

## OPTIMASI KONDISI REAKSI PADA SINTESIS *PLASTICIZER* DARI METIL OLEAT

### *OPTIMIZATION OF THE REACTION CONDITIONS FOR THE SYNTHESIS OF PLASTICIZERS FROM METHYL OLEATE*

Dyah Retno Sawitri\*, Amelia Anjani Harahap, Nurul Harahap<sup>1</sup>

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia  
Jalan Kaliurang KM 14,5 Sleman Yogyakarta

Diterima: 27 Januari 2021

Direvisi: 26 Februari 2021

Disetujui: 29 Maret 2021

#### ABSTRAK

Reaksi epoksidasi mengubah ikatan rangkap pada senyawa olefin menjadi ikatan epoksida atau oksiran. Metil ester dari minyak nabati dengan kandungan asam lemak tak jenuh dapat digunakan sebagai bahan baku pada reaksi epoksidasi. Epoksida berbasis minyak nabati memiliki potensi yang besar untuk digunakan sebagai *plasticizer* untuk pemrosesan polimer. Pada penelitian ini, reaksi epoksidasi dilakukan secara *in-situ* menggunakan asam asetat, hidrogen peroksida, dan asam sulfat sebagai katalis. Rancangan eksperimen dengan Taguchi digunakan untuk optimasi kondisi reaksi yang meliputi suhu reaksi serta perbandingan molar hidrogen peroksida dan asam asetat terhadap metil oleat. Hasil optimasi menunjukkan bahwa faktor yang paling berpengaruh terhadap *yield* adalah perbandingan molar asam asetat terhadap asam oleat. *Yield* maksimum sebesar 79,87% diperoleh pada suhu 60°C dengan perbandingan molar hidrogen peroksida dan asam asetat terhadap metil oleat berturut-turut sebesar 1,6 dan 0,3.

**Kata kunci:** epoksida, metil oleat, *plasticizer*, optimasi

#### ABSTRACT

*Epoxidation reaction convert the double bond in olefinic substance into epoxide or oxirane. Methyl esters from vegetable oil with a substantial amount of unsaturated fatty acid can be used as raw material for epoxidation reactions. Epoxidized vegetable oil and its derivatives have the potential to be used as a plasticizer for polymer processing. In-situ epoxidation of methyl oleate has been conducted using hydrogen peroxide, acetic acid, and sulfuric acid as catalysts. The Taguchi-based experimental design was applied to optimize process conditions: the reaction temperature and the molar ratio of hydrogen peroxide and acetic acid to methyl oleate. The optimization results show that the most influential factor on yield is the molar ratio of acetic acid to methyl oleate. The maximum yield of 76.24% was obtained at 60 °C with a molar ratio of hydrogen peroxide and acetic acid to methyl oleate of 1.6 and 0.3, respectively.*

**Keywords:** *epoxide, methyl oleate, plasticizer, optimization*

#### PENDAHULUAN

*Plasticizer* merupakan salah satu bahan tambahan penting yang digunakan untuk meningkatkan sifat-sifat termal dan mekanis dari Poly (vinyl chloride) (PVC) terutama terkait dengan fleksibilitas produk akhir [1]. Sampai dengan saat ini, sebagian besar *plasticizer* masih didominasi oleh senyawa-senyawa ftalat berbasis minyak bumi. Senyawa ftalat terbukti memberikan efek plastisasi yang diharapkan

walaupun beberapa penelitian menunjukkan adanya kemungkinan dampak negatif terhadap kesehatan akibat migrasi senyawa ftalat ke lingkungan dimana produk akhir PVC digunakan [2]. Oleh karena itu, diperlukan alternatif *plasticizer* yang lebih aman dan memiliki keunggulan lainnya seperti kemudahan terurai secara biologis, ekonomis, dan menggunakan sumber daya alam terbarukan. Salah satu alternatif *plasticizer* yang telah banyak diteliti adalah senyawa epoksida berbasis minyak nabati

\*Corresponding author :

Email: [dyah.retno@uii.ac.id](mailto:dyah.retno@uii.ac.id)

DOI: <http://dx.doi.org/10.37209/jtbbt.v11i1.278>

[3]. Minyak nabati maupun turunannya dengan kandungan asam lemak tak jenuh dapat mengalami reaksi epoksidasi menjadi epoksida. Epoksida minyak nabati yang telah dikenal sebagai alternatif *plasticizer* dan telah dikomersialkan adalah epoksida minyak kedelai [4]. Minyak nabati lainnya yang juga telah diteliti sebagai bahan baku reaksi epoksidasi meliputi minyak jarak [5], minyak dedak padi [1], minyak canola [6], minyak wijen [7], dan minyak sawit [8].

Minyak sawit sebagai komoditas utama minyak nabati di Indonesia memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai bahan baku untuk sintesis *plasticizer*. Komposisi asam lemak penyusun minyak sawit berimbang antara asam palmitat sebagai asam lemak jenuh dan asam oleat sebagai asam lemak tak jenuh. Kandungan asam lemak tak jenuh pada minyak sawit relatif lebih rendah jika dibandingkan dengan minyak kedelai, namun dengan proses pemisahan khusus dapat diperoleh fraksi-fraksi asam lemak tak jenuh dengan kemurnian yang lebih tinggi [9]. Reaksi epoksidasi berbahan baku asam oleat telah dilakukan oleh beberapa peneliti [10 - 13]. Namun demikian, tantangan terbesar yang masih dihadapi adalah *yield* yang masih relatif rendah. Salah satu penyebabnya adalah keberadaan gugus karboksilat pada rantai asam lemak yang dapat bereaksi dengan gugus oksiran yang terbentuk selama reaksi epoksidasi. Pengaruh ini dapat diperkecil dengan melakukan reaksi epoksidasi menggunakan bahan baku metil oleat. Pada metil oleat, gugus karboksilat telah digantikan dengan gugus metil yang reaktivitasnya lebih rendah sehingga diharapkan epoksida yang terbentuk memiliki stabilitas cincin oksiran yang lebih baik.

Penelitian ini ditujukan untuk mendapatkan kondisi reaksi yang optimum pada reaksi epoksidasi metil oleat menggunakan metode Taguchi. Metode optimasi yang sama telah berhasil dilakukan pada reaksi epoksidasi *palm olein* dengan asam peroksi format dan katalisator asam sulfat [12]. Pada penelitian ini, reaksi epoksidasi dilakukan dengan menggunakan asam peroksi asetat yang dihasilkan secara *in-situ* dari hidrogen peroksida dan asam asetat dengan katalisator asam sulfat [14]. Metode Taguchi digunakan untuk mengetahui kombinasi faktor yang berpengaruh

dalam reaksi sehingga kondisi optimum reaksi dapat ditentukan. Faktor yang dipilih pada penelitian ini meliputi suhu reaksi dan perbandingan reaktan. Suhu reaksi epoksidasi minyak nabati dapat dilakukan pada rentang suhu 30-70° C, rasio molar hidrogen peroksida terhadap *ethylenic unsaturation* (EU) sebesar 1,2-1,8 dan rasio molar asam asetat terhadap EU sebesar 0,3-0,6 [15]. Dengan mempertimbangkan waktu reaksi yang lebih singkat, suhu reaksi pada penelitian ini diambil dalam rentang 50-70° C dengan rasio molar hidrogen peroksida terhadap metil oleat pada rentang 1-1,6 dan rasio molar asam asetat terhadap metil oleat pada rentang 0,3-0,8.

## BAHAN DAN METODE

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi asam oleat, metanol, asam sulfat, asam asetat, hidrogen peroksida, dan reagen yang diperlukan untuk analisis bilangan iod dan bilangan oksiran. Asam oleat direaksikan dengan metanol dan katalisator asam sulfat untuk menghasilkan metil oleat melalui reaksi esterifikasi. Metil oleat yang dihasilkan dari reaksi esterifikasi selanjutnya dimurnikan dengan pencucian serta pengeringan sebelum digunakan sebagai bahan baku reaksi epoksidasi.

Reaksi epoksidasi dilakukan pada labu leher tiga 250 mL yang dilengkapi dengan pengadukan, pemanasan, dan sistem refluks. Metil oleat sejumlah 100-gram dicampur dengan asam asetat dengan perbandingan molar tertentu dalam labu leher tiga dan dipanaskan hingga mencapai suhu reaksi. Setelah suhu reaksi tercapai, hidrogen peroksida dimasukkan ke dalam labu leher tiga dengan penetesan selama 20 menit. Hal ini dilakukan karena reaksi antara hidrogen peroksida dan asam asetat bersifat sangat eksotermis [16]. Reaksi dilakukan selama empat jam pada suhu konstan. Setelah reaksi selesai, epoksida yang dihasilkan kemudian dipurifikasi untuk memisahkan sisa air, asam asetat, dan asam sulfat. Rancangan eksperimen dengan metode Taguchi dilakukan dengan tiga faktor yaitu suhu, perbandingan molar hidrogen peroksida terhadap metil oleat (HP:MO), dan perbandingan molar asam asetat terhadap metil oleat (AA:MO) dengan level untuk setiap faktor tersaji pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Daftar Faktor dan Level

Level	Suhu	HP:MO	AA:MO
1	50	1	0,3
2	60	1,2	0,5
3	70	1,6	0,8

Metode Taguchi dikembangkan pertama kali oleh Dr. Genichi Taguchi dan merupakan salah satu metode statistik yang dapat digunakan untuk optimasi parameter reaksi. Metode ini telah digunakan secara luas pada beberapa jenis reaksi seperti misalnya reaksi transesterifikasi pada sintesis biodiesel [17-18] dan reaksi epoksidasi [12, 19]. Salah satu keunggulan dari Metode Taguchi adalah penentuan titik optimum dari kombinasi parameter dapat dilakukan dengan jumlah eksperimen yang lebih sedikit. Rancangan eksperimen dengan metode Taguchi menggunakan kombinasi faktor dan level untuk menentukan jumlah eksperimen yang dilakukan. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *orthogonal array* L9 dengan sembilan kombinasi faktor dan level. Keseluruhan rancangan eksperimen dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2.** L9 Orthogonal Array

No. Eksperimen	Suhu °C	HP:MO mol/mol	AA:MO
1	50	1,0	0,3
2	50	1,2	0,5
3	50	1,6	0,8
4	60	1,0	0,5
5	60	1,2	0,8
6	60	1,6	0,3
7	70	1,0	0,8
8	70	1,2	0,3
9	70	1,6	0,5

Analisis yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi analisis bilangan iod untuk mengetahui derajat ketidakjenuhan bahan baku metil oleat, analisis bilangan oksiran untuk menentukan *yield* reaksi, dan analisis gugus fungsi dengan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). FTIR yang digunakan yaitu Nicolet iS5 Thermo Scientific dengan rentang pengukuran 400-4000 cm<sup>-1</sup> dan resolusi 2 cm<sup>-1</sup>.

Respon yang diukur untuk optimasi berupa *yield* yang terhitung dari bilangan oksiran dan bilangan iod menggunakan persamaan:

$$\text{yield} = \frac{O_s}{O_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

Dengan

$$O_{\max} = \frac{(I_0/2M_i)M_o}{100+(I_0/2M_i)M_o} \times 100\% \quad (2)$$

dimana  $O_s$ ,  $O_{\max}$ ,  $I_0$ ,  $M_i$ , dan  $M_o$  berturut-turut adalah bilangan oksiran sampel, bilangan oksiran maksimum, berat molekul iodin, dan berat molekul oksigen. Dalam penelitian ini diinginkan *yield* yang tinggi, maka nilai *Signal to Noise Ratio* (SNR) dari respon terukur dihitung dengan pendekatan *larger-is better* dari persamaan:

$$\text{SNR} = -10 \log \frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^n \frac{1}{\text{yield}_j^2} \right) \quad (3)$$

Persen kontribusi dari ketiga faktor yang terlibat, dianalisis dengan menggunakan *Analysis of Variance* (ANOVA) dengan persamaan:

$$\% \text{kontribusi} = \frac{SS_f}{SS_T} \times 100\% \quad (4)$$

Dengan

$$SS_f = \sum_{i=1}^3 m[(\text{SNR}_L)_i - \text{SNR}_T]^2 \quad (5)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^9 (\text{SNR}_i - \text{SNR}_T)^2 \quad (6)$$

Dengan  $n$  adalah jumlah eksperimen pada level 1 dan faktor  $f$ .  $SS_f$  dan  $SS_T$  berturut-turut adalah *sum the the square* dari parameter ke- $f$  dan *total sum of the square* dari keseluruhan parameter [20].

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum digunakan dalam reaksi epoksidasi, analisis bilangan iod dari metil oleat dilakukan untuk mengetahui derajat ketidakjenuhan dari bahan baku yang digunakan. Hasil analisis bilangan iod bahan baku metil oleat menunjukkan hasil sebesar 88 gram I<sub>2</sub>/100 gram. Dengan menggunakan Persamaan 2, dapat dihitung nilai bilangan oksiran maksimal yang dapat diperoleh ( $O_{\max}$ ) sebesar 5,25%. Nilai  $O_{\max}$  inilah yang digunakan untuk menghitung *yield* dan SNR dari setiap nomor eksperimen dengan menggunakan Persamaan 1 dan 3. Hasil perhitungan *yield* dan SNR dapat dilihat pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Yield dan SNR

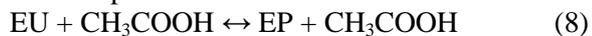
No. Eksperimen	Yield rerata, %	SNR
1	55,98	34,96
2	62,34	35,90
3	69,41	36,83
4	61,92	35,84
5	46,97	33,44
6	79,87	38,05
7	0,25	-12,12
8	65,01	36,26
9	61,85	35,83

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa nilai SNR sebanding dengan nilai *yield* dengan hasil tertinggi dan terendah berturut-turut ditunjukkan oleh nomor eksperimen 6 dan 7. Nilai *yield* yang sangat rendah pada eksperimen ke-7 kemungkinan besar disebabkan oleh tingginya suhu dan didukung dengan rasio asam asetat yang juga tinggi. Reaksi epoksidasi secara *in-situ* terdiri dari dua tahap reaksi yaitu reaksi peroksidasi dan reaksi epoksidasi .

Reaksi peroksidasi



Reaksi epoksidasi



Secara stoikiometris, jumlah molar asam asetat dalam sistem reaksi bernilai konstan karena asam asetat yang dikonsumsi pada reaksi peroksidasi akan terbentuk kembali pada tahap reaksi epoksidasi. Tingginya perbandingan molar asam asetat terhadap asam oleat akan menyebabkan tingginya konsentrasi asam asetat pada sistem reaksi. Hal ini dapat berdampak pada stabilitas cincin epoksida yang dihasilkan. Pada sistem reaksi yang asam, cincin epoksida dapat bereaksi lebih lanjut dengan beberapa senyawa dalam sistem reaksi seperti misalnya air yang terbentuk dari hasil reaksi peroksidasi dan juga asam asetat yang berdampak pada rendahnya nilai bilangan oksiran [21]. Hasil yang kurang lebih sama juga dijumpai pada reaksi epoksidasi FAME dimana jumlah asam asetat berlebih akan menyebabkan reaksi lebih lanjut dengan epoksida yang sudah terbentuk sehingga reaksi pembentukan epoksida tidak maksimal [22].

Nilai SNR dari Tabel 3 dapat digunakan untuk menentukan nilai SNR rerata untuk setiap faktor dan level. Hasil perhitungan SNR rerata dapat dilihat pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Perhitungan SNR Rerata

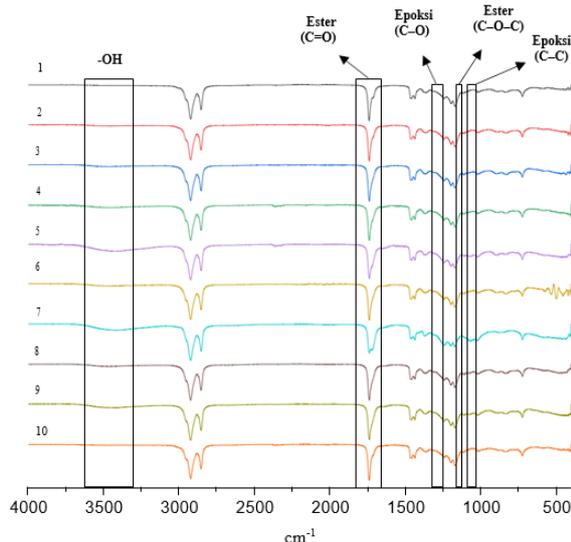
Level	Suhu	HP:MO	AA:MO
1	35,89	19,56	36,42
2	35,77	35,20	35,85
3	19,99	36,90	18,76
<b>Delta</b>	<b>15,90</b>	<b>17,34</b>	<b>17,66</b>
<b>Rank</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>

Hasil optimasi dengan metode Taguchi diperoleh dengan melihat nilai SNR rerata tertinggi di setiap faktor. Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa untuk faktor suhu, nilai SNR tertinggi diperoleh dari level 1 yaitu suhu 50° C. Dengan demikian, untuk faktor HP:MO dan AA:MO, nilai optimum diperoleh pada perbandingan 1,6:1 dan 0,3:1. Eksperimen lanjutan dengan kombinasi tersebut kemudian digunakan untuk mengkonfirmasi hasil optimasi. Hasil eksperimen menunjukkan nilai *yield* rerata 71,71% yang lebih rendah dari *yield* yang diperoleh pada eksperimen ke-6. Hasil ini kemungkinan disebabkan oleh kecenderungan suhu yang rendah pada waktu reaksi yang sama. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Zheng et al., (2015), konversi reaksi epoksidasi meningkat seiring dengan semakin lamanya waktu reaksi hingga suatu saat mencapai nilai maksimum dan akan menurun setelahnya[23]. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa hasil terbaik ditunjukkan oleh eksperimen ke-6 dengan *yield* sebesar 79,87%.

Dari Tabel 4 dapat dilihat pula peringkat dari setiap faktor yang dihitung dari selisih/delta antara nilai SNR tertinggi dengan SNR terendah. Delta yang tinggi menunjukkan pengaruh faktor yang lebih kuat. Dari hasil perhitungan dapat disimpulkan bahwa perbandingan molar asam asetat dengan metil oleat menempati urutan pertama disusul oleh perbandingan molar hidrogen peroksida terhadap metil oleat dan suhu reaksi di posisi ketiga. Nilai ini sejalan dengan hasil analisis menggunakan ANOVA. Hasil perhitungan dengan ANOVA menunjukkan bahwa persen kontribusi untuk setiap faktor dari nilai tertinggi hingga terendah berturut-turut adalah AA:MO (34,86%), HP:MO (34%), dan suhu reaksi (31,15%). Namun demikian, jika dilihat dari perbedaan delta maupun persen kontribusi yang tidak begitu besar, dapat juga disimpulkan bahwa pengaruh dari ketiga faktor yang diambil dalam penelitian ini hampir sama kuatnya.

Hasil analisis gugus fungsi dengan FTIR dilakukan terhadap sembilan sampel dari *orthogonal array* L9 ditambah dengan satu sampel hasil konfirmasi titik optimum. Spektra FTIR selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 1. Dari data analisis FTIR pada sampel epoksida oleat 1-10 diketahui bahwa reaksi epoksidasi telah berhasil dilakukan yang terlihat dari semakin samarnya *peak* ikatan rangkap pada kisaran panjang gelombang  $3005\text{ cm}^{-1}$  dan gugus epoksi, terlihat dari serapan spesifik C-O dan C-C pada panjang gelombang di sekitar  $1250\text{ cm}^{-1}$ . Namun serapan spesifik ini bervariasi mengingat kondisi reaksi setiap sampel yang berbeda, selain itu perbedaan ini juga dapat disebabkan oleh pembukaan cincin oksiran dan reaksi samping.

Salah satu reaksi samping yang mungkin terjadi pada reaksi epoksidasi yaitu pembentukan gugus hidroksil (-OH) pada sampel 4, 5, 7, 9, dan 10, data ini membuktikan bahwa terjadi reaksi hidrolisis pada epoksida oleat yang menyebabkan cincin oksiran terlepas dan membentuk ikatan hidroksil. Kecenderungan ini terlihat jelas pada sampel 7 dimana spektra gugus hidroksil relatif lebih dominan dibanding dengan sampel lainnya. Reaksi samping lainnya yang mungkin terjadi adalah pembentukan asam karboksilat (C=O), dalam hal ini asam asetat. Sampel 4 menunjukkan bahwa *peak* C=O cukup tinggi, tingginya serapan spesifik asam asetat ini dapat disebabkan oleh konsentrasi asam asetat yang cukup tinggi sehingga serapannya terlihat dominan.



Gambar 1. Spektra Hasil Analisis FTIR

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Metil oleat dapat ditransformasikan menjadi senyawa epoksida yang dapat digunakan sebagai salah satu alternatif *plasticizer* yang lebih aman dan ramah lingkungan. Optimasi reaksi epoksidasi metil oleat telah dilakukan secara in-situ dan diperoleh *yield* tertinggi sebesar 79,87% pada suhu  $60^\circ\text{C}$  dengan perbandingan molar hidrogen peroksida terhadap metil oleat sebesar 1,6:1 dan perbandingan molar asam asetat terhadap metil oleat sebesar 0,3:1. Hasil analisis data dengan ANOVA menunjukkan ketiga faktor memiliki kontribusi yang sama besarnya terhadap *yield*. Terjadinya reaksi samping berupa pembukaan cincin epoksida dimungkinkan mengurangi *yield* keseluruhan

### Saran

Terdapat ketidaksesuaian antara hasil optimum yang dihasilkan dari perhitungan dengan Metode Taguchi dimana nilai optimum memberikan *yield* yang lebih rendah. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh suhu reaksi yang belum mencukupi untuk waktu reaksi yang telah ditentukan. Dengan demikian, untuk tahap penelitian lanjutan, waktu reaksi dapat dipertimbangkan sebagai salah satu faktor dalam rancangan eksperimen.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. G. Nihul, S. T. Mhaske, and V. V. Shertukde, "Epoxidized rice bran oil (ERBO) as a plasticizer for poly (vinyl chloride) (PVC)," *Iran. Polym. J. (English Ed.)*, vol. 23, no. 8, pp. 599–608, 2014.
- [2] P. Jia, M. Zhang, L. Hu, and Y. Zhou, "A novel biobased polyester plasticizer prepared from palm oil and its plasticizing effect on poly (vinyl chloride) Preparation of Blends," vol. 18, no. 1, pp. 2–7, 2016.
- [3] I. Omrani, A. Ahmadi, A. Farhadian, H. K. Shendi, N. Babanejad, and M. R. Nabid, "Synthesis of a bio-based plasticizer from oleic acid and its evaluation in PVC formulations," *Polym. Test.*, 2016.
- [4] W. He, G. Zhu, Y. Gao, H. Wu, Z. Fang, and K. Guo, "Green plasticizers derived from epoxidized soybean oil for poly (vinyl chloride): Continuous synthesis and evaluation in PVC films," *Chem. Eng. J.*,

- vol. 380, no. 122532, pp. 1–6, 2020.
- [5] V. V. Goud, S. Dinda, A. V. Patwardhan, and N. C. Pradhan, “Epoxidation of *Jatropha* (*Jatropha curcas*) oil by peroxyacids,” *Asia-Pacific J. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 346–354, 2010.
- [6] R. Mungroo, N. C. Pradhan, V. V. Goud, and A. K. Dalai, “Epoxidation of canola oil with hydrogen peroxide catalyzed by acidic ion exchange resin,” *JAACS, J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 85, no. 9, pp. 887–896, 2008.
- [7] M. Musik and E. Milchert, “Selective epoxidation of sesame oil with peracetic acid,” *Mol. Catal.*, vol. 433, pp. 170–174, 2017.
- [8] M. J. Jalil *et al.*, “Synthesis and physicochemical properties of epoxidized oleic acid-based palm oil,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 291, no. 1, 2019.
- [9] M. Bahadi, N. Salih, and J. Salimon, “D-Optimal design optimization for the separation of oleic acid from Malaysian high free fatty acid crude palm oil fatty acids mixture using urea complex fractionation,” *Appl. Sci. Eng. Prog.*, vol. 14, no. 2, pp. 175–186, 2021.
- [10] S. Leveneur, J. Zheng, B. Taouk, F. Burel, J. Wärnå, and T. Salmi, “Interaction of thermal and kinetic parameters for a liquid-liquid reaction system: Application to vegetable oils epoxidation by peroxy-carboxylic acid,” *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 45, no. 4, pp. 1449–1458, 2014.
- [11] A. F. Aguilera, P. Tolvanen, K. Eränen, S. Leveneur, and T. Salmi, “Epoxidation of oleic acid under conventional heating and microwave radiation,” *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 102, pp. 70–87, 2016.
- [12] M. J. Jalil, “Optimization of Palm Oleic Acid Epoxidation via in Situ Generated Performic Acid Using Taguchi Orthogonal Array Design and the Study of Reaction Kinetics,” *Smart Sci.*, vol. 7, no. 4, pp. 252–259, 2019.
- [13] D. R. Sawitri, P. Mulyono, Rochmadi, A. Hisyam, and A. Budiman, “Kinetic Investigation for in-situ Epoxidation of Unsaturated Fatty Acid Based on the Pseudo-steady-state-hypothesis (PSSH),” *J. Oleo Sci.*, vol. 69, no. 10, pp. 1297–1305, 2020.
- [14] S. Dinda, N. Sainath, R. Veeram, and R. B. Adusumalli, “Production of bio-epoxide and bio-adhesive from non-edible oil,” *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 33, no. 10, pp. 2915–2922, 2016.
- [15] S. Dinda, V. Ravisankar, and P. Puri, “Development of Bio-epoxide from Nahor (*Mesua ferrea* Linn) Oil,” *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 65, pp. 399–404, 2016, doi: 10.1016/j.jtice.2016.05.053.
- [16] E. Salzano, A. G. Agredaa, V. Russob, M. Di Serio, and E. Santacesaria, “Safety criteria for the epoxydation of soybean oil in fed-batch reactor,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 26, no. 1, pp. 39–44, 2012.
- [17] D. Priyadarshi and K. K. Paul, “Optimisation of Biodiesel Production Using Taguchi Model,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 10, no. 6, pp. 1547–1559, 2019.
- [18] S. H. Dhawane, B. Karmakar, S. Ghosh, and G. Halder, “Parametric optimisation of biodiesel synthesis from waste cooking oil via Taguchi approach,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 3971–3980, 2018.
- [19] S. Ranganathan, J. Tebbe, L. O. Wiemann, and V. Sieber, “Optimization of the lipase mediated epoxidation of monoterpenes using the design of experiments—Taguchi method,” *Process Biochem.*, vol. 51, no. 10, pp. 1479–1485, 2016.
- [20] R. Sathish Kumar, K. Sureshkumar, and R. Velraj, “Optimization of biodiesel production from Manilkara zapota (L.) seed oil using Taguchi method,” *Fuel*, vol. 140, pp. 90–96, 2015.
- [21] X. Cai *et al.*, “Influence of ring-opening reactions on the kinetics of cottonseed oil epoxidation,” *Int. J. Chem. Kinet.*, vol. 50, no. 10, pp. 726–741, 2018.
- [22] Irawati., C. Kurniawan., dan Harjono, “Optimalisasi Epoksidasi Fatty Acid Methyl Ester (FAME) Berbasis Palm Olein Sebagai Aditif Pemlastis Cat,” *Indones. Juournal Chem. Sci.*, vol. 8, no. 1, pp. 2–9, 2019.
- [23] J. L. Zheng, J. Warna, T. Salmi, F. Burel, B. Taouk, and S. Leveneur, “Kinetic Modeling Strategy for an Exothermic Multiphase Reactor System: Application to Vegetable Oils Epoxidation Using Prileschajew Method,” *AIChE J.*, vol. 62, no. 3, pp. 726–741, 2016.