

PENGARUH PENAMBAHAN ASAM LEMAK TERHADAP EPOKSIDASI
KEMOENZIMATIK MINYAK BIJI KETAPANG (*Terminalia catappa* L.)

EFFECT OF THE ADDITION OF FATTY ACIDS ON THE CHEMO-ENZYMATIC
EPOXIDATION OF KETAPANG SEED (*Terminalia catappa* L.) OIL

Eka Kusmiati, Dedy Suhendra, Erin Ryantin Gunawan

Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas

Mataram

Mataram, Indonesia

e-mail: ekaajlita19@mail.com

Abstrak: Epoksidasi kemoenzimatik minyak biji ketapang sebagai pengganti minyak bumi yang lebih ramah lingkungan dengan penambahan asam lemak telah diteliti. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan asam lemak terhadap karakteristik epoksi dan untuk mendapatkan kondisi optimum epoksidasi. Epoksidasi kemoenzimatik minyak biji ketapang dilakukan dengan mereaksikan minyak biji ketapang, asam lemak sebagai pembawa oksigen aktif, hidrogen peroksida (H_2O_2) sebagai donor oksigen, pelarut *n*-heksana, serta enzim lipase (Lipozyme TL IM) sebagai katalis. Bilangan oksiran (OOC) dan konversi relatif oksiran (RCO) yang dihasilkan masing-masing sebesar 3,15 % dan 68,77 % dengan nilai bilangan iod epoksi yang diperoleh sebesar 47,37 mg Iod/100 g epoksi.

Kata Kunci: Asam Lemak, Kemoenzimatik, Minyak Biji Ketapang, Bilangan Oksiran (OOC), Konversi Relatif Oksiran (RCO)

Abstract: Chemo-enzymatic epoxidation of ketapang seed oil as a more environmentally friendly substitute for petroleum with the addition of fatty acid has been investigated. This study aims to determine the effect of fatty acid addition on epoxy characteristics and to obtain the optimum condition of epoxidation. Chemo-enzymatic epoxidation of ketapang seed oil was carried out by reacting ketapang seed oil, fatty acid as active oxygen carriers, hydrogen peroxide (H_2O_2) as oxygen donor, *n*-hexane solvent, and lipase enzyme (Lipozyme TL IM) as catalyst. The oxirane number (OOC) and relative oxirane conversion (ROC) produced were

3,15% and 68,77% respectively with the epoxy iodine number value obtained of 47,37 mg Iod/100 g epoxy.

Keywords: Fatty Acid, Chemoenzymatic, Ketapang Seed Oil, Oxirane Number (OOC), Relative Conversion Oxirane (RCO)

PENDAHULUAN

Epoksi adalah senyawa yang dihasilkan dari reaksi epoksidasi minyak nabati atau minyak alam yang memiliki ikatan tak jenuh. Senyawa epoksi dapat diaplikasikan sebagai *stabilisator*, *plasticizers* pada polivinil klorida (PVC), sebagai surfaktan, agen anti korosif aditif pada minyak pelumas, dan bahan baku pestisida, serta dapat digunakan sebagai anti oksidan pada pengolahan karet alam (Listiana, dkk., 2017). Senyawa epoksi pada umumnya disintesis dari bahan baku turunan minyak bumi yang merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui, tidak ramah lingkungan serta ketersediannya yang semakin menipis. Oleh karena itu, dicari alternatif lain sebagai pengganti minyak bumi seperti minyak nabati. Senyawa epoksi berbahan baku minyak nabati memiliki kelebihan tersendiri dibandingkan dengan senyawa-senyawa epoksi berbahan baku minyak bumi (petrokimia) dikarenakan kelimpahan dan sifatnya yang dapat diperbaharui serta lebih ramah lingkungan. Minyak nabati juga diketahui memiliki kandungan asam lemak tak jenuh yang relatif tinggi yang dapat ditransformasikan menjadi senyawa epoksi.

Bahan baku minyak nabati yang telah banyak digunakan untuk mensintesis senyawa epoksi, diantaranya minyak jagung (Said, dkk., 2017), minyak biji kedelai (Firdaus, 2014), dan minyak kelapa sawit (Alamsyah, 2013). Namun, minyak nabati tersebut termasuk kedalam sumber minyak nabati bahan pangan (*edible oil*), sehingga jika digunakan sebagai bahan baku sintesis senyawa epoksi dapat menyebabkan permintaan yang tinggi terhadap bahan baku minyak tersebut, karna masih dijadikan sebagai sumber pangan. Oleh karena itu, diperlukan bahan baku alternatif lain seperti minyak nabati yang bukan termasuk kedalam sumber pangan (*non-edible*) yang ketersediannya melimpah seperti minyak biji ketapang (*Terminalia catappa L.*).

Biji ketapang diketahui memiliki kandungan minyak yang relatif tinggi dan mengandung asam lemak tak jenuh tinggi sehingga minyak biji ketapang memiliki potensi besar untuk digunakan sebagai bahan baku sintesis senyawa epoksi (Suhendra, dkk., 2018).

Menurut Suhendra, dkk. (2017) buah ketapang memiliki rendemen minyak yang tinggi yaitu sekitar 56 %. Komposisi minyak biji ketapang terdiri dari asam lemak jenuh dan tak jenuh. Asam lemak tersebut seperti asam palmitat (35 %), palmitoleat (0,38 %), stearat (4,55 %), oleat (38,72 %), dan linoleat (20,57 %). Hasil ini tidak jauh berbeda dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Gunawan, dkk. (2017) didapatkan kandungan minyak biji ketapang yaitu sebesar 54 %.

Kandungan asam lemak takjenuh yang tinggi pada minyak biji ketapang seperti asam oleat dan asam linoleat yang terdapat ikatan rangkap pada strukturnya dapat ditransformasikan menjadi gugus oksiran dengan mengoksidasi ikatan rangkap sehingga terbentuk senyawa epoksi melalui reaksi epoksidasi. Reaksi epoksidasi adalah reaksi oksidasi ikatan rangkap dengan suatu asam peroksi dan katalis membentuk cincin oksiran pada senyawa epoksi (Murniati, dkk., 2022). Metode epoksidasi pada umumnya dilakukan secara kimiawi yakni menggunakan asam-asam kuat salah satunya asamsulfat. Kelemahan penggunaan katalis asam kuat yaitu tidak selektif, dapat menyebabkan korosi pada peralatan yang digunakan selama proses, dan harus dinetralkan setelah dipisahkan dari produk akhir, sehingga membutuhkan biaya yang lebih mahal untuk proses pemurnian (Saurabh, dkk., 2011). Selain itu, penggunaan mineral kuat dalam reaksi menyebabkan reaksi samping yang tidak diinginkan seperti pembukaan cincin oksiran (Wibowo, 2013).

Sebagai upaya untuk mengurangi kelemahan epoksidasi dengan katalis asam kuat, maka pada penelitian ini dilakukan reaksi epoksidasi secara kemoenzimatik dengan enzim sebagai katalis dan pelarut organik. Penggunaan enzim bisa menjadi salah satu alternatif yang memungkinkan reaksi epoksidasi yang lebih ramah lingkungan dan lebih selektif (Tiran, dkk., 2008). Enzim merupakan biokatalisator memiliki sifat yang spesifik, ramah lingkungan, serta aktivitas yang tinggi (Moentamaria, dkk., 2017). Penelitian sebelumnya telah melakukan sintesis epoksi secara kemoenzimatik tanpa penambahan asam lemak yaitu oleh Humairaq (2021) yang melakukan sintesis epoksi secara kemoenzimatik dari minyak biji ketapang tanpa penambahan asam lemak dengan *Lipozyme* TL IM sebagai katalis. Hasil yang diperoleh yaitu didapatkan nilai bilangan oksiran sebesar 1,43 % dengan persentase konversi relatif oksiran sebesar 48,48%. Hasil yang diperoleh dari penelitian tersebut masih belum optimal. Oleh karena itu, untuk meningkatkan nilai bilangan oksiran serta persentase konversi relatif oksiran dilakukan proses epoksidasi secara kemoenzimatik dengan penambahan asam lemak. Seperti

yang dilakukan oleh Sun, dkk. (2011) yang telah melakukan sintesis epoksi secara kemoenzimatik dari minyak jagung dengan melakukan penambahan asam lemak yaitu asam stearat dan enzim lipase *amobil* dari *Candida antartika* (Novozym 435) sebagai katalis. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini yaitu nilai bilangan oksiran sebesar 2,9 % dan persen konversi relatif oksiran sebesar 85,3 %. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan asam lemak pada proses epoksidasi secara kemoenzimatik yang dilakukan dapat meningkatkan konversi oksiran yang didapatkan.

Penelitian ini dilakukan epoksidasi minyak biji ketapang secara kemoenzimatik dengan penambahan asam lemak. Enzim yang digunakan pada proses kemoenzimatik adalah enzim yang terimobilisasi yaitu *Lypozim* TL IM. Kelebihan dari enzim terimobilisasi adalah kestabilan yang tinggi dan proses pemisah dari media yang tinggi (Moentamaria, dkk., 2017). Proses epoksidasi yang dilakukan juga akan mengamati beberapa faktor yang mempengaruhi reaksi epoksidasi kemoenzimatik yaitu jenis asam lemak, konsentrasi asam lemak, dan pengaruh waktu reaksi.

METODELOGI PENELITIAN

Bahan kimia

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain biji buah ketapang, etanol 96%, aquades, metanol 96%, n-heksana, dietileter, kertas saring whatman, enzim lipase lipozym TL IM, natrium tiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0,1 N, kalium iodide (KI) 20%, hidrogen peroksida (H_2O_2) teknis 30%, plat KLT, NaOH 0,1 N, aquades, natrium anhidrat, larutan Wijis, indikator amilum, indikator Kristal violet 1%, asam asetat glisial, HBr 0,1 N dalam asetat glisial, indikator fenoftalein, silika gel, CCl_4 , larutan amilum 1%, asam stearat, asam oleat, dan asam linoleat.

Peralatan

Alat-alat yang digunakan meliputi corong pisah, pipet volume, pipet tetes, erlenmeyer, botol vial, *rubber bulb*, gelas kimia, botol kaca, cawan petri, gelas ukur, labu takar, labu leher tiga, timbangan analitik (DC-600A), *hot plate*, refluks, kolom kromatografi vakum, *magnetik stirrer*, *rotaty evaporator* ((B-ONE RE-1000VN), kondensor, seperangkat alat soklet, *chamber*, termometer, statif dan klem, spektrofotometer FT-IR (parkin Elmer Spectrum Two, USA).

PROSEDUR PENELITIAN

Ekstraksi dan Pemurnian Minyak Ketapang

Ekstraksi minyak inti buah ketapang dilakukan sesuai dengan metode pada penelitian sebelumnya oleh Suhendra, dkk. (2018) dengan modifikasi dan penyesuaian. Biji ketapang yang telah hancur ditimbang sebanyak 50 g dengan neraca analitik, lalu dibungkus dengan kertas saring dan dimasukkan kedalam alat timbal sokhlet. Air pendingin kemudian dialirkan melalui kondensor. Ekstraksi dilakukan dengan menggunakan 250 mL n-heksana pada suhu 60 °C selama 6 jam. Minyak hasil ekstraksi kemudian dimurnikan dengan dimasukkan kedalam kolom kromatografi yang berisi silika gel kemudian dielusi dengan n-heksana : dietileter (87:13 v/v). Hasil pemurnian diupkan untuk menghilangkan pelarut n-heksana menggunakan rotary evaporator pada suhu 40 °C dengan kecepatan 125 rpm. Minyak yang diperoleh kemudian ditentukan sifat fisika-kimia yang meliputi persen rendemen, bilangan asam, dan bilangan iod.

Persen rendemen dapat ditentukan dalam persamaan (1) berikut:

$$\text{Kadar Minyak} = \frac{\text{berat minyak}}{\text{berat biji}} \times 100 \%$$

Penentuan Bilangan Asam

Penentuan bilangan asam dilakukan menggunakan standar metode AOCS (*American Oil Chemist Society*) Ca 5a-40 dan AOCS cd 3d-63 dengan modifikasi. Bilangan asam dapat dihitung menggunakan persamaan (2) berikut:

$$\text{Bilangan asam} = \frac{A \times N \text{ NaOH} \times Mr \text{ NaOH}}{g}$$

Dimana A adalah volume larutan NaOH yang digunakan untuk titrasi dan g adalah massa sampel yang digunakan dalam satu kali uji bilangan asam.

Penentuan Bilangan Iod

Penentuan bilangan iod mengikuti standar AOCS (1997) titrasi dengan larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,1 N. bilangan iod dapat dihitung menggunakan persamaan (3) berikut:

$$BI = \frac{(B-S)}{m} \times N \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \times 12,691$$

Dengan B adalah volume awal titrasi, S adalah volume akhir titrasi, serta m adalah massa sampel.

Epoksidasi Minyak Ketapang Secara Kemoenzimatik dengan Penambahan Asam Lemak

Epoksidasi dilakukan dengan metode penelitian sebelumnya oleh Sun, dkk. (2011) dengan sedikit modifikasi dan penyesuaian. Minyak biji ketapang sebanyak 10 g dimasukkan ke dalam labu leher tiga yang dimasukkan dalam penangas air dan dilengkapi dengan kondensor dan termometer. Asam lemak 2,8 g (28% dari berat minyak), 0,3 g katalis enzim *Lipozyme* TL IM dan 25 g pelarut n-heksana ditambahkan ke dalam labu leher tiga dan kemudian dipanaskan pada suhu 40°C sambil diaduk menggunakan *mechanical stirrer* dengan kecepatan 600 rpm. Larutan H₂O₂ 30% sebanyak 14 g ditambahkan tetes demi tetes ke dalam campuran setelah 30 menit proses reaksi. Setelah itu, reaksi dibiarkan berlangsung selama 4 jam. Setelah reaksi selesai, campuran reaksi disaring untuk memisahkan enzim dari campuran (lapisan organik). Lapisan organik dicuci dengan air suling untuk menghilangkan hidrogen peroksida yang tidak bereaksi, dan menambahkan natrium sulfat anhidrat untuk menghilangkan sisa air dan kemudian dianalisis untuk mengetahui nilai bilangan oksirannya.

Penentuan Bilangan Oksiran

Penentuan bilangan oksiran hasil sintesis (*oxirane oxygen content/OOCe*) menggunakan AOCS Official Method Cd 9-57. Penentuan bilangan oksiran hasil sintesis (*oxirane oxygen/OOCe*) menggunakan sebanyak 0,5 g hasil sintesis epoksi dimasukkan kedalam Erlenmeyer 50 mL dan ditambahkan 10 mL asam asetat glasial, campuran larutan ditambahkan indikator Kristal violet sebanyak 5 tetes. Kemudian ditambahkan HBr 0,1 N dalam asam asetat glasial sampai larutan tetap berwarna hijau setelah dikocok selama 30 menit. Persentase bilangan oksiran dihitung dengan persamaan (5) berikut:

$$OO_{\text{exp}}, \% = \frac{V \times N \times 1,6}{W} \times 100$$

OO_{exp} adalah bilangan oksiran yang diperoleh berdasarkan eksperimen, V adalah volume asam bromide yang digunakan, dan N adalah nilai normalitas dari asam bromide 0,1 N. Nilai bilangan eksperimen yang diperoleh digunakan untuk menentukan persen konversi menjadi oksiran (% Oks) dengan persamaan (6) berikut:

$$\% \text{ Oks} = \frac{OO_{\text{exp}}}{OO_{\text{th}}} \times 100 \%$$

Dimana nilai OO_{th} adalah nilai bilangan oksiran maksimum berdasarkan teori. Nilai OO_{th} dihitung dengan persamaan (7) berikut:

$$OO_{\text{th}} = \frac{\frac{IV_o}{2A_i}}{100 + \left(\frac{IV_o}{2A_i}\right)A_o} \times A_o \times 100$$

Dengan A_i adalah berat atom iodium (126,90) dan A_o adalah berat atom oksigen (16,00). IV_o adalah bilangan iod dari minyak (sampel)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Minyak Biji Ketapang

Ekstraksi minyak biji ketapang dilakukan secara sokletasi dengan *n*-heksana sebagai pelarut. Penggunaan *n*-heksana sebagai pelarut dikarenakan memiliki sifat kepolaran yang sama dengan bahan yang akan diekstraksi yaitu minyak biji ketapang yang akan mudah larut dalam pelarut non-polar yakni berupa pelarut *n*-heksana (Handayani, dkk., 2014). Hal ini sesuai dengan prinsip “*like dissolve like*”. Kadar minyak biji ketapang yang diperoleh sebesar 56,54 %. Persentase kadar minyak biji ketapang yang didapatkan lebih tinggi dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan Putri, dkk. (2018) ekstraksi minyak biji ketapang dilakukan secara maserasi didapatkan persentase kadar minyak biji ketapang sebesar 42 %. Kadar minyak yang diperoleh juga tidak jauh berbeda dengan kadar minyak biji ketapang yang diperoleh Suhendra, dkk. (2018) ekstraksi minyak dilakukan dengan metode yang sama

diperoleh kadar minyak biji ketapang sebesar 59,75 %. Perbedaan kadar minyak biji ketapang yang dihasilkan dipengaruhi oleh kematangan buah ketapang dan kondisi geografis. Selain itu, perbedaan hasil persentase kadar minyak biji ketapang disebabkan karena waktu yang digunakan dalam proses ekstraksi tidak sama (Manzoor, 2007). Berikut karakteristik fisika kimia minyak biji ketapang dilihat pada Tabel 1.

Table 1. Sifat fisika kimia minyak biji Ketapang

No.	Parameter	Nilai
1	Warna	Kuning bening
2	Kadar Minyak	56,54 %.
3	Bilangan Asam	0,69 mg NaOH/g minyak
4	Bilangan Iod	76.146 mg Iod/100 g minyak

Epoksidasi Minyak Ketapang Secara Kemoenzimatik dengan Penambahan Asam Lemak

sintesis epoksi secara kemoenzimatik dari minyak biji ketapang dengan penambahan asam lemak diperoleh nilai bilangan oksiran eksperimen sebesar 3,15 %. Bilangan oksiran eksperimen yang didapatkan, dapat digunakan untuk memperoleh persen relatif konversi menjadi oksiran dengan membandingkan nilai bilangan oksiran eksperimen dengan nilai bilangan oksiran teori yaitu diperoleh persen relatif konversi sebesar sebesar 68,77 %. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan dengan hasil persen konversi relatif oksiran yang diperoleh oleh Humairaq (2021), melakukan sintesis epoksi kemoenzimatik tanpa penambahan asam lemak dengan persen konversi relatif oksiran sebesar 48,48 %. Namun lebih kecil dibandingkan dengan hasil persen konversi relatif oksiran yang diperoleh Vlcek & Petrovic (2006), melakukan sintesis epoksi secara kemoenzimatik dengan penambahan asam lemak (asam oleat), diperoleh hasil persen konversi relatif oksiran sebesar 94,74 %.

Keberhasilan sintesis epoksi dilihat dari perubahan nilai bilangan iod dari minyak menjadi epoksi yaitu terjadi penurunan, dari bilangan iod minyak biji ketapang sebesar 76,146 mg Iod/100 g minyak menjadi 47,37 mg Iod/100 g epoksi setelah disintesis menjadi senyawa epoksi. Penurunan bilangan iod pada sintesis epoksi juga terjadi pada penelitian dilakukan Irawati, dkk. (2019) menggunakan *fatty acid methyl ester* (FAME) berbasis minyak sawit memperoleh penurunan bilangan iod dari 45,07 mg Iod/100 g minyak menjadi 5,24 mg

Iod/100 g epoksi. Penurunan bilangan iod ini menunjukkan tingkat ketidakjenuhan epoksi lebih rendah dibandingkan ketidakjenuhan dengan minyak biji ketapang, yang disebabkan karena ikatan rangkap pada minyak terkonversi menjadi cincin oksiran pada senyawa epoksi sehingga terjadi penurunan bilangan iod. Selain bilangan iod, keberhasilan sintesis epoksi juga ditentukan dengan besar kecilnya nilai bilangan oksiran yang diperoleh. Penentuan bilangan oksiran dilakukan karna tidak cukup hanya dengan menentukan bilangan iod saja. Karna penentuan bilangan iod hanya menunjukkan penurunan jumlah ikatan rangkap pada minyak dan tidak dapat mengetahui jumlah grup oksiran, sehingga perlu dilakukan uji bilangan oksiran. Hasil yang didapatkan melebihi 50 %, namun penurunan dari bilangan iod minyak biji ketapang ke bilangan iod epoksi kurang dari setengahnya. Hal ini dapat disebabkan oleh bilangan oksiran yang didapatkan tidak hanya berasal dari ikatan rangkap minyak biji ketapang, namun, ikatan rangkap dari asam oleat yang ditambahkan juga ikut terkonversi menjadi gugus oksiran. Bilangan oksiran yang didapatkan dalam kondisi optimum sebesar 3,15 % dan setelah diubah menjadi persen relatif konversi oksiran sebesar 68,77 %.

Tabel 4.5 Karakteristik Minyak Biji Ketapang dan Epoksi Hasil Penelitian

No	Parameter Uji	Nilai	
		Minyak Biji Ketapang	Epoksi
1	Warna	Kuning bening	Putih Tulang
2	Bilangan Iod	76,146 mg Iod/100 g minyak	47,37 mg Iod/100 g epoksi
4	Bilangan oksiran (%)	-	3,15 %
5	Konversi Relatif Oksiran	-	68,77 %

KESIMPULAN

Penambahan asam lemak pada reaksi epoksidasi kemoenzimatik minyak biji ketapang dapat meningkatkan gugus oksiran senyawa epoksi. Nilai persentase nilai bilangan oksiran serta konversi relatif oksiran tertinggi diperoleh sebesar 3,15 % dan 68,77 %. Epoksi

yang disintesis dari minyak biji ketapang secara kemoenzimatik memiliki karakterisasi berwarna putih tulang dengan nilai bilangan iod 47,37 mg Iod/100 g epoksi.

Referensi

- Abdullah, S. (2012). Pengaruh Waktu Reaksi Terhadap Bilangan Hidroksil pada Pembentukan Polioliol dari Epoksidasi CPO dan Curcas Oil. *Konversi*, 1(1), 15-24.
- Abdulmelek, E., Arumugam, M., Mizan, H. N., Rahman, M. B. A., Basri, M., & Salleh, A. B. (2014). Chemoenzymatic Epoxidation of Alkenes and Reusability Study of the Phenylacetic Acid. *The Scientific World Journal*, 1-8.
- Alamsyah, R., Susanti, I., Siregar, N. C., & Heryani, S. (2013). Pengaruh Perbandingan Asam Format dan Hidrogen Peroksida dalam Pembuatan Senyawa Epoksi dari Minyak Kelapa Sawit. *Balai Besar Industri Agro*, 30(2), 55-74.
- AOAC. Official Method Cd 3d-63, Am2-93. (1995). *Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society*, Champaign, IL, USA: AOCS Press.
- AOCS. Official Method Ca 5a-40. (1997). *Official Methods and Recommended Practices of the AOCS*. 5th edn. American Oil Chemist's Society Champaign, Illinois.
- AOCS. Official Method Cd 8-53. (1997). *Official Methods and Recommended Practices of the AOCS*. 5th edn. American Oil Chemist's Society Champaign, Illinois.
- AOCS, Method Cd 9-57, Reapproved, (1989). Oxirane Oxygen. *Official and Recommended Method of the American Oil Chemists' Society*, 3rd Edition. American Oil Chemists' Society, Champaign.
- Firdaus, F. E. (2014). Synthesis and Characterization of Soy-Based Polyurethane Foam With Utilization of Ethylene Glycol in Polyol. *Makara Journal Technology*, 18(2), 11-16.
- Gunawan, E. R., Suhendra, D., Nurita, A. D., & Komalasari, D. (2017). Four Factor Surface Responce Optimazation of Etyl Palmitate from Terminalia cattapa L. Karnel Oil. *Asian Journal of Chemestry*, 29(10), 2107–2112.
- Gunawan, E. R., Suhendra, D., Arimanda, P., Asnawati, D., & Murniati. (2023). Epoxidation of *Terminalia catappa* L. Seed Oil; Optimization Reaction. *South African Journal Chemical Engeneering*, 43,128-134.

- Handayani, P. A., Nurjanah, E., & Rengga, W. D. P. (2014). Pemanfaatan Limbah Sekam Padi Menjadi Silika Gel. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 3(2), 55-59.
- Humairoq, S. (2021). Epoksidasi Minyak Inti Biji Ketapang Secara Kemoenzimatik. Skripsi Jurusan Kimia-Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam-Universitas Mataram. Mataram.
- Irawati, Kurniawan, C., & Harjono. (2019). Optimasi Epoksidasi Fatty Acid Methyl Esters (FAME) Berbasis Palm Olien Sebagai Aditif Pemlastis Cat. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 8(1), 1-8.
- Listiana, Y., Hilde, R. T., & Mersi, S. S. (2017). Pengaruh Konsentrasi Katalis dan Waktu Reaksi pada Pembuatan Epoksi Minyak Goreng Bekas. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 6(3), 28-32.
- Moentamaria, D., Agaian, G., Ridhawati, M. M., Chumaidi, A. & Hendrawati, N. (2017). Hidrolisis Minyak Kelapa dengan Lipase Terimobilisasi Zeolit pada Pembuatan Perisa Alami. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 5(2), 84–91.
- Murniati, Gunawan, E. R., Suhendra, D., Asnawati, D., & Qurba, P. (2022). Sintesis Senyawa-Senyawa Epoksi dari Asam Lemak Minyak Nyamplung (*Calophyllum inophyllum L.*). *Jurnal Riset Kimia*, 13(1), 89-99.
- Putri, N. P., Muslim, M. A., Sitonis, J. G., Putra, D. L., & Marjenah. (2018). Extraction of Ketapang Seeds (*Terminalia catappa L.*) As Raw Material of Biodiesel. *Konversi*, 7(1), 10-14.
- Said, M., Fita, M. S. & Sugiarti, R. A. (2017). Sintesis Senyawa Polioliol Melalui Reaksi Hidroksilasi Senyawa Epoksi Minyak Jagung. *Jurnal Teknik Kimia*, 23(3), 183–190.
- Saurabh, T., Patnaik, M., Bhagt, S. L. & Renge, V. C. (2011). Epoxidation of Vegetable Oils: A Review. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 2(94), 491-501.
- Selviany, N., Fajrin, D., & Melwita, E. (2015). Pengaruh Temperatur dan Waktu pada Pembuatan Plastisizer dengan Reaksi Epoksidasi Minyak Limbah Ikan Patin. *Jurnal Teknik Kimia*, 21(2), 40-44.
- Suhendra, D., Gunawan, E. R., Yuanita, E., & Nazili, M. (2018). Optimazation of Lipase-Catalyzed Synthesis of Fatty Hydroxamic Acid from *Teminalia catappa L.* Karnael Oil. *Oriental Journal of Chemistry*, 34(5), 2370-2377.

- Suhendra, D., Gunawan, E. R., Nurita, A. D., Komalasari, D., & Ardianto, T. (2017). Optimazation of the Enzymatic Synthesis of Biodiesel from *Terminalia Cattapa L.* Karnel Oil Using Response Surface Methodology. *Journal of Oleo Science*, 66(3), 209-215.
- Sun, S., Yang, G., Bi, Y., & Liang, H. (2011). Enzymatic Epoxidation of Corn Oil by Perstearic Acid. *Journal American Oil Chemistry Social*, 88, 1567-1571.
- Tiran, C., Lecomete, J., Dubreuq, E., & Villeneuve, P. (2008). Chemoenzymatic Epoxidation of Fatty Compounds-Focus on Processes Involving A Lipase-Catalyzed Perhydrolysis Step. *Dossier*, 15(3), 179-183.
- Vlcek, T., & Petrovic, Z. S. (2006). Optimization of the Chemoenzymatic Epoxidation of Soybean Oil. *Journal American Oil Chemistry Social*, 83(3), 247-252.
- Wibowo, T. Y., Rusmandana, B., & Astuti. (2013). Degradasi Cincin Oksiran dari Epoksi Asam Oleat dalam Suatu Sistem Reaksi Katalis Cair. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 14(1), 29-34.