilkan emisi gas buang yang lebih rendah [2]. Namun, pengembangan bioetanol di Indonesia masih menghadapi berbagai tantangan, terutama terkait dengan kapasitas produksinya yang masih rendah, yaitu hanya sekitar 40.000 kiloliter per tahun, jauh dari target pemerintah sebesar 1,2 juta kiloliter per tahun pada 2030 [9].

Produksi bioetanol terdiri dari tiga tahap utama, yaitu persiapan bahan baku, fermentasi, dan pemurnian [10]. Hasil dari fermentasi umumnya mengandung etanol dengan kadar 6–10% disertai dengan air dan komponen minor lainnya seperti alkohol rantai C1–C5 (seperti metanol, propanol, tert-butanol, dan isoamil alkohol), asam organik, senyawa karbonil, serta ester [11]. Untuk mendapatkan bioetanol dengan kemurnian tinggi yang dapat digunakan sebagai bahan bakar, proses distilasi diperlukan. Distilasi mampu menghasilkan etanol hingga kemurnian 90% dan menghasilkan produk bawah (*fusel oil*) yang mengandung berbagai alkohol seperti tert-butanol dan isoamil alkohol [12].

Dalam proses distilasi, data kesetimbangan uap-cair atau *Vapor-Liquid Equilibrium* (VLE) sangat penting untuk merancang kolom distilasi yang efisien [13]. Beberapa data mengenai kesetimbangan uap-cair sistem biner telah dilakukan penelitian dan tersedia dalam literatur. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa data kesetimbangan uap-cair sistem biner yang mengandung komponen hasil fermentasi dari proses produksi bioetanol telah dikaji oleh Mustain, dkk.(2019), Mustain, dkk.(2016), dan Mustain, dkk.(2016) [11,14,15]. Berdasarkan *National Institute of Standards and Technology* (NIST), data kesetimbangan uap-cair sistem biner tert-butanol+isoamil alkohol masih belum tersedia di literatur terbuka [16]. Oleh karena itu, pengukuran data kesetimbangan uap-cair perlu dilakukan terhadap sistem biner tert-butanol+isoamil alkohol.

Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah model UNIFAC (*Universal Quasi-Chemical Functional Group Activity Coefficients*), yang merupakan pengembangan dari model UNIQUAC (*Universal Quasi-Chemical*) [17]. UNIFAC menggabungkan dua komponen utama, yaitu kontribusi kombinatorial yang merepresentasikan pengaruh ukuran dan bentuk molekul, serta kontribusi residual yang menggambarkan interaksi antar gugus fungsi [18]. Pendekatan ini memungkinkan prediksi sifat termodinamika sistem multikomponen tanpa memerlukan data eksperimen yang lengkap. Menurut prinsip termodinamika, peningkatan tekanan akan menaikkan tekanan parsial komponen dan membutuhkan energi lebih besar untuk terjadinya penguapan [19]. Selain itu, keberadaan titik azeotrop dapat menghambat proses pemisahan karena komposisi fasa cair dan uap menjadi sama [20]. Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi kesetimbangan uap-cair sistem biner tert-butanol+isoamil alkohol pada tekanan 20, 50, dan 101,325 kPa menggunakan model UNIFAC.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk memprediksi data kesetimbangan uap-cair (*Vapor-Liquid Equilibrium*) dari sistem biner tert-butanol+isoamil alkohol menggunakan model UNIFAC (*Universal Quasi-Chemical Functional Group Activity Coefficients*). Metode ini dipilih karena dapat memprediksi kesetimbangan fasa tanpa data eksperimen.

2.1 Penentuan Fraksi Mol Fasa Cair

Perhitungan diawali dengan menentukan fraksi mol fasa cair (x_1) dari tert-butanol dalam campuran cair dengan variasi dari 0 hingga 1 (dengan interval 0,05). Fraksi mol isoamil alkohol (x_2) diperoleh dari hubungan:

$$x_2 = 1 - x_1 \quad (1)$$

2.2 Prediksi Aktivitas UNIFAC

Model UNIFAC digunakan untuk menghitung koefisien aktivitas (γ) masing-masing komponen. Proses perhitungan diawali dengan mengidentifikasi gugus-gugus fungsional penyusun molekul tert-butanol dan isoamil alkohol. Setelah itu, perhitungan kontribusi kombinatorial dan residual dari masing-masing senyawa dilakukan berdasarkan struktur molekulnya. Langkah selanjutnya adalah menghitung koefisien aktivitas γ_1 dan γ_2 berdasarkan fraksi mol dan parameter interaksi gugus.

2.3 Perhitungan Tekanan Total dan Fraksi Mol Uap

Prediksi dilakukan pada tiga kondisi tekanan isobarik, yaitu 20, 50, dan 101,325 kPa. Data tekanan uap jenuh (P_1^0 dan P_2^0) masing-masing komponen diperoleh dari persamaan Antoine yang dinyatakan dalam persamaan (2) dengan konstanta Antoine yang dapat dilihat pada Tabel 1 [15].

$$\ln(P^0) = A + \frac{B}{T} + C \cdot \ln T + D \cdot T^E \quad (2)$$

Tabel 1. Konstanta antoine tert-butanol dan isoamil alkohol

Komponen	A	B	C	D	E
Tert-butanol	165,362	-11589	-22,113	$1,370 \times 10^{-5}$	2
Isoamil alkohol	110,162	-10743	-13,165	$1,167 \times 10^{-17}$	6

Tekanan total sistem dihitung menggunakan metode perhitungan *bubble*:

$$P = x_1 \gamma_1 P_1^0 + x_2 \gamma_2 P_2^0 \quad (3)$$

Fraksi mol komponen dalam fasa uap dihitung dengan:

$$y_i = \frac{P_i^0 \gamma_i x_i}{P} \quad (4)$$

2.4 Plot Kurva Kesetimbangan

Hasil perhitungan berupa data pasangan (x_1, y_1) pada berbagai tekanan diplot dalam bentuk diagram T - x_1 - y_1 , yang menggambarkan hubungan antara fraksi mol fasa cair dan fasa uap terhadap temperatur pada masing-masing tekanan. Kurva ini menunjukkan karakteristik kesetimbangan uap-cair sistem biner tert-butanol+isoamil alkohol.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Prediksi kesetimbangan uap-cair (VLE) sistem biner tert-butanol+isoamil alkohol dilakukan dengan menggunakan model UNIFAC pada tiga kondisi tekanan, yaitu 20, 50, dan 101,325 kPa. Model UNIFAC merupakan pengembangan dari persamaan UNIQUAC (*Universal Quasi-Chemical*) yang menggunakan pendekatan berdasarkan gugus fungsi pada molekul untuk memprediksi koefisien aktivitas dalam campuran [17]. Model ini menggabungkan dua kontribusi utama, yaitu kontribusi kombinatorial yang mencerminkan pengaruh ukuran dan bentuk molekul, serta kontribusi residual yang menggambarkan interaksi antara kelompok fungsional dalam campuran. Persamaan UNIFAC kontribusi kombinatorial dan kontribusi residual sebagai berikut [18]:

$$\ln \gamma_i = \ln \gamma_i^C + \ln \gamma_i^R \quad (5)$$

Bagian kombinatorial dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\ln \gamma_i^C = \ln \frac{\Phi_i}{x_i} + \frac{z}{2} q_i \ln \frac{\theta_i}{\Phi_i} + l_i - \frac{\Phi_i}{x_i} \sum_j x_j l_j \quad (6)$$

$$l_i = \frac{z}{2} (r_i - q_i) - (r_i - 1) \quad (7)$$

$$\theta_i = \frac{q_i x_i}{\sum_j q_j x_j} \quad (8)$$

$$q_i = \sum_k v_k^{(i)} Q_k \quad (9)$$

$$\Phi_i = \frac{r_i x_i}{\sum_j r_j x_j} \quad (10)$$

$$r_i = \sum_k v_k^{(i)} R_k \quad (11)$$

keterangan:

θ_i = fraksi area

Φ_i = fraksi segmen

$v_k^{(i)}$ = nomor grup tipe k pada komponen i

R_k = volume grup

Q_k = Parameter area

Bagian residual dihitung dengan persamaan:

$$\ln \gamma_i^R = \sum_k v_k^{(i)} (\ln \Gamma_k - \ln \Gamma_k^i) \quad (12)$$

$$\ln \Gamma_k = Q_k \left[1 - \ln \left(\sum_m \theta_m \psi_m \right) - \sum_m \frac{\theta_m \psi_m}{\sum_m \theta_m \psi_m} \right] \quad (13)$$

$$\theta_m = \frac{Q_m x_m}{\sum_n Q_n x_n} \quad (14)$$

$$\psi_m = \exp \left(- \frac{a_{mn}}{T} \right) \quad (15)$$

keterangan:

Γ_k = koefisien aktivitas residual kelompok k dalam campuran

Γ_k^i = koefisien aktivitas residual kelompok k dalam komponen i murni

θ_m = fraksi area grup m

ψ_m = fraksi mol grup m dalam campuran

a_{mn} = parameter interaksi

Prediksi model UNIFAC menggunakan parameter interaksi antara gugus fungsi penyusun sistem untuk menghitung koefisien aktivitas pada kombinatorial dan residual. Bagian kombinatorial membutuhkan data *group specifications* yang membagi gugus fungsi menjadi parameter interaksi, data ini terdiri dari nomor kelompok (*main* dan *second number*), jumlah gugus (V_k), volume kelompok (R_k), dan luas permukaan (Q_k) yang dapat dilihat pada Tabel 2. Sedangkan, perhitungan koefisien aktivitas residual membutuhkan data *group interaction parameters* (a_{mn}) yang merupakan parameter interaksi *main group* pada masing-masing komponen sistem yang dapat dilihat pada Tabel 3 [18].

Tabel 2. UNIFAC *group specifications*

Komponen	Subgroup	Main no	Sec no	$V_k^{(i)}$	R_k	Q_k
Tert-butanol	CH ₃	1	1	3	0,9011	0,848
	C	1	4	1	0,2195	0,000
	OH	5	14	1	1,0000	1,200
Isoamil alkohol	CH ₃	1	1	2	0,9011	0,848
	CH ₂	1	2	2	0,6744	0,540
	CH	1	3	1	0,4469	0,228
	OH	5	14	1	1,0000	1,200

Tabel 3. *Group interaction parameters*

Main group	n = 1	5
m = 1	0	986,5
5	156,4	0

Prediksi model UNIFAC dimulai dengan melakukan *trial* nilai temperatur (T) sebagai variabel awal yang diasumsikan, untuk kemudian digunakan dalam perhitungan tekanan uap jenuh masing-masing komponen menggunakan persamaan Antoine. Kemudian, bagian kombinatorial dihitung berdasarkan parameter struktur molekul dan bagian residual ditentukan dari interaksi antar gugus fungsional. Setelah bagian kombinatorial dan residual diperoleh, total koefisien aktivitas dapat dihitung dan digunakan dalam persamaan *bubble point* untuk menentukan tekanan total sistem. Nilai tekanan total dihitung menggunakan pendekatan *bubble pressure calculation*, kemudian dilakukan penyesuaian melalui fitur *goal seek* pada *Microsoft Excel* untuk menyamakan nilai tekanan total dengan tekanan sistem yang ditetapkan (20, 50, dan 101,325 kPa). Setelah tekanan seimbang tercapai, nilai fraksi mol dalam fasa uap (y_1) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan kesetimbangan uap-cair yang menggunakan koefisien aktivitas. Prosedur ini diulang untuk berbagai komposisi (x_1) dari 0 hingga 1, sehingga diperoleh kurva kesetimbangan uap-cair sistem biner tert-butanol+isoamil alkohol pada tekanan tertentu. Seluruh data hasil prediksi kemudian disusun

dalam bentuk tabel dan divisualisasikan dalam bentuk kurva seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4-6 dan Gambar 1.

Tabel 4. Hasil prediksi kesetimbangan uap-cair sistem biner tert-butanol+isoamil alkohol pada 20 kPa dengan menggunakan model UNIFAC

$T (^{\circ}\text{C})$	x_1	y_1
89,89	0,00	0,0000
84,14	0,05	0,2737
79,40	0,10	0,4535
75,41	0,15	0,5774
72,01	0,20	0,6664
69,05	0,25	0,7325
66,46	0,30	0,7830
64,15	0,35	0,8225
62,09	0,40	0,8540
60,22	0,45	0,8796
58,51	0,50	0,9008
56,95	0,55	0,9185
55,51	0,60	0,9334
54,17	0,65	0,9462
52,93	0,70	0,9572
51,76	0,75	0,9667
50,67	0,80	0,9751
49,64	0,85	0,9824
48,67	0,90	0,9890
47,75	0,95	0,9948
46,88	1	1

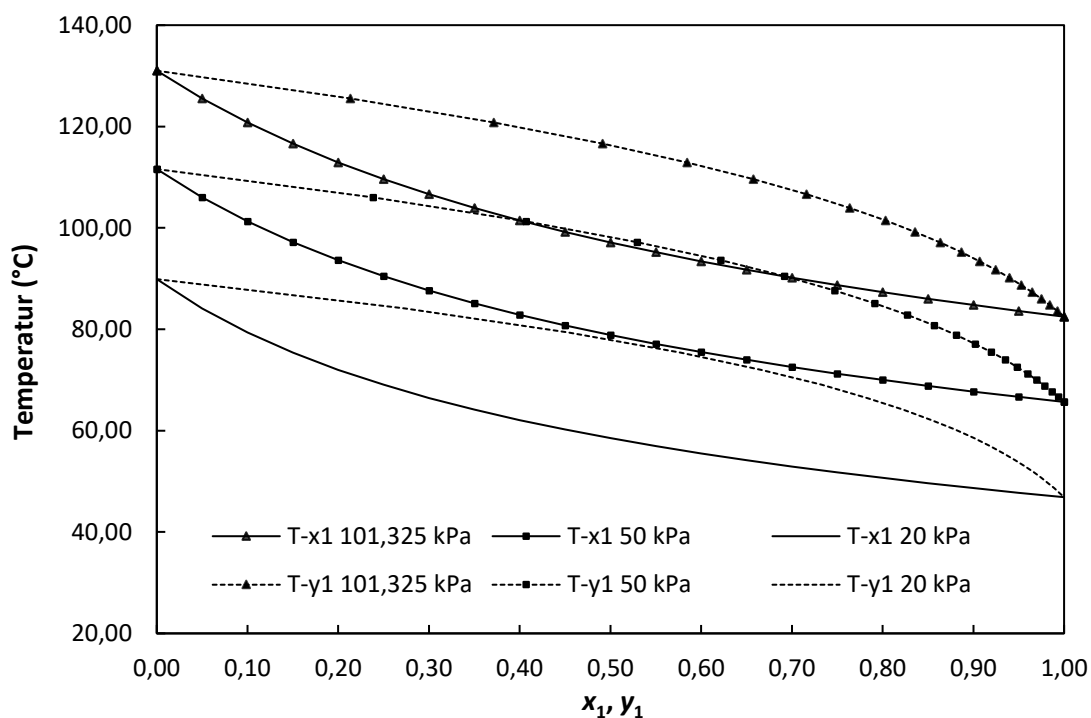
Tabel 5. Hasil prediksi kesetimbangan uap-cair sistem biner tert-butanol+isoamil alkohol pada 50 kPa dengan menggunakan model UNIFAC

$T (^{\circ}\text{C})$	x_1	y_1
111,60	0	0
106,04	0,05	0,2385
101,29	0,10	0,4068
97,19	0,15	0,5294
93,62	0,20	0,6213
90,47	0,25	0,6918
87,66	0,30	0,7471
85,14	0,35	0,7912
82,86	0,40	0,8271
80,78	0,45	0,8566
78,88	0,50	0,8813
77,12	0,55	0,9020
75,50	0,60	0,9197
73,98	0,65	0,9349
72,57	0,70	0,9481
71,25	0,75	0,9596
70,01	0,80	0,9697
68,83	0,85	0,9786
67,72	0,90	0,9866

$T (^{\circ}\text{C})$	x_1	y_1
66,67	0,95	0,9936
65,67	1	1

Tabel 6. Hasil prediksi kesetimbangan uap-cair sistem biner tert-butanol+isoamil alkohol pada 101,325 kPa dengan menggunakan model UNIFAC

$T (^{\circ}\text{C})$	x_1	y_1
131,02	0	0
125,57	0,05	0,2132
120,82	0,10	0,3714
116,63	0,15	0,4914
112,93	0,20	0,5842
109,61	0,25	0,6574
106,63	0,30	0,7160
103,93	0,35	0,7637
101,47	0,40	0,8030
99,21	0,45	0,8357
97,13	0,50	0,8633
95,21	0,55	0,8868
93,42	0,60	0,9070
91,75	0,65	0,9244
90,19	0,70	0,9395
88,72	0,75	0,9528
87,33	0,80	0,9646
86,02	0,85	0,9750
84,78	0,90	0,9842
83,61	0,95	0,9925
82,49	1	1



Gambar 1. Perbandingan hasil prediksi kesetimbangan uap-cair sistem biner tert-butanol+isoamil alkohol pada tekanan 20, 50, dan 101,325 kPa dengan menggunakan model UNIFAC.

Hasil prediksi kesetimbangan uap-cair sistem biner tert-butanol+isoamil alkohol menunjukkan bahwa tekanan berpengaruh langsung terhadap temperatur kesetimbangan yang dibutuhkan dalam proses distilasi. Semakin tinggi tekanan operasi, maka semakin tinggi suhu yang diperlukan untuk mencapai kesetimbangan. Tekanan 20 kPa menghasilkan suhu kesetimbangan dalam rentang 46,88°C hingga 89,89°C. Tekanan 50 kPa meningkatkan rentang suhu kesetimbangan menjadi 65,67°C hingga 111,60°C. Sementara itu, tekanan 101,325 kPa menghasilkan suhu kesetimbangan yang lebih tinggi, yaitu antara 82,49°C hingga 131,02°C. Hal ini sesuai dengan prinsip termodinamika yang menyatakan bahwa tekanan dan temperatur dalam sistem kesetimbangan fasa berbanding lurus. Peningkatan tekanan ini menyebabkan naiknya tekanan parsial uap dari masing-masing komponen. Akibatnya, sistem memerlukan energi (panas) lebih besar agar komponen dalam campuran dapat berpindah ke fasa uap [19].

Berdasarkan hasil prediksi kesetimbangan uap-cair sistem biner tert-butanol+isoamil alkohol menggunakan model UNIFAC, menunjukkan bahwa pemisahan dapat dilakukan menggunakan proses distilasi konvensional pada tekanan 20, 50, dan 101,325 kPa. Gambar 1 menunjukkan bahwa sistem biner tersebut tidak memiliki titik azeotrop, yaitu kondisi di mana komposisi fasa cair sama dengan komposisi fasa uap, yang umumnya menyulitkan proses pemisahan secara distilasi sederhana [20]. Oleh karena itu, pemisahan kedua komponen dapat dilakukan tanpa memerlukan metode tambahan.

4. KESIMPULAN

Hasil prediksi kesetimbangan uap-cair sistem biner tert-butanol+isoamil alkohol pada tekanan 20, 50, dan 101,325 kPa menggunakan model UNIFAC tidak menunjukkan adanya titik azeotrop, sehingga pemisahan sistem biner tert-butanol+isoamil alkohol dapat dilakukan dengan distilasi sederhana tanpa memerlukan metode tambahan.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan data prediksi yang diperoleh dikorelasikan dengan model lain, seperti NRTL (*Non-Random Two-Liquid*), UNIQUAC, dan Wilson untuk memastikan akurasi yang lebih tinggi dalam prediksi kesetimbangan uap-cair.

REFERENSI

- [1] L. Arlianti, "Bioetanol Sebagai Sumber Green Energy Alternatif yang Potensial Di Indonesia," *Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Teknik Universitas Islam Syekh-Yusuf*, vol. 5, no. 1, 2018.
- [2] N. Hidayat dan G. D. D. Puspita, "Pabrik Bioetanol Dari Molase Melalui Fermentasi dengan Pemurnian Distilasi dan Adsorpsi," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [3] Energi dan Sumber Daya Mineral, *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2023*. Jakarta: Ministry of Energy and Mineral Resources Republic of Indonesia, 2024.
- [4] G. Lahope, "Implementasi Kebijakan Energi Nasional (KEN) Indonesia Menuju 23% Target Bauran Energi Baru Terbarukan (EBT) 2025," *Jurnal Darma Agung*, vol. 32, no. 1, hal. 124–135, 2024.
- [5] W. B. Utama, R. Kartika, dan E. Akkas, "Pembuatan Bioetanol Melalui Fermentasi Nira Tebu (*Saccharum officinarum*) Menggunakan *Saccharomyces cerevisiae* Dengan Penambahan Vitamin B Kompleks Sebagai Nutrisi Fermentasi," *Jurnal Kimia Mulawarman*, vol. 13, no. 2, 2016.
- [6] N. P. R. Artini dan I. G. N. A. W. Wartana, "The Effect Of Fermentation Time On Bioethanol Production From Molasses," *Surabaya : The Journal of Muhamadiyah Medical Laboratory Technologist*, vol. 6, no. 6, hal. 87–96, 2023.
- [7] D. Guntama, Y. Herdiana, U. A. Sujiana, R. L. Endes, dan E. Sunandar, "Bioethanol Dari Limbah Kulit Singkong (*Manihot Esculenta Crantz*) Melalui Metode Hidrolisa Dan Fermentasi Dengan Bantuan *Saccharomyces Cerevisiae*," *Jurnal Teknologi*, vol. 7, no. 1, hal. 86–96, 2019.
- [8] Albert, N. Idiawati, dan Rudiyanasyah, "Pembuatan Bioetanol Menggunaka *Zymomonas mobilis* dari Limbah Tongkol Jagung," *Jurnal Kartika Kimia*, vol. 4, no. 2, hal. 72–75, 2015.
- [9] Ministry of Energy and Mineral Resources Republic of Indonesia, *Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia 2022*. 2023.
- [10] A. Y. Rentaningtyas, R. R. Hidayat, Widiyastuti, dan S. Winardi, "Studi Awal Proses Fermentasi pada Desain Pabrik Bioethanol dari Molasses," *Jurnal Teknik Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, vol. 6, hal. 1, 2017.
- [11] A. Mustain, K. Sa'diyah, A. Ari Wibowo, dan D. Hartanto, "Parameter Interaksi Biner Kesetimbangan Uap-Cair Campuran yang Melibatkan Alkohol Rantai Bercabang atau Aseton untuk Optimasi Proses Pemurnian Bioetanol," *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan*, vol. 3, no. 2, hal. 53–61, 2019.

- [12] F. S. Erdiyanti dan A. Mustain, "Prediksi Keseimbangan Uap-Cair Sistem Biner tersier Butanol + Isoamil Alkohol Menggunakan hukum Raoult," *Jurnal Teknologi Separasi Distilat*, vol. 5, no. 2, hal. 178–183, 2019.
- [13] A. T. Kurnia dan A. Mustain, "Prediksi Keseimbangan Uap-Cair Sistem Biner Tert-Butanol + 1-Pentanol dengan Menggunakan Model UNIFAC," *Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 8, no. 1, hal. 104110, 2022.
- [14] A. Mustain, D. Hartanto, dan S. Altway, "Compilation of Extended Binary Interaction Parameters for Alcohols mixtures Encountered in Alcohol Separation Process," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, no. 5, 2016.
- [15] A. Mustain, A. Takwanto, dan D. Hartanto, "Parameter interaksi Biner Keseimbangan Uap-Cair Campuran Alkohol untuk Optimasi proses Pemurnian Bioetanol," *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, vol. 5, no. 2, hal. 37–44, 2016.
- [16] National Institute of Standards and Technology (NIST), "Vapor-Liquid Equilibrium Data."
- [17] D. Hartanto dan D. B. Triwibowo, "Review Model dan Parameter Interaksi pada Korelasi Keseimbangan Uap-Cair dan Cair-Cair Sistem Etanol (1) + Air (2) + Ionic Liquids (3) dalam Pemurnian Bioetanol," *Jurnal Rekayasa Proses*, vol. 8, no. 1, 2014.
- [18] B. E. Poling, J. M. Prausnitz, dan J. P. O'connell, *The Properties of Gases and Liquids*, 5 ed. New York: McGRAW-HILL, 2001.
- [19] J. M. . Smith, H. C. . Van Ness, dan M. M. . Abbott, *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. McGraw-Hill, 2005.
- [20] F. D. Nugroho, F. Rakhmawati, D. Hartanto, dan R. D. A. Putri, "Prediksi Keseimbangan Uap-Cair Sistem Biner Tert-Butanol (1) + 1-Propanol (2) Menggunakan UNIFAC," *Jurnal Kompetensi Teknik*, vol. 9, no. 1, 2017.