

PREDIKSI KESETIMBANGAN UAP - CAIR SISTEM BINER ASETON + *n*-PENTANOL MENGGUNAKAN MODEL UNIFAC

Vira Cintya Ramadhani dan Asalil Mustain

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia
vira.cintya01@gmail.com; [asalil89@polinema.ac.id]

ABSTRAK

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi, cadangan bahan bakar fosil mengalami penurunan sehingga perlu adanya energi alternatif sebagai pengganti. Salah satu energi alternatif pengganti bahan bakar fosil adalah bioetanol. Bioetanol diproduksi dengan cara fermentasi dengan produk utama yang dihasilkan yaitu campuran etanol dan air serta produk samping berupa *fusel oil*. Kandungan pada *fusel oil* harus dipisahkan supaya mendapatkan etanol dengan kemurnian yang tinggi, salah satunya yaitu dengan distilasi. Dalam perancangan dan pengoptimalan proses distilasi maka diperlukan berbagai macam informasi, salah satunya yaitu data kesetimbangan uap - cair dari pasangan komponen yang akan dimurnikan. Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi data kesetimbangan uap - cair menggunakan model UNIFAC pada tekanan 20, 50, dan 101,325 kPa. Prediksi kesetimbangan uap - cair sistem biner aseton + *n*-pentanol dilakukan menggunakan model UNIFAC dengan variabel yang digunakan yaitu tekanan 20, 50, dan 101,325 kPa dan fraksi mol fase cair pada rentang 0 – 1 dengan interval 0,05. Hasil prediksi kesetimbangan uap - cair sistem biner aseton + *n*-pentanol tidak menunjukkan adanya azeotrop sehingga pemisahan dapat dilakukan secara distilasi sederhana.

Kata kunci: aseton, bioetanol, kesetimbangan uap - cair, *n*-pentanol, UNIFAC

ABSTRACT

Along with the increasing need for energy, fossil fuel reserves are decreasing so there is a need for alternative energy as a substitute. One of the alternative energy substitutes for fossil fuels is bioethanol. Bioethanol is produced by fermentation with the main product produced is a mixture of ethanol and water and fusel oil as a by-product. The content in fusel oil must be separated in order to obtain ethanol with high purity, one of which is by distillation. In designing and optimizing the distillation process, various kinds of information are needed, one of which is the vapor-liquid equilibrium data of the component pair to be purified. This study aims to predict liquid vapor equilibrium data using the UNIFAC model at pressures of 20, 50, and 101.325 kPa. The prediction of liquid vapor equilibrium of acetone + *n*-pentanol binary system was carried out with UNIFAC model with the variables used are pressure 20, 50, and 101.325 kPa and liquid mole fraction liquid in the range of 0 - 1 with interval 0.05. The liquid vapor equilibrium prediction results of the acetone + *n*-pentanol binary system did not show the presence of azeotropes so that the separation can be done by simple distillation.

Keywords: acetone, bioethanol, vapor - liquid equilibrium, *n*-pentanol, UNIFAC

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi dalam memenuhi kebutuhan manusia, cadangan bahan bakar fosil mengalami penurunan. Pemanfaatan sumber daya alam yang dapat diperbarui perlu dilakukan sebagai alternatif energi pengganti bahan bakar fosil, seperti biofuel berupa bioetanol untuk memenuhi kebutuhan energi [1]. Keunggulan pemanfaatan bioetanol yaitu meningkatkan kualitas lingkungan, meningkatkan

pertumbuhan ekonomi, serta dapat mengurangi ketergantungan dalam penggunaan bahan bakar fosil [2].

Bioetanol merupakan bioenergi yang dapat diperbarui dengan sedikit polusi dan dapat diproduksi dari bahan-bahan yang mengandung gula dan pati, seperti jagung, kentang, gandum, tebu, molases dan lain sebagainya [3]. Bioetanol diproduksi secara fermentasi dengan produk yang dihasilkan yaitu campuran etanol dengan air dan alkohol dengan rantai karbon C1 – C5 serta produk samping berupa *fusel oil*. Untuk mendapatkan bioetanol dengan kemurnian tinggi, maka diperlukan proses pemurnian, salah satunya adalah proses distilasi [4]. Kandungan yang terdapat pada *fusel oil* sebagai produk samping yaitu berupa isoamil alkohol (49,13 – 74,70 wt%), etanol (1,10 – 16,22 wt%), isobutanol (1,30 – 11,30 wt%) dan air (4,1 – 16,4 wt%) [5]. Sedangkan, komposisi kandungan aseton (0,001 wt%) dan *n*-pentanol (0,005 wt%) [6]. *Fusel oil* tidak dapat langsung dibuang ke lingkungan karena dapat menyebabkan kerusakan lingkungan yang tidak diinginkan [7]. *Fusel oil* hasil fermentasi memiliki efek buruk pada spesifikasi produk akhir, sehingga perlu dipisahkan lebih lanjut [8]. Salah satu proses pemisahannya yaitu distilasi, karena prinsip kerjanya yang mudah dan banyak digunakan dalam produksi bahan bakar secara luas. Dalam perancangan dan pengoptimalan proses distilasi maka diperlukan berbagai macam informasi, salah satunya yaitu data kesetimbangan uap - cair dari pasangan komponen yang akan dimurnikan [9]. Data kesetimbangan uap - cair suatu campuran dapat digunakan untuk menentukan desain kolom distilasi seperti jumlah *tray* dan ketinggian kolom distilasi [10]. Data kesetimbangan uap – cair sistem biner dapat digunakan untuk optimasi desain kolom distilasi pada proses pemurnian produksi bioetanol [11].

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Mustain, dkk. (2019), sistem biner campuran alkohol primer dengan alkohol rantai C5 sebanyak 15 sistem telah dilakukan pada tekanan 1 atm dengan korelasi *Wilson*, NRTL, dan UNIQUAC dengan hasil RMSD yang relatif kecil antara eksperimen dan perhitungan [12]. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Kurnia dan Mustain (2022), data kesetimbangan uap - cair sistem biner tert-butanol + 1-pentanol telah diprediksi menggunakan model UNIFAC yang menunjukkan tidak adanya azeotrop [13].

Berdasarkan literatur terbuka atau *NIST (National Institute of Standards and Technology)*, data kesetimbangan uap - cair sistem biner aseton + *n*-pentanol belum tersedia. Prediksi kesetimbangan uap - cair sistem biner aseton + *n*-pentanol yang dilakukan pada tekanan 20, 50, dan 101,325 kPa bertujuan untuk mendapatkan data kesetimbangan uap - cair menggunakan model UNIFAC pada masing-masing tekanan dan fraksi mol fase cair pada rentang 0 – 1 dengan interval 0,05.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan untuk memprediksi data kesetimbangan uap - cair sistem biner aseton + *n*-pentanol menggunakan model *Universal Quasi-Chemical Functional Group Activity Coefficients* (UNIFAC). Model UNIFAC bisa digunakan sebagai alternatif untuk memprediksi kesetimbangan fase apabila data eksperimen tidak diketahui [13].

2.1. Penentuan Fraksi Mol Fase Cair

Prediksi kesetimbangan uap - cair sistem biner aseton + *n*-pentanol diawali dengan menentukan fraksi mol fase cair aseton + *n*-pentanol dalam campuran pada rentang 0 hingga 1 dengan interval 0,05.

2. 2. Prediksi Aktivitas Model UNIFAC

Model UNIFAC merupakan model dengan basis persamaan UNIQUAC dengan menggunakan gugus fungsi dari molekul dalam suatu campuran untuk dapat menghitung koefisien aktivitas [13]. Persamaan UNIFAC memanfaatkan interaksi masing-masing kelompok fungsional pada molekul serta interaksi koefisien biner [14]. Persamaan UNIFAC terdiri atas bagian kombinatorial dan *residual*, seperti pada Persamaan (1) [15].

$$\ln \gamma_i = \ln \gamma_i^C + \ln \gamma_i^R \quad (1)$$

Bagian kombinatorial dihitung dengan menggunakan Persamaan (2) hingga (7).

$$\ln \gamma_i^C = \ln \frac{\phi_i}{x_i} + \frac{z}{2} q_i \ln \frac{\theta_i}{\phi_i} + l_i - \frac{\phi_i}{x_i} \sum_j x_j l_{ij} \quad (2)$$

$$l_i = \frac{z}{2} (r_i - q_i) - (r_i - 1) \quad (3)$$

$$\theta_i = \frac{q_i x_i}{\sum_j q_j x_j} \quad (4)$$

$$q_i = \sum_k v_k^{(i)} Q_k \quad (5)$$

$$\Phi_i = \frac{r_i x_i}{\sum_j r_j x_j} \quad (6)$$

$$r_i = \sum_k v_k^{(i)} R_k \quad (7)$$

Keterangan:

θ_i = fraksi area

Φ_i = fraksi segmen

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

R_k dan Q_k = parameter grup yang diperoleh dari *Van Der Waals* (volume grup dan luas permukaan)

Bagian *residual* dapat dihitung dengan Persamaan (8) hingga (11).

$$\ln \gamma_i^R = \sum_k v_k^{(i)} (\ln \Gamma_k - \ln \Gamma_k^i) \quad (8)$$

$$\ln \Gamma_k = Q_k \left[1 - \ln \left(\sum_m \theta_m \psi_m \right) - \sum_m \frac{\theta_m \psi_m}{\sum_m \theta_m \psi_m} \right] \quad (9)$$

$$\theta_m = \frac{Q_m x_m}{\sum_n Q_n x_n} \quad (10)$$

$$\psi_m = \exp \left(- \frac{a_{mn}}{T} \right) \quad (11)$$

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

2. 3. Perhitungan Tekanan Total dan Fraksi Mol Uap

Penelitian prediksi kesetimbangan uap - cair dilakukan pada tekanan 20, 50, dan 101,325 kPa. Tekanan uap jenuh masing-masing komponen dihitung menggunakan persamaan Antoine pada Persamaan (12). Sedangkan, konstanta Antoine diperoleh dari Tabel 1 [12].

$$\ln P_i^{\text{sat}} = A_1 + \frac{B_2}{T+C_3} + D_4T + E_5 \ln T \quad (12)$$

Tabel 1. Konstanta antoine aseton dan *n*-pentanol

Komponen	A1	B2	C3	D4	E5
Aseton	62,098	-5599,6	0	0	-7,0985
<i>n</i> -pentanol	107,842	-10643	0	0	-12,858

Tekanan total sistem dihitung menggunakan Persamaan (13) dengan metode perhitungan *bubble*:

$$P = x_1 \gamma_1 P_i^{\text{sat}} + x_2 \gamma_2 P_j^{\text{sat}} \quad (13)$$

Fraksi mol komponen dalam fase uap dihitung dengan menggunakan Persamaan (14):

$$y_i = \frac{P_i^{\text{sat}} \gamma_i x_i}{P} \quad (14)$$

Keterangan:

- y_i = fraksi mol fase uap kondisi setimbang
- x_i = fraksi mol fase cair kondisi setimbang
- P = tekanan total (kPa)
- P_{ij}^{sat} = tekanan uap dari komponen murni *i* dan *j* (kPa)
- γ = koefisien aktivitas
- T = temperatur (K)
- $A_1 - E_5$ = konstanta Antoine komponen

2. 4. Plot Kurva Kesetimbangan

Data hasil perhitungan berupa (x_1, y_1) pada masing-masing tekanan diplot dalam grafik $T-x_1-y_1$ (temperatur terhadap fraksi mol fase cair dan fraksi mol fase uap pada masing-masing tekanan). Kurva ini menunjukkan kesetimbangan uap - cair sistem biner aseton + *n*-pentanol.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian prediksi kesetimbangan uap - cair sistem biner aseton + *n*-pentanol, data diprediksi dengan menggunakan model UNIFAC pada tekanan 20, 50, dan 101,325 kPa. Tekanan uap jenuh komponen pada masing-masing tekanan dihitung menggunakan persamaan Antoine pada Persamaan (12).

Prediksi kesetimbangan uap - cair sistem biner aseton + *n*-pentanol pada tekanan 20, 50, dan 101,325 kPa dilakukan dengan model UNIFAC dengan menghitung bagian kombinatorial dan *residual*. Bagian kombinatorial membutuhkan data *group specifications* yang membagi gugus fungsi menjadi parameter interaksi. Data terdiri dari nomor kelompok yaitu *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 bagian *residual*

membutuhkan data *Group Interaction Parameters* (a_{mn}) yang merupakan parameter interaksi antara *main group* masing-masing komponen yang dapat dilihat pada Tabel 3 [15].

Tabel 2. UNIFAC group specification

Komponen	Subgroup	Main no	Sec no	$V_k^{(i)}$	R_k	Q_k
Aseton	CH ₃	1	1	1	0,9011	0,848
	CH ₃ CO	9	18	1	1,6724	1,488
n-Pentanol	CH ₃	1	1	1	0,9011	0,8480
	CH ₂	1	2	4	0,6744	0,5400
	OH	5	14	1	1	1,2

Tabel 3. UNIFAC group interaction parameters (a_{mn})

Main group	n = 1	5	9
m = 1	0	986,5	476,4
5	156,4	0	84
9	26,76	164,5	0

Dalam prediksi kesetimbangan uap - cair sistem biner dengan menggunakan model UNIFAC, tekanan total sistem ditentukan dari total koefisien aktivitas menggunakan persamaan *bubble point*. Nilai tekanan total sistem dihitung dengan menggunakan pendekatan *bubble pressure calculation*, dan dilakukan penyesuaian melalui fitur *goal seek* pada *Microsoft Excel* untuk menyamakan nilai tekanan total dengan tekanan sistem yang ditetapkan, yaitu pada tekanan 20, 50, dan 101,325 kPa. Nilai fraksi mol fase uap (y_1) dihitung menggunakan persamaan kesetimbangan uap - cair yang menggunakan koefisien aktivitas untuk berbagai komposisi (x_1) pada rentang 0 hingga 1, sehingga diperoleh kurva kesetimbangan uap - cair sistem biner aseton + n-pentanol pada tekanan yang telah ditetapkan. Data hasil prediksi kesetimbangan uap - cair sistem biner pada tekanan 20, 50, dan 101,325 kPa yang dilakukan dengan menggunakan model UNIFAC diperoleh fraksi mol cair dan uap tiap komponen masing-masing ditunjukkan pada Tabel 4, 5, dan 6.

Tabel 4. Hasil prediksi kesetimbangan uap - cair sistem biner aseton + n-pentanol pada tekanan 20 kPa dengan model UNIFAC

T (K)	x_1	y_1
368,2	0,0000	0,0000
351,0	0,0500	0,9993
333,7	0,1000	0,9986
325,1	0,1500	0,9979
318,9	0,2000	0,9970
314,3	0,2500	0,9961
310,6	0,3000	0,9951
307,6	0,3500	0,9939
305,1	0,4000	0,9924
302,9	0,4500	0,9907
301,0	0,5000	0,9886
299,4	0,5500	0,9858

T (K)	x_1	y_1
297,8	0,6000	0,9822
296,5	0,6500	0,9773
295,2	0,7000	0,9703
294,0	0,7500	0,9595
292,8	0,8000	0,9419
291,7	0,8500	0,9096
290,6	0,9000	0,8412
289,6	0,9500	0,5781
288,5	1,0000	0,0000

(lanjutan)

Tabel 5. Hasil prediksi kesetimbangan uap - cair sistem biner aseton + *n*-pentanol pada tekanan 50 kPa dengan model UNIFAC

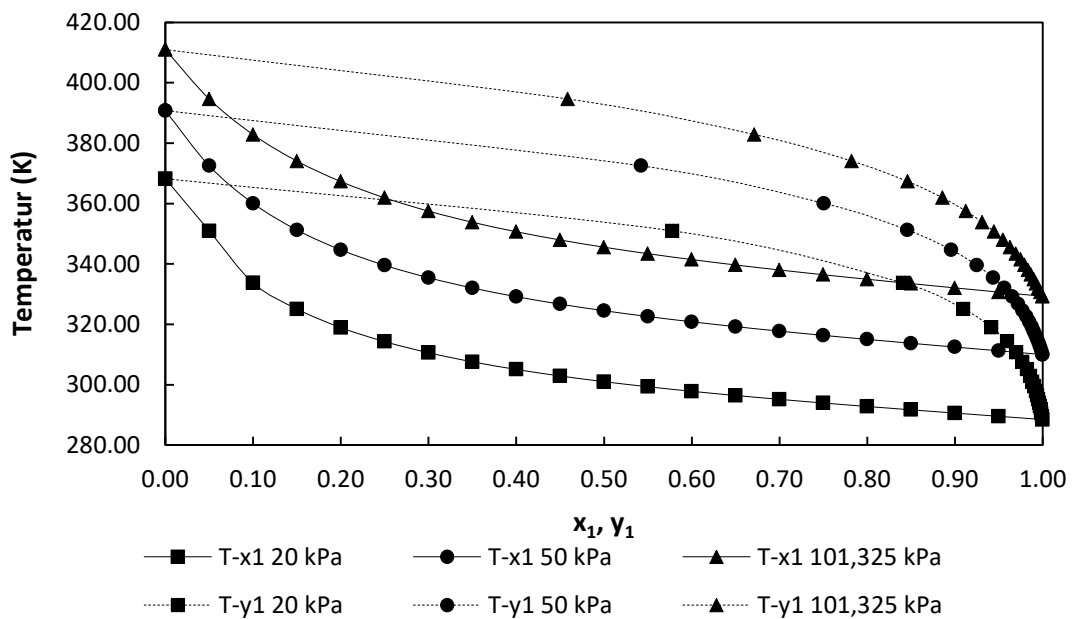
T (K)	x_1	y_1
390,8	0,0000	0,0000
372,5	0,0500	0,5424
360,1	0,1000	0,7507
351,2	0,1500	0,8457
344,7	0,2000	0,8957
339,6	0,2500	0,9250
335,4	0,3000	0,9437
332,0	0,3500	0,9564
329,2	0,4000	0,9654
326,7	0,4500	0,9722
324,5	0,5000	0,9774
322,6	0,5500	0,9815
320,9	0,6000	0,9848
319,3	0,6500	0,9876
317,8	0,7000	0,9900
316,4	0,7500	0,9921
315,0	0,8000	0,9940
313,7	0,8500	0,9957
312,5	0,9000	0,9972
311,2	0,9500	0,9986
310,0	1,0000	1,0000

Tabel 6. Hasil prediksi kesetimbangan uap - cair sistem biner aseton + *n*-pentanol pada tekanan 101,325 kPa dengan model UNIFAC

T (K)	x_1	y_1
411,0	0,0000	0,0000
394,6	0,0500	0,4589
382,8	0,1000	0,6716

T (K)	x_1	y_1
374,1	0,1500	0,7825
367,3	0,2000	0,8463
361,9	0,2500	0,8861
357,5	0,3000	0,9126
353,8	0,3500	0,9311
350,7	0,4000	0,9447
347,9	0,4500	0,9550
345,5	0,5000	0,9631
343,4	0,5500	0,9696
341,5	0,6000	0,9750
339,7	0,6500	0,9795
338,0	0,7000	0,9834
336,4	0,7500	0,9868
334,9	0,8000	0,9899
333,5	0,8500	0,9927
332,1	0,9000	0,9953
330,7	0,9500	0,9977
329,3	1,0000	1,0000

(lanjutan)



Gambar 1. Perbandingan hasil prediksi kesetimbangan uap - cair sistem biner aseton + *n*-pentanol pada tekanan 20, 50, dan 101,325 kPa dengan menggunakan model UNIFAC

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Erdiyanti dan Mustain (2019), hasil prediksi kesetimbangan uap - cair sistem biner Tersier Butanol + Isoamil Alkohol menunjukkan hasil yang hampir sama antara eksperimen dengan perhitungan yang di korelasi dengan menggunakan model UNIQUAC. Namun, diperlukan penetapan interval

fraksi mol yang lebih kecil agar hasil perhitungan dan korelasi menghasilkan kurva yang lebih baik [11]. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Kurnia dan Mustain (2022), hasil prediksi kesetimbangan uap - cair sistem biner tert-butanol + 1-Pentanol menggunakan model UNIFAC menunjukkan hasil yang baik pula, yaitu hasil eksperimen hampir sama dengan perhitungan model UNIFAC, serta tidak menunjukkan adanya azeotrop [13]. Meskipun demikian, penelitian - penelitian terdahulu tersebut masih terbatas pada satu kondisi tekanan, yaitu 101,325 kPa. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan pada interval fraksi mol yang lebih kecil dan pada berbagai kondisi tekanan, untuk mengetahui pengaruh tekanan terhadap hasil prediksi kesetimbangan uap - cair sistem biner aseton + n-pentanol.

Kurva prediksi kesetimbangan uap - cair sistem biner aseton + n-pentanol pada tekanan 20, 50, dan 101,325 kPa ditunjukkan pada Gambar 1. Hasil prediksi kesetimbangan uap - cair sistem biner aseton + n-pentanol pada berbagai tekanan, sebagaimana pada Gambar 1, menunjukkan bahwa sistem tersebut tidak memiliki titik azeotrop. Kondisi azeotrop terjadi apabila komposisi fase cair sama dengan komposisi fase uap sehingga sulit untuk dilakukan pemisahan secara distilasi sederhana [14]. Sehingga, sistem biner aseton + n-pentanol dapat dipisahkan melalui proses distilasi sederhana.

Berdasarkan Gambar 1, kurva kesetimbangan uap - cair menunjukkan bahwa tekanan berpengaruh terhadap temperatur kesetimbangan. Pada tekanan 20 kPa, titik temperatur *bubble* dan *dew* lebih rendah dibandingkan dengan temperatur pada tekanan 50 dan 101,325 kPa. Hal ini sesuai dengan literatur, yang menyatakan bahwa semakin tinggi tekanan, maka temperatur yang dibutuhkan juga semakin besar [16].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, data hasil prediksi kesetimbangan uap - cair sistem biner aseton + n-pentanol telah diprediksi dengan baik menggunakan model UNIFAC pada tekanan 20, 50, dan 101,325 kPa. Hasil prediksi kesetimbangan uap - cair menunjukkan bahwa campuran komponen tersebut tidak memiliki titik azeotrop pada ketiga tekanan yang ditetapkan. Sehingga, pemisahan sistem biner aseton + n-pentanol dapat dilakukan secara distilasi sederhana.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan data prediksi kesetimbangan uap - cair dikorelasikan dengan model lain, seperti NRTL, *Wilson*, dan UNIQUAC untuk memastikan data yang dihasilkan memiliki akurasi yang lebih tinggi.

REFERENSI

- [1] Hardjono, A. Mustain, P. H. Suharti, D. Hartanto, dan I. Khoiroh, "Isobaric Vapor-Liquid Equilibrium of 2-Propanone+2-Butanol System at 101.325 kPa: Experimental and Molecular Dynamics Simulation," *Korean Journal Chemical Engineering*, vol. 34, no. 7, hal. 2011–2018, 2017.
- [2] A. Nonce dan M. Jahiding, "Produksi dan Karakterisasi Bioetanol dari Singkong Menggunakan Metode Destilasi Bertingkat," *Jurnal Aplikasi Fisika*, vol. 15, no. 2, hal. 60–65, 2019.
- [3] Y. Susmiati, "Prospek Produksi Bioetanol dari Limbah Pertanian dan Sampah Organik," *Industria: Jurnal Teknologi dan Manajemen Agroindustri*, vol. 7, no. 2, hal. 67–80, 2018.
- [4] B. Susilo, S. Sumarlan, dan D. Feminda Nurirenia, "Pemurnian Bioetanol Menggunakan Proses Distilasi Dan Adsorpsi Dengan Penambahan Asam Sulfat (H_2SO_4) Pada Aktivasi Zeolit Alam Sebagai Adsorben," *Jurnal Keteknik Pertanian Tropis dan Biosistem*, vol.

- 5, no. 1, hal. 19–26, 2017.
- [5] T. B. Massa, D. T. Raspe, M. C. Feiten, L. Cardozo-Filho, dan C. da Silva, “Fusel Oil: Chemical Composition and an Overview of Its Potential Application,” *Journal of The Brazilian Chemical Society*, vol. 34, no. 2, hal. 153–166, 2022.
- [6] K. Matugi, O. Chiavone-Filho, M. P. De Arruda Ribeiro, R. De Pelegrini Soares, dan R. De Campos Giordano, “Vapor-Liquid Equilibrium Calculation for Simulation of Bioethanol Concentration from Sugarcane,” *Brazilian Journal Chemical Engineering*, vol. 35, no. 2, hal. 341–352, 2018.
- [7] N. Rahmatillah dan A. Mustain, “Prediksi Kesetimbangan Uap-Cair Sistem Biner Aseton + Amil Alkohol Menggunakan Hukum Raoult,” *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 5, no. 2, hal. 63–68, 2019.
- [8] A. Y. Retnaningtyas, R. R. Hidayat, Widiyastuti, dan S. Winardi, “Studi Awal Proses Fermentasi Pada Desain Pabrik Bioethanol dari Molases,” *Jurnal Teknik ITS*, vol. 6, no. 1, hal. 123–126, 2017.
- [9] A. Mustain, D. Hartanto, dan S. Altway, “Compilation of Extended Binary Interaction Parameters for Alcohols Mixtures Encountered in Alcohol Separation Process,” *ARPN Journal of Engineering Applied Sciences.*, vol. 11, no. 5, hal. 3465–3472, 2016.
- [10] A. Mustain, A. Takwanto, dan 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.
- [11] F. S. Erdiyanti dan A. Mustain, “Prediksi Kesetimbangan Uap-Cair Sistem Biner Tersier Butanol + Isoamil Alkohol Menggunakan Hukum Raoult,” *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 5, no. 2, hal. 178–183, 2019.
- [12] A. Mustain, K. Sa’diyah, A. A. 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.
- [13] A. T. Kurnia dan A. Mustain, “Prediksi Kesetimbangan Uap-Cair Sistem Biner Tert-Butanol + 1-Pentanol Dengan Menggunakan Model UNIFAC,” *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 8, no. 1, hal. 104–110, 2022.
- [14] F. D. Nugroho, F. Rakhmawati, D. Hartanto, dan A. Putri, “Prediksi Kesetimbangan Uap-Cair Sistem Biner Tert-Butanol (1) + 1-Propanol (2) Menggunakan UNIFAC,” *Jurnal Kompetensi Teknik*, vol. 9, no. 1, hal. 29–36, 2017.
- [15] B. E. Poling dan J. M. Prausnitz, *The properties of Gases and Liquids*, 5th edition. New York: McGraw-Hill, 1987.
- [16] J. M. Smith, *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, 8th edition. New York: McGraw-Hill Education, 1996.