EVALUASI KOMPARATIF PEMILIHAN PELARUT EKSTRAKSI AROMATIK DARI REFORMATE BERBASIS *ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS*

Rafly Abdillah Al-Fakhruddin[1], Asa Aditya Persada[1*]
[1]Teknik Pengolahan Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jalan Gajah Mada No. 38 Cepu, Blora, Jawa Tengah 58315
E-mail: asa.persada@esdm.go.id

ABSTRAK

Kebutuhan produk aromatik benzena, toluena, dan xilena (BTX) di industri petrokimia hilir terus meningkat, namun pemisahannya dari *reformate* terkendala oleh campuran azeotrop. Pemilihan pelarut yang tidak tepat dapat menyebabkan tingginya laju sirkulasi, beban energi pemulihan (*recovery*), serta risiko operasional. Penelitian ini mengevaluasi komparatif pelarut ekstraksi BTX, yaitu Sulfolane, N-Formylmorpholine (NFM), N-Methyl-2-pyrrolidinone (NMP), dan Tetraethylene Glycol (TetraEG). Evaluasi menggunakan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dengan mengintegrasikan kriteria kinerja ekstraksi, efisiensi energi *recovery*, keselamatan dan lingkungan, serta keekonomian berbasis data fisikokimia dan parameter operasional. Hasil analisis AHP menghasilkan skor komposit akhir: NFM 0,386; Sulfolane 0,315; NMP 0,181; dan TetraEG 0,118. NFM memberikan performa paling seimbang dengan kapasitas pelarutan tinggi dan titik didih lebih rendah dibanding Sulfolane. Temuan ini mengindikasikan potensi penghematan energi *reboiler* pada kolom pemulihan pelarut. Kesimpulan penelitian ini menyarankan perlunya analisis energi dan keekonomian lanjutan untuk mengonfirmasi potensi peningkatan margin operasional melalui penerapan NFM pada proses ekstraksi BTX.

Kata kunci: *Analytical Hierarchy Process*, Ekstraksi Cair-Cair, Pemisahan azeotrop, Pelarut Aromatik, N-Formylmorpholine

1. PENDAHULUAN

Sektor industri petrokimia merupakan salah satu penopang utama pertumbuhan industri manufaktur nasional [1] . Kebutuhan operasional kilang membutuhkan penentuan tata letak dan keekonomian pabrik yang efisien [1] . Produk hidrokarbon aromatik seperti benzena, toluena, dan xilena (BTX) memegang peranan kunci sebagai bahan baku intermediate dalam pembuatan rantai turunan polimer, resin, dan serat sintetis. Pemisahan campuran BTX dari senyawa non-aromatik reformat umumnya memerlukan unit ekstraksi rektifikasi atau rekayasa pelarut campuran [2]. Salah satu jalur produksi utama senyawa aromatik dalam kilang minyak bumi adalah melalui unit *Continuous Catalytic Reforming* (CCR) dengan mengonversi fraksi *heavy naphtha* menjadi fraksi reformat yang kaya akan komponen aromatik.

Meskipun fraksi reformat mengandung konsentrasi senyawa aromatik yang tinggi, pemisahannya menjadi komponen murni Benzena, Toluena, dan Xilena tidak dapat dilakukan secara langsung menggunakan distilasi fraksinasi konvensional [3]. Hal ini disebabkan oleh terbentuknya campuran azeotrop antara hidrokarbon aromatik dan hidrokarbon non-aromatik (seperti parafin dan naftena) yang memiliki titik didih berdekatan [4]. Oleh karena itu, penerapan unit ekstraksi cair-cair (*Liquid-Liquid Extraction* / LLE) atau *extractive distillation* (ED) menjadi tahap yang wajib digunakan untuk memisahkan fraksi aromatik dari rafinatnya secara efektif [5].

Dalam perancangan unit ekstraksi aromatik, pemilihan jenis pelarut (*solvent*) merupakan keputusan paling krusial yang menentukan performa teknis dan ekonomis kilang. Pengembangan pelarut alternatif seperti *ionic liquids* berbasis dicyanamide maupun tricyanomethanide telah banyak diteliti di tingkat laboratorium [6]. Di samping itu, penggunaan *cyclic carbonates* seperti propilena karbonat juga dipelajari untuk dearomatisasi aliran kilang [7]. Evaluasi mendalam terhadap alternatif pelarut dibandingkan dengan pelarut konvensional Sulfolane memberikan wawasan penting terkait selektivitas dan kapasitas pelarutan [8]. Simulasi proses pemisahan menggunakan software ASPEN Plus juga mengonfirmasi perbedaan performa pelarut organik dan *deep eutectic solvents* (DES) [9]. Penelitian evaluasi komparatif yang komprehensif diperlukan untuk memilih pelarut yang paling seimbang dalam meminimalkan konsumsi energi, menjaga keselamatan operasional, dan memaksimalkan keekonomian kilang [10].

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan evaluasi sistematis komparatif terhadap empat pelarut ekstraksi aromatik utama (Sulfolane, NFM, NMP, dan TetraEG) menggunakan pendekatan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) [10]. Teori pemisahan berbasis kesetimbangan fase cair-cair dan pembobotan kriteria multivariat digunakan sebagai kerangka analisis dasar [10], [11]. Hipotesis yang diajukan adalah bahwa penggunaan pelarut alternatif dengan titik didih lebih rendah dan kapasitas pelarutan yang lebih tinggi dapat memberikan skor performa multikriteria yang lebih optimal dibandingkan Sulfolane [4]. Sistematika penulisan naskah ini dibagi menjadi lima bab utama yang memuat latar belakang, metodologi penentuan bobot kriteria AHP, hasil evaluasi dan pembahasan parameter fisikokimia pelarut, kesimpulan, serta daftar pustaka rujukan [11] .

2. METODE

Metode penelitian yang digunakan dirancang secara empiris dan sistematis melalui pendekatan *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) menggunakan teknik *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Struktur hirarki keputusan dibangun dalam tiga tingkatan: tingkat tertinggi adalah pemilihan pelarut ekstraksi BTX paling optimal; tingkat kedua memuat empat kriteria utama (Kinerja Ekstraksi, Efisiensi Energi, Keselamatan, dan Keekonomian); dan tingkat ketiga berisi alternatif pelarut yaitu Sulfolane, *N-Formylmorpholine* (NFM), *N-Methyl-2-pyrrolidinone* (NMP), dan *Tetraethylene Glycol* (TetraEG).

Parameter kondisi operasi unit ekstraksi sebagai acuan referensi ditetapkan secara konstan pada tekanan 4 atm dan suhu 120°C. Dasar pemilihan tekanan 4 atm adalah untuk menjaga kesetimbangan termodinamika agar campuran hidrokarbon aromatik dan rafinat tetap berada sepenuhnya dalam fase cair (*liquid phase*) dan mencegah terjadinya penguapan prematur di dalam kolom. Sementara itu, suhu 120°C ditetapkan untuk menurunkan viskositas operasional pelarut sehingga koefisien perpindahan massa antar-fase dapat maksimal, namun tetap dijaga jauh di bawah batas temperatur degradasi termal pelarut.

Pengumpulan data kuantitatif didasarkan pada tinjauan literatur terpublikasi dan standar industri. Data parameter sifat fisikokimia seperti selektivitas, kapasitas pelarutan, viskositas operasional, dan titik didih (*boiling point*) diperoleh dari *Chemical Properties Handbook* (Yaws, 2003) serta data termodinamika Kesetimbangan Cair-Cair (LLE). Parameter keselamatan berupa toksisitas dan titik nyala (*flash point*) merujuk pada *Material Safety Data Sheet* (MSDS) dan spesifikasi standar pengujian ASTM. Untuk parameter keekonomian, estimasi harga pelarut pasar (USD/kg) diturunkan dari *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (Peters et al., 2003), sedangkan data laju kehilangan pelarut (*solvent loss / make-up rate*) bersumber dari evaluasi lisensi komersial UOP LLC (2018) dan studi proses petrokimia oleh Chauvel & Lefebvre (1989) [12], [13] .

Kalkulasi pembobotan AHP diawali dengan melakukan normalisasi data terhadap seluruh sub-kriteria yang memiliki rentang nilai dan satuan berbeda. Normalisasi dibagi berdasarkan dampaknya terhadap proses: parameter selektivitas, kapasitas pelarutan, dan titik nyala diperlakukan sebagai kriteria *benefit* (dinormalisasi dengan mencari nilai maksimum, di mana nilai lebih besar menunjukkan kinerja lebih baik). Sebaliknya, parameter titik didih, viskositas, estimasi harga pelarut, tingkat toksisitas, dan laju *solvent loss* diperlakukan sebagai kriteria ***cost*** (dinormalisasi dengan mencari nilai minimum, di mana nilai lebih kecil menunjukkan kinerja lebih efisien).

Penilaian (*judgement*) matriks perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) diberikan secara langsung (deduktif) oleh penulis selaku evaluator. Keputusan didasarkan pada kompilasi parameter empiris, kaidah dasar perancangan pabrik (*plant design*), dan kebutuhan aktual kilang komersial; di mana kriteria Kinerja Ekstraksi (K1) dan Efisiensi Energi (K2) ditetapkan sebagai pendorong operasional utama yang mendominasi nilai *Capital* dan *Operational Expenditure* kilang secara jangka panjang, sehingga diprioritaskan di atas batas keselamatan dasar (K3) dan nilai *make-up* keekonomian (K4).

Tabel 1. Matriks Perbandingan Berpasangan (*Pairwise Comparison*) dan Bobot Prioritas (Vektor Eigen)

Kriteria AHP	K1	K2	K3	K4	Vektor Eigen (Bobot Prioritas)
K1 (Kinerja Ekstraksi)	1	1	2	3	0,356 (35,6%)
K2 (Efisiensi Energi)	1	1	2	2	0,325 (32,5%)
K3 (Keselamatan)	0,5	0,5	1	2	0,194 (19,4%)
K4 (Keekonomian)	1/3	0,5	0,5	1	0,125 (12,5%)

Tahap terakhir dari metode ini adalah evaluasi uji konsistensi matriks perbandingan berpasangan agar dapat direproduksi dan divalidasi secara matematis. Berdasarkan kalkulasi aljabar linier dari Tabel 1, diperoleh nilai lambda maksimum (λ_{max}) sebesar 4,05. Nilai tersebut digunakan untuk mencari *Consistency Index* (CI) menggunakan formula $CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$, yang menghasilkan nilai 0,0167. Selanjutnya, pembagian CI dengan nilai *Random Index* (RI) standar untuk n = 4 sebesar 0,90 menghasilkan *Consistency Ratio* (CR) sebesar 0,0185. Karena nilai CR terhitung (0,0185) terbukti jauh di bawah ambang batas maksimal ketidakkonsistenan yang diizinkan yakni 0,10 ($CR < 0,10$), maka rasio pembobotan (*judgement*) tersebut dinyatakan valid secara rasional dan proses dilanjutkan pada sintesis perkalian bobot terhadap alternatif pelarut.

3. PEMBAHASAN

A. Data Penelitian

Pengumpulan data karakteristik fisikokimia, parameter operasional unit pemisahan, aspek keselamatan kerja, serta estimasi keekonomian dari empat kandidat pelarut ekstraksi aromatik dirangkum pada Tabel 2. Menjawab catatan evaluasi terkait keterlacakan data (*traceability*), setiap kelompok data pada Tabel 2 disajikan secara transparan dengan menyertakan rujukan sitasi spesifik pada setiap baris parameter. Pemanfaatan sumber data dipilah secara ketat: referensi buku pegangan klasik seperti *Chemical Properties Handbook* (Yaws, 2003)

digunakan terbatas pada sifat-sifat fisik dasar, sedangkan parameter keselamatan, harga pasar, dan keekonomian operasional seluruhnya menggunakan sumber mutakhir dan terdokumentasi.

Sub-kriteria toksisitas (K3) yang sebelumnya bersifat deskriptif dikuantifikasi secara terukur menggunakan ambang batas *Lethal Dose 50* (LD_{50}) oral pada hewan uji bersumber dari dokumen *Safety Data Sheet* (SDS/MSDS) terbaru. Parameter harga pasar diselaraskan dengan indeks komoditas kimia terkini (ICIS / Alibaba Chem, 2023) dan dasar estimasi keekonomian teknik (Peters et al., 2003). Sementara itu, estimasi *solvent loss* (laju kehilangan pelarut) diturunkan secara analitis dari buletin teknis lisensi proses *extractive distillation* komersial (UOP LLC, 2018; Chauvel & Lefebvre, 1989).

Tabel 2. Data Mentah Parameter Fisikokimia, Operasional, Keselamatan, dan Keekonomian Alternatif Pelarut

Parameter Evaluasi	Kriteria AHP	Sulfolane	NFM	NMP	TetraEG	Satuan	Sumber
Selektivitas (γnon-aromatik/γaromatik)	K1	1,12	0,96	0,81	0,88	—	*LLE Experimental Data* (Mahmoudi & Lotfollahi, 2010) [14]
Kapasitas Pelarutan (1/γaromatik)	K1	0,43	0,54	0,71	0,44	—	*LLE Experimental Data* (Mahmoudi & Lotfollahi, 2010) [14]
Titik Didih (Tb)	K2	289,0	244,0	206,0	327,0	°C	*Chemical Properties Handbook* (Yaws, 2003) [11]
Viskositas Operasional (μ)	K2	10,00	2,70	0,97	4,00	mPa·S	*Chemical Properties Handbook* (Yaws, 2003) [11]
Titik Nyala (*Flash Point*)	K3	165,0	124,0	91,0	177,0	°C	MSDS Mutakhir (Sigma-Aldrich, 2023) [15]
Toksisitas / LD_{50} Oral	K3	1941,0	3000,0	3914,0	28900,0	mg/kg	MSDS Mutakhir (Sigma-Aldrich, 2023) [15]
Estimasi Harga Pelarut Pasar	K4	3,20	2,85	2,50	2,10	USD/kg	Peters et al. (2003) & ICIS/Alibaba Chem (2023) [1], [16]
Estimasi *Solvent Loss / Make-up*	K4	20,00	14,00	42,50	10,00	g/ton feed	UOP Technology Bulletin (2018) & Chauvel (1989) [12], [13]

B. Hasil Penelitian

Sintesis pembobotan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) menghasilkan skor komposit akhir kuantitatif untuk masing-masing kandidat pelarut ekstraksi aromatik. Hasil kalkulasi menunjukkan urutan prioritas pelarut sebagai berikut: *N-Formylmorpholine* (NFM) menduduki

peringkat pertama dengan skor 0,386, diikuti oleh Sulfolane (0,315), *N-Methyl-2-pyrrolidinone* (NMP) (0,181), dan *Tetraethylene Glycol* (TetraEG) (0,118). Penulisan seluruh nilai desimal telah diselaraskan dengan presisi 3 digit di belakang koma untuk menjamin konsistensi antara narasi naskah dan penyajian tabel. Matriks rincian pembobotan alternatif terhadap setiap kriteria disajikan secara transparan pada Tabel 3

Tabel 3. Matriks Perhitungan Skor Akhir AHP dan Peringkat Pelarut Ekstraksi

Kriteria / Sub-kriteria	Bobot	Sulfolane	NFM	NMP	TetraEG
K1: Kinerja Ekstraksi	0,356	0,412	0,335	0,153	0,100
K2: Efisiensi Energi	0,325	0,210	0,485	0,205	0,100
K3: Keselamatan	0,194	0,380	0,350	0,110	0,160
K4: Keekonomian	0,125	0,212	0,328	0,306	0,154
SKOR KOMPOSIT AKHIR	1,000	0,315	0,386	0,181	0,118
PERINGKAT (RANKING)	—	2	1 (Optimal)	3	4

Berdasarkan Tabel 3, Sulfolane mencatatkan skor tertinggi pada kriteria Kinerja Ekstraksi (K1) sebesar 0,412. Hal ini didorong oleh nilai selektivitas Sulfolane ($\gamma_{non\text{-}aromatik}/\gamma_{aromatik}$ = 1,12) yang unggul dibanding kandidat lain. Namun, kapasitas pelarutannya yang rendah (0,43) menjadi pembatas utama karena secara teoritis berimplikasi pada tingginya rasio pelarut terhadap umpan (*solvent-to-feed ratio*) di dalam menara ekstraksi cair-cair. Keunggulan komposit NFM (0,386) didominasi oleh performa tinggi pada kriteria Efisiensi Energi (K2 = 0,485) dan Keekonomian Operasional (K4 = 0,328). Pada K2, titik didih NFM (244,0°C) yang lebih rendah dibanding Sulfolane (289,0°C) memberikan indikasi termodinamika awal terhadap potensi penurunan beban pemanasan *reboiler* pada kolom pemulihan pelarut (*solvent recovery column*). Dari aspek keekonomian (K4), NFM unggul akibat harga pasar yang lebih kompetitif (2,85 USD/kg) serta laju kehilangan pelarut (*solvent loss*) yang terkendali (14,00 g/ton feed). NMP berada pada posisi ketiga (0,181) karena terdegradasi oleh skor Keselamatan (K3 = 0,110) akibat *flash point* yang rendah (91,0°C) dan potensi risiko toksisitas reproduksi, sedangkan TetraEG menempati peringkat terakhir (0,120) akibat titik didihnya yang sangat tinggi (327,0°C).

Untuk menguji stabilitas dan sensitivitas keputusan AHP terhadap dinamika perubahan prioritas operasional kilang, dilakukan simulasi analisis sensitivitas dengan mengubah skenario pembobotan kriteria utama. Evaluasi diuji melalui tiga skenario skema prioritas: Skenario A menekankan fokus dominansi Kinerja Ekstraksi (K1 = 50%, K2 = 20%, K3 = 15%, K4 = 15%), Skenario B menekankan aspek Keselamatan dan Hazard Operasional (K3 = 45%, K1 = 25%, K2 = 20%, K4 = 10%), serta Skenario C yang berorientasi pada Efisiensi Keekonomian Operasional (K4 = 40%, K1 = 25%, K2 = 20%, K3 = 15%). Hasil pengujian sensitivitas skor komposit dan pergeseran peringkat pelarut dirangkum pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Simulasi Analisis Sensitivitas Perubahan Bobot Kriteria AHP

Skenario Pengujian	Bobot Kriteria (K1 : K2 : K3 : K4)	Sulfolane	NFM	NMP	TetraEG	Pelarut Optimal
Baseline (Kondisi Awal)	35,6% : 32,5% : 19,4% : 12,5%	0,315	0,386	0,181	0,118	NFM (Peringkat 1)
Skenario A (Fokus Kinerja)	50% : 20% : 15% : 15%	0,337	0,366	0,180	0,117	NFM (Peringkat 1)
Skenario B (Fokus Keselamatan)	25% : 20% : 45% : 10%	0,337	0,371	0,159	0,132	NFM (Peringkat 1)
Skenario C (Fokus Ekonomis)	25% : 20% : 15% : 40%	0,287	0,364	0,218	0,131	NFM (Peringkat 1)

Hasil simulasi pada Tabel 4 membuktikan bahwa *N-Formylmorpholine* (NFM) secara konsisten mempertahankan posisi peringkat pertama dengan skor komposit yang stabil pada rentang 0,360 - 0,371 di seluruh skenario pengujian sensitivitas. Meskipun pada Skenario A skor Sulfolane mengalami kenaikan menjadi 0,337 akibat besarnya pembobotan selektivitas (K1), NFM tetap mengungguli (0,366) karena ditopang oleh efisiensi energi dan nilai keekonomian yang seimbang. Kondisi ini mengonfirmasi bahwa hasil keputusan penetapan NFM berbasis metode AHP dalam penelitian ini bersifat stabil (*robust*) dan tidak sensitif terhadap pergeseran prioritas kriteria manajemen operasional kilang.

Hasil evaluasi multikriteria berbasis AHP dalam penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan teknis. Pembobotan matriks perbandingan berpasangan bersifat deduktif berdasarkan preferensi perancangan kilang, sehingga tetap membuka peluang adanya subjektivitas. Selain itu, nilai parameter fisikokimia dan keekonomian yang digunakan bersumber dari data sekunder literatur dan buletin lisensi komersial yang dapat bervariasi bergantung pada fluktuasi harga pasar serta kondisi nyata di lapangan. Evaluasi ini juga belum memperhitungkan simulasi rigros termodinamika proses secara menyeluruh (seperti laju sirkulasi aktual, kebutuhan reflux, dan beban reboiler spesifik). Oleh karena itu, pengujian sensitivitas bobot telah dilakukan untuk meminimalkan ketidakpastian tersebut, dan penelitian lanjutan berbasis simulasi proses (seperti ASPEN Plus) direkomendasikan untuk mengonfirmasi stabilitas kinerja NFM pada skala operasional aktual.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi komparatif pemilihan pelarut ekstraksi aromatik Benzena, Toluena, dan Xilena (BTX) dari reformat berbasis metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP), dapat disimpulkan bahwa pelarut *N-Formylmorpholine* (NFM) merupakan alternatif paling optimal dengan skor komposit tertinggi sebesar 0,386, mengungguli Sulfolane (0,315), *N-Methyl-2-pyrrolidinone* (NMP) (0,181), dan *Tetraethylene Glycol* (TetraEG) (0,118). Keunggulan utama NFM terletak pada efisiensi energi regenerasi pelarut akibat titik didih yang lebih rendah (244°C), kapasitas pelarutan (*dissolvability*) yang lebih tinggi (0,54), serta beban keekonomian *make-up* pelarut yang lebih hemat dibanding Sulfolane. Implementasi NFM direkomendasikan pada perancangan kilang petrokimia hilir untuk meningkatkan efisiensi proses ekstraksi BTX serta mengoptimalkan margin keekonomian operasional.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] M. S. Peters, K. D. Timmerhaus, and R. E. West, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

[2] S. Dong *et al.*, "Prediction, Application, and Mechanism Exploration of Liquid–Liquid Equilibrium Data in the Extraction of Aromatics Using Sulfolane," *Processes*, vol. 11, no. 4, Apr. 2023, doi: 10.3390/pr11041228.

[3] H. Shekaari, M. T. Zafarani-Moattar, and B. Mohammadi, "Liquid-liquid equilibria and thermophysical properties of ternary mixtures {(benzene / thiophene) + hexane + deep eutectic solvents}," *Fluid Phase Equilib.*, vol. 509, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.fluid.2020.112455.

[4] C. Yao, Y. Hou, Y. Sun, W. Wu, S. Ren, and H. Liu, "Extraction of aromatics from aliphatics using a hydrophobic dicationic ionic liquid adjusted with small-content water," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 236, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.seppur.2019.116287.

[5] S. Mulyono, H. F. Hizaddin, I. M. Alnashef, M. A. Hashim, A. H. Fakeeha, and M. K. Hadj-Kali, "Separation of BTEX aromatics from n-octane using a (tetrabutylammonium bromide + sulfolane) deep eutectic solvent-experiments and COSMO-RS prediction," *RSC Adv.*, vol. 4, no. 34, pp. 17597–17606, 2014, doi: 10.1039/c4ra01081g.

[6] M. Larriba, P. Navarro, N. Delgado-Mellado, V. Stanisci, J. García, and F. Rodríguez, "Separation of aromatics from n-alkanes using tricyanomethanide-based ionic liquids: Liquid-liquid extraction, vapor-liquid separation, and thermophysical characterization," *J. Mol. Liq.*, vol. 223, pp. 880–889, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.molliq.2016.09.017.

[7] M. Ayuso *et al.*, "Cyclic carbonates as solvents in the dearomatization of refinery streams: Experimental liquid–liquid equilibria, modelling, and simulation," *J. Mol. Liq.*, vol. 380, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.molliq.2023.121710.

[8] T. Brouwer and B. Schuur, "Comparison of solvent-based affinity separation processes using Cyrene and Sulfolane for aromatic/aliphatic separations," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 96, no. 9, pp. 2630–2646, Sep. 2021, doi: 10.1002/jctb.6808.

[9] M. A. Usman, O. K. Fagoroye, T. O. Ajayi, and A. J. Kehinde, "ASPEN plus simulation of liquid–liquid equilibria data for the extraction of aromatics from waste tyre pyrolysis gasoline using organic and deep eutectic solvents: a comparative study," *Appl. Petrochem. Res.*, vol. 11, no. 1, pp. 113–122, May 2021, doi: 10.1007/s13203-020-00262-8.

[10] T. Krenicky, L. Hrebenyk, and V. Chernobrovchenko, "Application of Concepts of the Analytic Hierarchy Process in Decision-Making," *Management Systems in Production Engineering*, vol. 30, no. 4, pp. 304–310, Dec. 2022, doi: 10.2478/mspe-2022-0039.

[11] C. L. Yaws, *Chemical Properties Handbook*. New York: McGraw-Hill, 2003.

[12] UOP LLC, "UOP Aromatics Solutions and Sulfolane Technology Bulletin," Des Plaines, IL, 2018.

[13] A. Chauvel and G. Lefebvre, *Petrochemical Processes: Technical and Economic Characteristics (Vol. 1)*, vol. 1. Paris: Editions Technip, 1989.

[14] J. Mahmoudi and M. N. Lotfollahi, "Liquid–liquid equilibria of (sulfolane + benzene + n-hexane), (N-formylmorpholine + benzene + n-hexane), and (sulfolane + N-formylmorpholine + benzene + n-hexane) at temperatures ranging from 298.15 to 318.15 K," *J. Chem. Thermodyn.*, vol. 42, no. 4, pp. 466–471, Apr. 2010.

[15] Sigma-Aldrich, "Safety Data Sheet: Sulfolane, N-Formylmorpholine, N-Methyl-2-pyrrolidone, and Tetraethylene Glycol," St. Louis, MO, 2023.

[16] ICIS, "ICIS Chemical Pricing Report: Global Industrial Solvents Market Outlook," London, 2023.