MODIFIKASI SLS DENGAN EPOKSIDA DARI ASAM OLEAT DAN HIDROGEN PEROKSIDA UNTUK MENINGKATKAN KUALITAS SURFAKTAN PADA EOR

Chitra Ria Ariska*, Suryo Purwono, Bardi Murachman
Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik
Universitas Gajah Mada
Kampus UGM, Jalan Grafika 2, Yogyakarta 55281
Email: chitra.ariska@gmail.com

Abstrak

Surfaktan adalah salah satu bahan kimia yang digunakan dalam *Enhanced Oil Recovery* (EOR) untuk meningkatkan produksi minyak. Salah satu jenis surfaktan yang banyak digunakan adalah *Sodium Ligno Sulfonat* (SLS) karena mudah didegradasi limbahnya. Namun modifikasi dengan senyawa lain masih perlu dilakukan untuk menurunkan tegangan antarmuka atau *Inter Facial Tension* (IFT) hingga mencapai *ultralow* IFT ($\pm 10^{-3}$ mN/m). Salah satu bahan kimia yang dapat digunakan untuk modifikasi surfaktan adalah epoksida karena memiliki cincin oksiren yang reaktif. Penambahan epoksi oleat ini akan meningkatkan kelarutan surfaktan dalam minyak sehingga didapatkan mikroemulsi yang lebih stabil. Modifikasi SLS dibuat dengan menambahkan epoksida dengan variasi konversi yang dihasilkan dari proses epoksidasi. Percobaan dilakukan pada temperatur 70 °C, rasio perbandingan epoksida:SLS adalah 1:2 dengan waktu reaksi 1 jam. IFT produk modifikasi diukur pada temperatur 30-60 °C dan diuji kestabilan mikroemulsinya berdasarkan waktu pembentukan mikroemulsi sampai kembali pada keadaan semula. Dari penelitian didapatkan bahwa epoksida dapat menurunkan IFT. IFT paling rendah dihasilkan dari modifikasi epoksida dengan konversi 10%, yaitu $3,7 \times 10^{-3}$ mN/m dan memiliki kestabilan paling baik dengan waktu emulsi 113 menit.

Kata kunci: epoksida, Sodium Ligno Sulfonat (SLS), mikroemulsi, surfaktan, EOR

Abstract

Surfactant is one of the compounds used in Enhanced Oil Recovery (EOR) which function is to enhance the oil production. One of the surfactants widely used is Sodium Ligno Sulfonat (SLS) due to its high degradability. However the modification with another compound is still needed in order to decrease its Inter Facial Tension (IFT) until reach the *ultralow* IFT ($\pm 10^{-3}$ mN/m). One of the chemical compounds used to modify the surfactant is epoxide because it has reactive oxirane ring. The addition of oleic epoxide will increase solubility of surfactant in oil so it brings more stable microemulsion. Epoxidation of oleic acid was carried out with peroxyacetic acid that was generated *insitu* from aqueous hydrogen peroxide and glacial acetic acid. The modification of SLS was then done by adding the epoxide in various conversion resulted from epoxidation. The experiment was investigated at temperature, ratio of epoxide to SLS and reaction time of 70 °C, 1:2 and 1 hour, respectively. The modified product were then measured their IFT at temperature of 30-60 °C and tested the stability of microemulsion based on time of formation of microemulsion up back in its original state. The present study revealed that epoxides has capability to decrease IFT. The results of experiment shows that the lowest IFT is modification of epoxide with the conversion of 10% as $3,7 \times 10^{-3}$ mN/m and has most excellent stability with time 113 minutes.

Keywords: epoxide, Sodium Ligno Sulfonat (SLS), microemulsion, surfactant, EOR

*korespondensi

1. Pendahuluan

Indonesia adalah negara yang kaya sumber daya alam, salah satunya adalah minyak bumi. Produksi minyak Indonesia termasuk yang terbesar dan salah satu yang terbaik di dunia. Namun, pemanfaatan sumur-sumur minyak di Indonesia masih kurang optimal. Hal ini karena keterbatasan dalam proses produksi.

Proses perolehan minyak bumi dapat dikelompokkan menjadi tiga fasa, yaitu fasa primer, fasa sekunder dan fasa tersier. Pada fasa primer diterapkan proses alami yang tergantung pada kandungan energi alam pada reservoir dan proses stimulasi menggunakan metode asam (*acidizing*), metode *fracturing*, dan metode sumur horisontal (*horizontal wells*). Pada fasa sekunder diterapkan proses *immiscible gas flood* dan *water flood*. Metode pada fasa tersier sering juga disebut sebagai metode *enhanced oil recovery* (EOR) (Gomaa, 1997). Pada fasa primer, rata-rata dapat mengembalikan 15-20% perolehan minyak. Pada tahap fasa sekunder, biasanya memberikan 15-25% perolehan minyak. Sehingga pada banyak reservoir, fasa primer dan sekunder hanya dapat mengembalikan kurang dari setengah total jumlah minyak. (Holmberg dkk., 1998).

Metode EOR melibatkan proses injeksi material yang dapat menyebabkan perubahan dalam *reservoir* seperti komposisi minyak, temperatur, rasio mobilitas, dan karakteristik interaksi batuan-fluida. Metode EOR dapat dikelompokkan berdasarkan material yang diinjeksikan ke *reservoir* yaitu metode panas (air panas, *steam stimulation*, *steamflood*, *fireflood*), metode kimia (polimer, surfaktan, alkali), metode *solvent-miscible* (pelarut hidrokarbon, CO₂, N₂, gas hidrokarbon, campuran gas alam) dan lainnya (busa, mikrobia). Meskipun metode EOR kadang disebut sebagai *recovery* tersier, namun bukan berarti metode EOR ini diterapkan setelah fasa sekunder. Beberapa metode EOR dapat diterapkan setelah fasa primer atau bahkan saat proses pencarian minyak (Gomaa, 1997).

EOR adalah teknik untuk meningkatkan kapasitas produksi minyak mentah dari lapangan minyak. Dengan EOR, produksi minyak dapat meningkat 30-60% (US Department of Energy, 2011) bahkan lebih dibandingkan dengan *primary* dan *secondary recovery* yang total hanya dapat mengekstrak 20-40% minyak dari reservoir (Electric Power Research Institute, 1999).

Injeksi bahan kimia (*chemical flooding*) adalah teknologi EOR yang sangat menjanjikan, terutama pada lapangan-lapangan dangkal yang tidak mungkin dilakukan injeksi CO₂ dan N₂ karena tekanan rekahnya yang rendah (Eni dkk., 2007). Injeksi kimia dilakukan dengan menginjeksikan bahan kimia seperti surfaktan, polimer, dan alkali baik secara sendiri, gabungan atau berkelanjutan pada sumur-sumur tua yang dianggap masih potensial. Dalam penelitian ini, bahan kimia yang digunakan adalah surfaktan. Tujuan digunakannya surfaktan adalah menurunkan tegangan antarmuka (*inter facial tension*) atau IFT minyak-air di dalam reservoir. Sehingga akan meningkatkan efisiensi pendesakan (*displacement efficiency*).

Menurut Matheson (1996), kelompok surfaktan yang penggunaannya dalam jumlah terbesar adalah surfaktan anionik. Karakteristiknya yang hidrofilik disebabkan karena adanya gugus ionik yang cukup besar, yang biasanya berupa grup sulfat atau sulfonat. Beberapa contoh surfaktan anionik yaitu linear alkilbenzen sulfonat (LAS), alkohol sulfat (AS), alkohol eter sulfat (AES), alfa olefin sulfonat (AOS), parafin (*secondary alkane sulfonate*, SAS) dan metil ester sulfonat (MES).

Surfaktan pada umumnya disintesis dari turunan minyak bumi, seperti linier alkilbenzen sulfonat (LAS), alkil sulfonat (AS), alkil etoksilat (AE) dan alkil etoksilat sulfat (AES). Surfaktan dari turunan minyak bumi dan gas alam ini dapat menimbulkan pencemaran terhadap lingkungan, karena surfaktan ini setelah digunakan akan menjadi limbah yang sukar terdegradasi. Selain itu, minyak bumi yang digunakan adalah sumber bahan baku yang tidak dapat diperbaharui. Masalah inilah yang menyebabkan banyak pihak mencari alternatif surfaktan yang mudah terdegradasi dan berasal dari bahan baku yang dapat diperbaharui (Herawan, 1998; Warwel dkk., 2001).

Surfaktan yang akan dikembangkan lebih lanjut adalah jenis Sodium Ligno Sulfonat (SLS), surfaktan anionik hasil sulfonasi lignin dan garam natrium. Lignin adalah limbah dari pabrik pulp yang jumlahnya sangat banyak dan harganya murah. Penggunaan lignin sebagai surfaktan dapat menurunkan biaya produksi EOR sebesar 40-60% (Nae dan Davis, 1992). Namun demikian, SLS memiliki IFT yang

masih tinggi, sehingga perlu dimodifikasi dengan gugus epoksida dari asam oleat dengan rantai alkil panjang. Gugus epoksi memiliki cincin oksiren yang sangat reaktif sehingga akan mudah untuk direaksikan dengan SLS, sedangkan penambahan rantai alkil pada gugus epoksi akan meningkatkan kelarutan surfaktan dalam minyak. Modifikasi ini dilakukan untuk mendapatkan mikroemulsi yang lebih stabil dan IFT yang rendah (dapat mencapai 10^{-3} mN/m). Mikroemulsi adalah suatu sistem dispersi minyak dan air yang distabilkan oleh lapisan antarmuka dari molekul surfaktan (Bakan, 1995). Dengan mikroemulsi yang stabil, dapat secara drastis mengurangi IFT hingga 0,001 mN/m (Lake, 1989).

2. Metodologi

Untuk membuktikan kebenaran hipotesis perlu dirancang serangkaian penelitian secara eksperimental. Penelitian terbagi menjadi 4 tahap. Tahap pertama adalah reaksi epoksidasi secara in situ dengan asam perasetat dibuat serentak dengan reaksi epoksidasinya (Gan dkk., 1992) dengan menggunakan hidrogen peroksida berlebih (Gall dan Greenspan, 1955) pada berbagai variasi temperatur (50–80 °C), perbandingan mol asam asetat dan hidrogen peroksida (1:1, 1:2, 1:3 dan 1:4) selama 4 jam. Tahap kedua adalah modifikasi epoksida dan SLS dengan mereaksikan epoksida pada berbagai variasi konversi (0–90%) dengan SLS. Tahap ketiga adalah pengujian IFT dan tahap yang terakhir adalah uji kestabilan mikroemulsi.

Pada penelitian ini, bahan baku yang digunakan adalah asam oleat 88%, hidrogen peroksida 50%, asam asetat 96% dan asam sulfat 98% sebagai katalis (Yuliasari dan Herawan, 1999; Sinaga, 2007). Reaksi epoksidasi terdiri dari dua tahap, pertama pembentukan asam perasetat dengan mereaksikan asam asetat dan hidrogen peroksida dan tahap kedua adalah mereaksikan asam perasetat dengan asam oleat menghasilkan epoksida. Hasil dari reaksi dipisahkan dan dicuci dengan aquadest hangat untuk menghilangkan sisa asam. Epoksida yang dihasilkan dianalisis dengan bilangan iodine untuk menentukan konversi asam oleat.

Untuk modifikasi, epoksida dengan variasi konversi (0–90%) direaksikan dengan SLS pada temperatur 70 °C dengan perbandingan berat epoksida dan SLS 1:2

selama 1 jam. Reaksi modifikasi ini adalah reaksi pembukaan cincin oksiren epoksida dalam suasana asam (Sastrohamidjojo dan Pranowo, 2002), sehingga ada dua kemungkinan mekanisme yang dapat terjadi pada reaksi modifikasi ini, yaitu reaksi modifikasi dengan pemutusan gugus H pada alkil (Gambar 1a) dan reaksi modifikasi dengan pemutusan gugus H pada fenol (Gambar 1b).

Gambar 1a. Reaksi modifikasi SLS-Epoksida dengan pemutusan gugus H pada alkil

Gambar 1b. Reaksi modifikasi SLS-Epoksida dengan pemutusan gugus H di fenol

IFT hasil modifikasi diuji dengan metode putaran kapiler menggunakan minyak Nglobo. Minyak Nglobo berwarna hitam gelap dengan densitas spesifik 1,1454 pada temperatur 25 °C. Pengujian kestabilan mikroemulsi dilakukan berdasarkan waktu kestabilan dengan cara mencampur minyak Nglobo dan surfaktan yang telah dilarutkan dalam *brine* Nglobo dengan konsentrasi 2 %-

berat. Pencampuran dilakukan dengan membolak-balik tabung reaksi sebanyak 30 kali agar larutan homogen. Kestabilan mikroemulsi dilihat dari waktu yang diperlukan hingga larutan terpisah seperti semula.

3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian yang dilakukan terdiri dari dua tahap, yaitu tahap pertama adalah reaksi epoksidasi asam oleat pada reaktor *batch* dan tahap kedua adalah reaksi modifikasi dari epoksida hasil reaksi pertama dengan SLS untuk memperoleh nilai IFT yang paling rendah.

Reaksi epoksidasi merupakan reaksi seri dengan reaksi pertama adalah reaksi pembentukan asam perasetat dari asam asetat dan hidrogen peroksida. Reaksi kedua adalah reaksi asam perasetat dan asam oleat membentuk epoksida. Reaksi ini dilakukan pada temperatur 50–80 °C, tekanan 1 atm, waktu reaksi 4 jam, menggunakan katalis asam sulfat pekat dan kecepatan pengadukan 800 rpm. Mekanisme reaksi epoksidasi yang terjadi secara *in situ* dapat dituliskan seperti pada Gambar 2a dan 2b.

3.1 Perbandingan Modifikasi Epoksida dengan SLS Murni dan Epoksida Murni

Untuk modifikasi epoksida dengan SLS digunakan variasi konversi epoksida (0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9) yang direaksikan dengan SLS pada temperatur 70 °C dengan perbandingan epoksida:SLS adalah 1:2 selama 1 jam.

3.2 Tegangan Antarmuka (IFT)

Pengukuran IFT menggunakan minyak yang berasal dari sumur Nglobo pada temperatur 30, 40, 50 dan 60 °C yang disesuaikan dengan kondisi temperatur sumur. Pelarut yang digunakan untuk surfaktan adalah *brine* Nglobo dengan konsentrasi larutan 2 %-berat.

Hubungan antara IFT dengan temperatur pada epoksida murni dan modifikasi disajikan pada Gambar 3. Pada Gambar 3 terlihat bahwa semakin tinggi temperatur, nilai IFT surfaktan akan semakin kecil. Hal ini dikarenakan temperatur yang semakin tinggi akan meningkatkan mobilitas molekul surfaktan dan gaya kohesi antar molekul menjadi sangat rendah sehingga IFT juga akan semakin rendah (Myers, 2006). Peningkatan temperatur meningkatkan konversi (Khairat dan Herman, 2004) juga mempengaruhi densitas surfaktan. Densitas akan semakin turun dengan semakin meningkatnya temperatur, sehingga nilai IFT juga akan semakin turun.

Pada Gambar 3 juga terlihat bahwa penambahan epoksida dapat menurunkan IFT, karena pada epoksida terdapat senyawa alkil rantai panjang yang dapat meningkatkan kelarutan surfaktan dalam minyak. Sedangkan untuk modifikasi SLS-epoksida dapat memberikan nilai IFT yang lebih rendah dibandingkan SLS murni atau epoksida murni pada konversi epoksida tertentu. Ini karena pada modifikasi SLS, terdapat penggabungan gugus alkil rantai panjang dari asam oleat yang dapat meningkatkan kelarutan surfaktan dalam minyak dan gugus sulfonat dari SLS yang dapat meningkatkan kelarutan surfaktan dalam air. Sehingga didapatkan surfaktan baru yang memiliki keunggulan gabungan dari kedua reaktannya.

Dari grafik juga terlihat bahwa kenaikan konversi epoksida tidak memberikan kecenderungan penurunan IFT pada surfaktan. Hal ini dimungkinkan adanya senyawa lain yang terbentuk dalam reaksi epoksidasi atau dalam reaksi modifikasi SLS-epoksida yang memberikan pengaruh terhadap nilai IFT surfaktan.

Gambar 3. Grafik hubungan IFT epoksida terhadap temperatur pada berbagai konversi epoksida, (a) SLS dan epoksida murni dan (b) modifikasi SLS-epoksida

3.3 Uji Kestabilan Mikroemulsi

Campuran surfaktan-air-minyak adalah faktor penting dalam pembentukan beberapa macam jenis emulsi yang dapat menurunkan tegangan antarmuka ke tingkat yang sangat rendah, hingga orde 10^{-2} sampai 10^{-4} mN/m, dan dapat digunakan dalam injeksi kimia (Sugihardjo, 2002). Jenis emulsi yang paling diharapkan dalam proses EOR adalah emulsi fasa tengah (mikroemulsi) atau paling tidak emulsi fasa bawah (Sugihardjo, 2002). Menurut Swern (1979), kemampuan surfaktan untuk meningkatkan kestabilan mikroemulsi tergantung dari kontribusi gugus polar (hidrofilik) dan gugus non polar (lipofilik). Tipe emulsi dan kestabilan mikroemulsi ditentukan berdasarkan *Hydrophile-Lipophile Balance* (HLB). HLB adalah salah satu parameter kuantitatif untuk menyatakan hidrofilitas dan fungsi surfaktan dalam suatu larutan (Holmberg dkk., 1998). Dengan mengetahui nilai HLB, kita dapat mengetahui kecenderungan kelarutan surfaktan dalam minyak atau air. Namun karena tidak mengukur jumlah gugus hidrofilik dan lipofilik, maka dalam penelitian ini pengujian kestabilan mikroemulsi hanya dilakukan berdasarkan waktu kestabilan mikroemulsi dengan perbandingan volume minyak-air yang sama.

Uji kestabilan mikroemulsi dilakukan dengan memasukkan minyak Nglobo dan larutan surfaktan (epoksida) pada berbagai konversi epoksida dengan perbandingan volume yang sama kedalam gelas ukur 10 ml dan kemudian dicampur hingga homogen. Pengukuran dilakukan pada temperatur ± 25 °C. Kestabilan diukur dari waktu yang dibutuhkan oleh campuran minyak-surfaktan

agar terpisah kembali seperti semula sesuai pengamatan visual. Data hasil pengujian kestabilan mikroemulsi pada berbagai konversi epoksida dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 4.

Tabel 1. Data Kestabilan Mikroemulsi pada Berbagai Konversi Epoksida

Konversi Epoksida (%)	Waktu Kestabilan (menit)
10	113
50	37
70	11
90	10

Gambar 4. Grafik hubungan konversi dan waktu kestabilan mikroemulsi

Dari Tabel 1 dan Gambar 4 terlihat bahwa kenaikan konversi epoksida justru menurunkan kestabilan mikroemulsi. Epoksida dengan konversi 10 % yang memiliki waktu kestabilan mikroemulsi yang paling lama untuk kembali pada keadaan semula setelah pencampuran. Hal ini dimungkinkan karena jumlah gugus hidrofilik dan lipofilik yang setara sehingga mempengaruhi nilai *Hydrophile-Lipophile*

Balance (HLB) surfaktan yang berdampak pada waktu kestabilan mikroemulsinya yang lebih lama dibandingkan dengan yang lain. Kestabilan emulsi secara visual dapat dilihat pada Gambar 5.

Pada Gambar 5 terlihat terjadi pembentukan mikroemulsi pada sampel. Hal-hal mempengaruhi pembentukan mikroemulsi adalah kadar salinitas, berkurangnya panjang rantai karbon, meningkatnya perbandingan brine/minyak, meningkatnya perbandingan larutan surfaktan/minyak, temperatur, konsentrasi surfaktan dan meningkatnya berat molekul surfaktan (Sugihardjo, 2002). Ketidakstabilan mikroemulsi yang terlihat pada Gambar 5 dipengaruhi oleh panjang molekul. Panjang molekul sangat kritis untuk keseimbangan gugus hidrofilik dan lipofilik. Apabila rantai hidrofobik terlalu panjang akan terjadi

ketidakseimbangan, yaitu afinitas untuk gugus asam lemak yang terlalu besar atau sebaliknya afinitas untuk gugus air yang terlalu kecil. Hal ini akan ditunjukkan oleh keterbatasan kelarutan dalam air. Sebaliknya, apabila rantai hidrofobiknya terlalu pendek, maka permukaan molekul surfaktan tidak akan bersifat aktif dan akan memiliki keterbatasan kelarutan dalam minyak (Swern, 1979).

Uji kestabilan mikroemulsi juga dilakukan pada SLS modifikasi dengan membandingkannya dengan SLS murni dan epoksida murni. Dari hasil pengamatan didapatkan untuk SLS murni memiliki waktu mikroemulsi selama 371 menit, epoksida murni (konversi 70 % dengan IFT yang paling rendah) selama 11 menit dan SLS modifikasi selama 33 menit. Gambar hasil pengujian disajikan pada Gambar 6.

Gambar 5. Uji kestabilan mikroemulsi minyak Nglobo-larutan epoksida pada berbagai konversi (dari kiri ke kanan: Epoksi 10%, 30%, 50%, 70% dan 90%)

Gambar 6. Uji kestabilan mikroemulsi minyak Nglobo dengan SLS murni, epoksida murni dan SLS modifikasi (dari kiri ke kanan: modifikasi SLS, SLS murni, dan epoksida murni)

Dari hasil pengamatan pada Gambar 4 terlihat bahwa penambahan epoksida justru menurunkan stabilitas mikroemulsi surfaktan. SLS murni memiliki waktu stabilitas mikroemulsi yang lebih lama. Hal ini dikarenakan perbedaan sistem emulsi dari SLS, epoksida dan epoksida-SLS. SLS merupakan surfaktan yang bersifat larut dalam air sedangkan epoksida dan modifikasi epoksida-SLS cenderung bersifat larut dalam minyak. Penambahan epoksida pada SLS mengurangi kelarutannya dalam air dan meningkatkan kelarutannya pada minyak. Penambahan senyawa karbon mengurangi kestabilan mikroemulsi. Ketidakstabilan mikroemulsi juga dipengaruhi oleh temperatur pengamatan yaitu pada temperatur ruang (25 °C). Surfaktan yang bersifat larut dalam air memiliki kestabilan yang tinggi pada temperatur rendah, sebaliknya surfaktan yang bersifat larut dalam minyak memiliki kestabilan yang tinggi pada temperatur tinggi (Holmberg dkk., 1998). Kenaikan temperatur akan menurunkan kestabilan emulsi untuk jenis emulsi o/w (*oil in water*). Sebaliknya untuk jenis emulsi w/o (*water in oil*), kenaikan temperatur justru meningkatkan kestabilan emulsi.

4. Kesimpulan

Dari hasil dan pembahasan pada penelitian ini, dapat diambil kesimpulan bahwa senyawa epoksida dapat digunakan untuk modifikasi SLS karena dapat menurunkan nilai IFT. Nilai IFT terendah dapat mencapai $3,7 \times 10^{-3}$ mN/m pada modifikasi SLS dengan epoksida konversi 10 %. Nilai ini sudah sesuai dengan standar *ultralow* IFT untuk surfaktan. Dari uji kestabilan mikroemulsi didapatkan bahwa epoksida dengan konversi epoksida 10 % yang memiliki kestabilan paling baik dengan waktu emulsi 113 menit. Pada modifikasi SLS, terdapat penggabungan gugus alkil rantai panjang dari asam oleat yang dapat meningkatkan kelarutan surfaktan dalam minyak dan gugus sulfonat dari SLS yang dapat meningkatkan kelarutan surfaktan dalam air sehingga dihasilkan surfaktan baru yang memiliki *ultralow* IFT. Modifikasi SLS menurunkan kestabilan mikroemulsi surfaktan karena penambahan senyawa karbon dari epoksida.

Daftar Pustaka

- Bakan, J. A., Microemulsion dalam *Encyclopedia of Pharmaceutical Technology*; Swarbrick, J.; Boylan, J. C., Eds.; Marcel Dekker: New York, 1995.
- Electric Power Research Institute, *Enhanced Oil Recovery Scoping Study*, Final Report No. TR-1138, Palo Alto, California, 1999.
- Eni, H.; Suwartiningsih; Sugiharjo, *Studi Penentuan Rancangan Fluida Injeksi Kimia*, Prosiding Simposium Nasional IATMI, Yogyakarta, 25-28 Juli 2007.
- Gall, R. J.; Greenspan, F. P., A modified peracid process for making epoxy compounds from unsaturated fatty acid esters, *Industrial and Engineering Chemistry*, **1955**, 47(1), 147-148.
- Gan, L. H.; Goh, S. H.; Ooi, K. S., Kinetics studies of epoxidation and oxirane cleavage of palm olein methyl esters, *Journal of the American Oil Chemists' Society*, **1992**, 69(4), 347-351.
- Gomaa, E. E., *Enhanced Oil Recovery: Modern Management Approach*, Paper for IATMI-IWPL/MIGAS Conference Surakarta, 28 Juli-1 Agustus 1997.
- Herawan, T., *Biosurfactants: Application and Opportunities of Oil Palm as Raw by Default*, Oil Palm Research Center News, 1998.
- Holmberg, K.; Jonsson, B.; Kronberg, B.; Lindman, B., *Surfactants and Polymers in Aqueous Solution*; Wiley and Sons: England, 1998.
- Khairat; Herman, S., Kinetika reaksi hidrolisis minyak sawit dengan katalisator asam klorida, *Jurnal Natur Indonesia*, **2004**, 6(2), 118-121.
- Lake, L. W., *Enhanced Oil Recovery*; Prentice Hall: New Jersey, 1989.
- Matheson, K. L., Formulation of Household and Industrial Detergents dalam *Soap and Detergents: A Theoretical and Practical Review*; Spitz, L., Eds.; AOCS Press: Champaign, Illinois, 1996.
- Myers, D., *Surfactant Science and Technology*; John Wiley & Sons: New Jersey, 2006.

Naae, D. G.; Davis, C. A., *Enhanced Oil Recovery Using Oil Soluble Sulfonates from Lignin and Benzyl Alcohol*, U.S. Patent 5,095,986, 17 Maret 1992.

Sastrohamidjojo, H.; Pranowo, H. D., *Sintesis Senyawa Organik*, Universitas Gadjah Mada, 2002.

Sinaga, M. S., Pengaruh katalis asam sulfat pada reaksi epoksidasi metil ester PFAD (palm fatty acid distillate), *Jurnal Teknologi Proses*, **2007**, 6(1), 70-74.

Sugihardjo, Formulasi optimum campuran surfaktan, air dan minyak, *Lembaran Publikasi Lemigas*, **2002**, 36(3), 37-42.

Swern, D., *Bailey's Industrial Oil and Fat Products 4th Eds Vol 1*; Willey and Sons: New York, 1979.

US Department of Energy, *Enhanced Oil Recovery/CO₂ Injection*, Washington DC, 2011.

Warwel, S.; Bruse, F.; Demes, C.; Kunz, M.; Klass, M. R., Polymers and surfactants on the basis of renewable resources, *Chemosphere*, **2001**, 43(1), 39-48.

Yuliasari, R.; Herawan, T., Peranan asam sulfat pada reaksi epoksidasi metil oleat lemak sawit, *Warta PPKS*, **1999**, 7(2), 81-86.