

# Teknologi Membran Untuk Pengolahan Emulsi Minyak: Review

## *Membrane Technology for Oil Emulsion Processing: A Review*

Farhan Rahmatullah Hikmawan<sup>1</sup>, Evitasari<sup>1</sup>, Geo Aghni Bintang Sukono<sup>1</sup>, Dodi Satriawan<sup>1\*</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Teknik Pengendalian Pencemaran Lingkungan, Politeknik Negeri Cilacap, Indonesia.

Email : <sup>1</sup>farhanhikmawan27@gmail.com, <sup>2</sup>evitasari2906@gmail.com, <sup>3</sup>geoaghni300@gmail.com, <sup>4</sup>dodi.satriawan@pnc.ac.id

*Direview : 5 Agustus 2020*

*Diterima : 20 Agustus 2020*

### Abstrak

Dalam beberapa tahun terakhir, semakin banyak air limbah berminyak yang dihasilkan dari berbagai lokasi industri seperti industri petrokimia, industri kosmetik, industri zat warna, bahkan industri makanan yang mengakibatkan masalah lingkungan yang serius. Salah satu solusi untuk mengatasi masalah ini adalah penggunaan adsorpsi berteknologi canggih, seperti teknologi membran. Proses pemisahan dengan teknologi pertamakali dikenalkan pada abad ke-21. Proses pemisahan membran telah menjadi teknologi baru untuk pengolahan air limbah yang berminyak karena efisiensi penyisihan minyak yang tinggi dan proses operasionalnya yang relatif mudah. Beberapa metode yang paling menjanjikan berdasarkan proses pemisahan membran adalah dehidrasi emulsi minyak dengan evaporasi atau dengan *reverse osmosis*, flokulasi diikuti oleh mikrofiltrasi, membran distilasi dan ultrafiltrasi. Namun, masalah utama yang sering terjadi pada proses pemisahan dengan teknologi membran adalah penyumbatan membran (*membrane fouling*). Jurnal ini merupakan review yang menjelaskan perkembangan terkini dari teknologi membran seperti proses teknologi membran, dan proses emulsifikasi membran. Selain itu, pengaruh parameter operasi pada kinerja membran dibahas secara rinci.

**Kata kunci:** *air limbah berminyak, teknologi membran, proses teknologi membran, proses emulsifikasi membran.*

### Abstract

*In recent years, more and more oily wastewater has been producing from several industrial areas such as the petrochemical plant, the cosmetic plant, the dye plant, even the food plant which has delivered in solemn environmental problems. One of the splittings to surmount this problem is the supply of advanced technology adsorption, such as membrane technology. The separation process with technology was first present in the 21st centenary. The membrane separation process has got a new technology for oily wastewater treatment due to its upper oil excision efficiency and comparatively easy operation. Some of the fittest methods based on the membrane separation process are dehydration of the oil emulsion by evaporation or flocculation followed by microfiltration or by reverse osmosis, membrane distillation, and ultrafiltration. However, the major problem that frequently occurs in the separation process with membrane technology is membrane blockage (membrane fouling). This journal is a review that depicts the latest expansion in membrane technology such as the membrane technology process and the membrane emulsification process. In addition, the influence of operating parameters on membrane performance is discussed in detail.*

**Keywords:** *oily wastewater, membrane technology, membrane technology process, membrane emulsification process.*

## 1. PENDAHULUAN

Minyak mentah merupakan campuran senyawa kompleks dari sejumlah besar hidrokarbon yang memiliki toksisitas bervariasi terhadap kehidupan akuatik dan terestrial (Chu, Feng, and Seeger 2015; Padaki et al. 2015). Air yang dihasilkan selama proses eksplorasi minyak dan gas, akan mengandung minyak terdispersi dan partikel tersuspensi. Air yang dihasilkan oleh proses eksplorasi ini merupakan air limbah terbesar dari kegiatan eksplorasi dan produksi minyak dan gas.

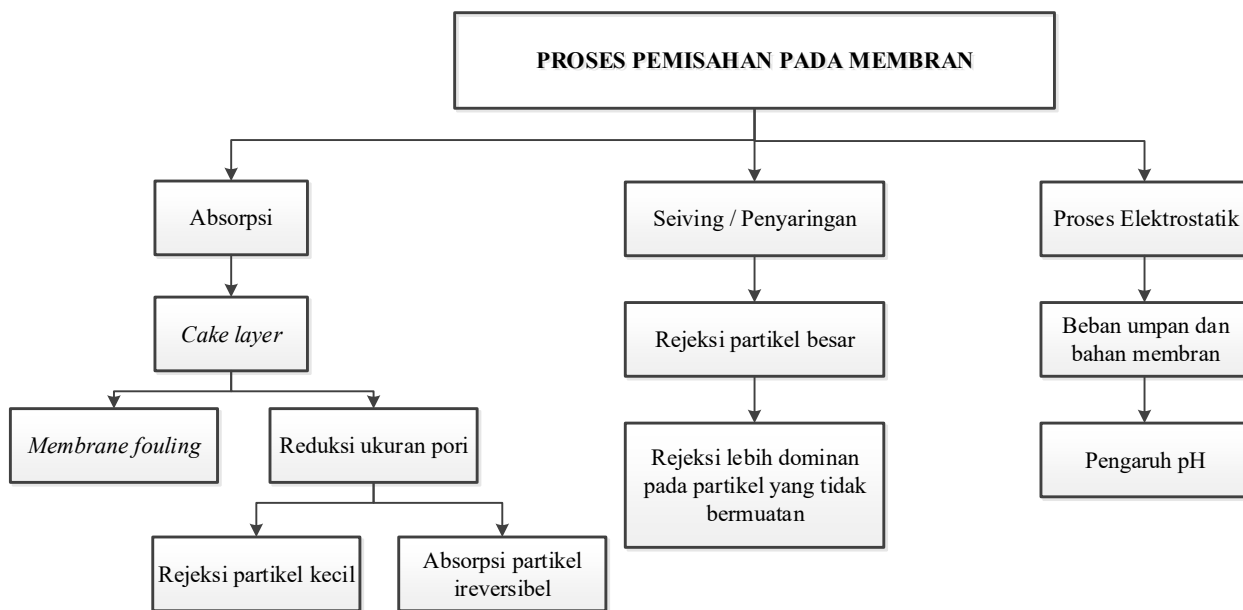
Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 19 tahun 2010 mensyaratkan bahwa total konsentrasi minyak dan lemak maksimum di lepas pantai sebesar 50 mg/L sedangkan di darat sebesar 25 mg/L (PERMENLH 2010). Polutan utama dalam air limbah yang dihasilkan dari eksplorasi minyak memiliki emulsi minyak berkisar antara 100 dan 1000 mg/L atau lebih tinggi tergantung pada efisiensi demulsifikasi dan sifat minyak mentah (Ifelebuegu and Johnson 2017; Padaki et al. 2015).

Dalam beberapa tahun terakhir, semakin banyak air limbah berminyak yang dihasilkan dari berbagai lokasi industri seperti industri petrokimia, industri kosmetik, industri zat warna, bahkan industri makanan yang mengakibatkan masalah lingkungan yang serius. Metode yang paling populer untuk pengolahan emulsi adalah demulsifikasi kimiawi yang diikuti dengan pengendapan gravitasi (Chakrabarty, Ghoshal, and Purkait 2010; Jiang et al. 2019).

Banyak teknik lain juga digunakan untuk pengolahan emulsi minyak, seperti pemisahan ultrasonik, koagulasi / flokulasi, medan listrik, dan flotasi udara (Budi et al. 2018; Chu et al. 2015; Liu et al. 2012; Yi et al. 2011). Namun, sebagian besar metode tradisional tidak cukup efisien untuk mengolah emulsi oil/water (o/w) yang stabil (ukuran  $\leq 20 \mu\text{m}$ ) terutama ketika tetesan minyak tersebar halus dan konsentrasinya sangat rendah (Abadi et al. 2011; Padaki et al. 2015; Marytheresa M. Pendergast and Hoek 2011).

Ada beberapa metode untuk pemurnian air limbah berminyak (Mi and Elimelech 2010; Padaki et al. 2015), diantaranya metode fisika dan kimia konvensional. Adsorpsi (karbon aktif, organoclay, kopolimer, zeolit dan resin), saringan pasir, siklon dan penguapan adalah perlakuan fisik dan oksidasi, proses elektrokimia, perlakuan fotokatalitik, proses Fenton, perlakuan ozon, cairan ionik pada suhu kamar dan pengemulsi adalah perlakuan kimiawi. Metode konvensional ini memiliki kekurangannya sendiri, seperti biaya tinggi, menggunakan senyawa beracun, ruang yang luas untuk pemasangan dan pembentukan polutan sekunder.

Salah satu solusi untuk mengatasi masalah ini adalah penggunaan adsorpsi teknologi canggih, seperti teknologi membran. Pengaplikasian teknologi membran memberikan era pertumbuhan yang cepat karena penelitian dan pengembangan berkelanjutan baik di industri akademis maupun nonakademis. Selain itu, teknologi membran juga baru-baru ini diperkenalkan sebagai teknik yang efisien untuk memisahkan campuran minyak / air karena kemampuannya untuk menghilangkan tetesan minyak secara efektif jika dibandingkan dengan teknologi konvensional saat ini (Ma et al. 2016; MaryTheresa M. Pendergast and Hoek 2011; Situmorang 2016).



**Gambar 1.** Proses dasar proses pemisahan membran

Penggunaan teknologi membran menawarkan solusi potensial untuk masalah air limbah berminyak berukuran mikron. Matriks membran berpori dapat mendorong koalesensi tetesan minyak mikron dan submikron menjadi lebih besar yang dapat dengan mudah dipisahkan oleh gravitasi (Sarbatly, Krishnaiah, and Kamin 2016). Beberapa metode yang paling menjanjikan berdasarkan proses pemisahan membran adalah dehidrasi emulsi minyak dengan pervaporasi, atau dengan *reverse osmosis*, flokulasi diikuti oleh mikrofiltrasi (MF), membran distilasi (MD) dan ultrafiltrasi (UF) (Ma et al. 2016; MaryTheresa M. Pendergast and Hoek 2011; Wang et al. 2016; Yi et al. 2011; Yu et al. 2014).

Proses pemisahan membran berfungsi sebagai teknologi yang muncul di abad ke-21. Namun, masalah utama yang terjadi pada proses pemisahan membran adalah pengotoran membran atau penyumbatan membran. Pengotoran membran masih menjadi salah satu tantangan paling teknis dalam industri pemisahan. Oleh karena itu, dalam artikel ini, kemajuan terbaru dalam teknologi membran untuk pemisahan minyak-air akan ditinjau.

### 1.1. Teknologi Membran

Peneliti (Mi and Elimelech 2010) mengembangkan proses skala industri untuk membuat membran *Reverse Osmosis* (RO) yang mengurangi kekurangan, berfluks tinggi, dan anisotropik. Membran ini adalah membran komposit film tipis. Lapisan tipis dikembangkan pada substrat tebal untuk memberikan dukungan mekanis pada lapisan selektif. Kontribusi membran (Mi and Elimelech 2010) dalam teknologi membran sangat signifikan.

Membran RO yang dibuat oleh (Mi and Elimelech 2010) memiliki fluks 10 kali lebih tinggi daripada membran lainnya dan menjadikan RO sebagai aplikasi praktis yang potensial dalam desalting water. Secara bersamaan, perkembangan membran dalam aplikasi medis, khususnya, ginjal buatan juga cukup besar (Marytheresa M. Pendergast and Hoek 2011).

Kolf pada tahun 1944 mengembangkan ginjal buatan pertama yang sukses di Belanda dan butuh sekitar 20 tahun untuk dikomersialkan (Ong et al. 2014). Lebih lanjut, teknik membran yang

**Tabel 1.** Tipe dan karakteristik Membran

Tipe Pori (range ukuran, nm)	Tipe Membran (ukuran pori, nm)	Spesies	Dimensi nm
Macropore (>50)	Mikrofiltrasi (50-500)	Yeast dan fungi Bakteri Emulsi minyak	1000 -10.000 300 - 10.000 100 - 10.000
Mesopore (2 - 50)	Ultrafiltrasi (2 - 50)	Padatan koloid Virus Protein / Polisakarida Humic / Asam nuklead	100 - 1000 30 - 300 3 - 10 < 3
Mikropore (0,2 - 2)	Nanofiltrasi (<2) Reverse osmosis (0,3 - 0,6)	General antibiotik Antibiotik organik ion inorganik air	0,6 - 1,2 0,3 - 0,8 0,2 - 0,4 0,2

dikembangkan oleh (Jamshidi Gohari et al. 2014) banyak digunakan dalam industri farmasi untuk meningkatkan efisiensi dan keamanan pemberian obat kepada tubuh manusia.

Teknologi membran telah menjadi teknologi pemisahan yang signifikan selama beberapa dekade terakhir. Aplikasi teknologi membran telah menyebar dan menjadi teknologi pemisahan yang esensial. Keunggulan teknologi membran adalah dapat bekerja tanpa penambahan bahan kimia, dengan kebutuhan energi yang lebih rendah, mudah ditangani dan memiliki konduksi proses yang tertata dengan baik (Ong et al. 2013; MaryTheresa M. Pendergast and Hoek 2011).

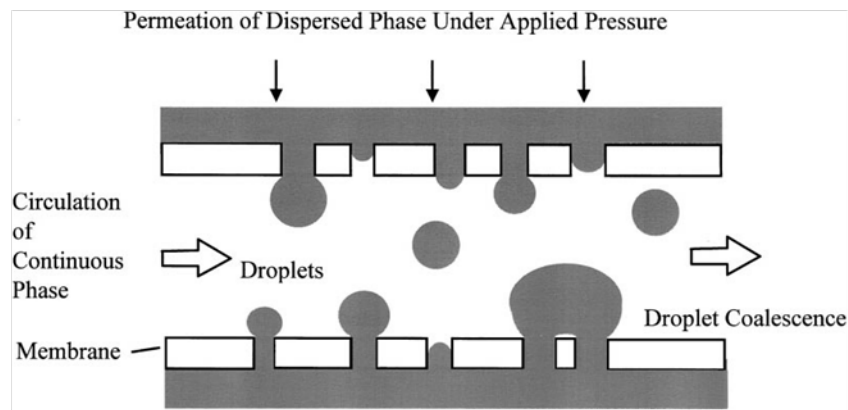
Pemisahan membran sudah menunjukkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan teknik konvensional dan efisiensi bergantung sepenuhnya pada membran itu sendiri. Pemisahannya yang sangat sederhana berupa membran bertindak sebagai lapisan semi permeabel antara dua fase dan mengatur transportasi antara dua fase tersebut (Yuliwati et al. 2011).

Secara khusus, filter akan membiarkan air mengalir melalui membran, sementara filter menangkap padatan tersuspensi dan zat lainnya (Yong et al. 2019). Ada berbagai metode untuk memungkinkan zat menembus membran. Membran menunjukkan efisiensi yang lebih tinggi dalam pembuatan air proses dari air tanah, air permukaan, atau air limbah. Membran sekarang kompetitif untuk teknik konvensional dalam pemurnian air.

## 1.2. Proses Teknologi Membran

Pemisahan membran secara keseluruhan pada dasarnya bergantung pada tiga prinsip dasar: absorpsi, sieving dan fenomena elektrostatis (Chu et al. 2015; Ma et al. 2016; Sarbatly et al. 2016). Mekanisme adsorpsi telah dikorelasikan dengan interaksi hidrofobik zat terlarut dan membran. Interaksi ini menyebabkan penurunan ukuran pori yang menyebabkan lebih banyak penyumbatan. Gambar 1 menunjukkan representasi skematis dari prinsip dasar di balik pemisahan membran.

Proses pemisahan membran semakin menjadi metode alternatif yang layak untuk pemisahan minyak-air. Proses membran berbasis tekanan terutama terdiri dari mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nanofiltrasi dan *reverse osmosis* (MaryTheresa M. Pendergast and Hoek 2011). Ketiga proses membran ini secara konseptual adalah proses yang serupa tetapi perbedaan utamanya adalah ukuran pori permukaan membran yang menentukan aplikasinya seperti yang diilustrasikan pada Tabel 1.



**Gambar 2.** Skema diagram proses emulsifikasi membran  
(Joscelyne & Tragardh, 2000)

Diantara proses membran, ultrafiltrasi adalah salah satu perawatan paling efektif untuk air limbah berminyak. Dibandingkan dengan metode pemisahan tradisional, ultrafiltrasi memiliki efisiensi penghilangan minyak yang lebih tinggi, tanpa perlu senyawa aditif kimiawi dan biaya energi yang rendah (Ma et al. 2016; MaryTheresa M. Pendergast and Hoek 2011).

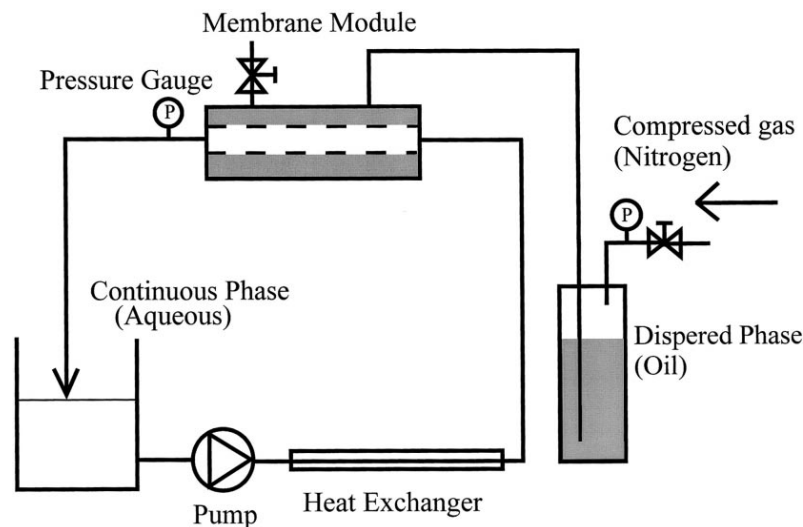
Membran ultrafiltrasi yang memiliki molekul berat *cut-off* (*molecular weight cut-off*/ MWCO) antara 100.000 dan 200.000 Da, menunjukkan sekitar 96% efisiensi penyaringan pada konsentrasi hidrokarbon total, benzena, toluena, dan xilen (BTX) sekitar 54%, dan beberapa logam berat seperti Cu, dan Zn sekitar 95% (Ma et al. 2016; MaryTheresa M. Pendergast and Hoek 2011). Efisiensi ini tidak diamati pada membran mikrofiltrasi .

Membran mikrofiltrasi telah digunakan untuk memulihkan surfaktan dalam permeat. Membran mikrofilter ini menawarkan fluks yang tinggi, tetapi memiliki risiko tinggi pada minyak yang lolos. Jika kandungan garam dalam air limbah berminyak terlalu tinggi, maka solusinya dapat diatasi dengan membran *reverse osmosis* dan nanofiltrasi (Ma et al. 2016).

Selain proses membran yang disebutkan di atas, *forward osmosis* merupakan salah satu jenis membran yang mana prosesnya digerakkan secara osmotik (Mi and Elimelech 2010; Yong et al. 2019). *Forward osmosis* merupakan teknologi baru yang juga digunakan untuk mengolah air limbah berminyak. Tidak seperti nanofiltrasi dan *reverse osmosis*, proses ini membutuhkan tekanan hidrolik yang sangat rendah dan menawarkan beberapa keuntungan potensial seperti, kecenderungan fouling yang lebih rendah, penghilangan fouling yang lebih mudah dan perolehan air yang lebih jernih dan lebih baik (Chu et al. 2015; Mi and Elimelech 2010; Yong et al. 2019). Meskipun beberapa aplikasi telah mencapai perkembangan yang pesat, beberapa tantangan masih perlu diatasi untuk mengatasi membran yang tersedia saat ini dalam hal kinerja pemisahan, sifat antifouling, dan stabilitas jangka panjang.

### 1.3. Proses Emulsifikasi Membran

Proses emulsifikasi membran ditunjukkan pada Gambar 2. Fase terdispersi ditekan melalui pori-pori membran mikro, sedangkan fase kontinu mengalir di sepanjang permukaan membran. Tetesan muncul di outlet pori, saat mencapai ukuran tertentu, tetesan tersebut terlepas. Hal ini ditentukan oleh keseimbangan



**Gambar 3.** Skema sistem emulsifikasi membran pada skala kecil  
(Joscelyne & Tragardh, 2000)

antara gaya hambat pada tetesan dari aliran fase kontinu, daya apung tetesan, gaya tegangan antarmuka dan tekanan penggerak (Joscelyne and Trägårdh 2000; Ma et al. 2016; Marytheresa M. Pendergast and Hoek 2011).

Tetesan pada pori cenderung membentuk seperti bola di bawah aksi tegangan antarmuka, tetapi berapa pada distorsi. Gambar. 2 merupakan gambar skematis dari sistem emulsifikasi membran skala kecil sederhana. Proses pada sistem emulsifikasi tersebut dapat terjadi tergantung pada laju aliran fase kontinu dan sudut kontak antara tetesan dan permukaan membran (Joscelyne and Trägårdh 2000; Ma et al. 2016; Marytheresa M. Pendergast and Hoek 2011).

Distribusi ukuran dan ukuran tetesan akhir tidak hanya ditentukan oleh ukuran pori dan distribusi ukuran membran tetapi juga oleh derajat penggabungan, baik di permukaan membran maupun di larutan *bulk*.

Gambar skema peralatan emulsifikasi membran skala kecil yang khas, yang mewakili literatur untuk membuat emulsi output daya, ditunjukkan pada Gambar. 3. Sistem ini menggabungkan membran mikrofiltrasi tubular, pompa, bejana umpan, dan wadah minyak bertekanan (N<sub>2</sub>). Fase minyak (untuk didispersikan) dipompa di bawah tekanan gas melalui pori-pori membran ke dalam fase kontinu berair yang bersirkulasi melalui tengah membran. Meskipun sebagian besar pekerjaan awal pada emulsifikasi membran bersifat agak empiris, studi yang lebih sistematis harus dilakukan dan parameter dan kondisi pengontrol proses yang penting harus diidentifikasi.

## 2. KESIMPULAN

Emulsifikasi membran telah terbukti menjadi proses yang relatif sederhana dan dapat diandalkan untuk membuat emulsi. Ukuran tetesan sangat bergantung pada ukuran pori-pori membran, yang berarti mudah untuk memilih membran yang paling sesuai untuk aplikasi.

Terakhir, emulsifikasi membran mungkin lebih tepat saat ini untuk produksi produk dan aplikasi 'teknologi tinggi' khusus, di mana ada kebutuhan untuk tingkat keseragaman ukuran tetesan yang tinggi dibandingkan dengan metode umum untuk emulsifikasi.

## PENGHARGAAN

Terimakasih kami ucapkan kepada SIMBELMAWA KEMENDIKBUD yang telah mempercayai kami untuk melakukan Program Preativitas Mahasiswa (PKM) bidang Penelitian. Dan kami juga tidak lupa ucapkan kepada dosen kami dan pembimbing program PKM-P ini bapak Dodi Satriawan, S.T., M.Eng yang telah banyak membimbing kami dan sabar dalam mengajarkan kami untuk kesuksesan kami di program PKM-P ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abadi, Sareh Rezaei Hosein, Mohammad Reza Sebzari, Mahmood Hemati, Fatemeh Rekabdar, and Toraj Mohammadi. 2011. "Ceramic Membrane Performance in Microfiltration of Oily Wastewater." *Desalination* 265(1–3):222–28.
- Budi, Muhammad, Nur Rahman, Muh Budhi Erlangga, and Muh Finza Pratama. 2018. "Pengaruh Temperatur Dan Waktu Etching Terhadap Karakteristik Fisik Dan Mekanik Pelapisan Nikel Pada Plastik ABS Dengan Metode Elektrolessplating." *R.E.M.(Rekayasa Energi Manufaktur)* 3(2):61–69.
- Chakrabarty, B., A. K. Ghoshal, and M. K. Purkait. 2010. "Cross-Flow Ultrafiltration of Stable Oil-in-Water Emulsion Using Polysulfone Membranes." *Chemical Engineering Journal* 165(2):447–56.
- Chu, Zonglin, Yujun Feng, and Stefan Seeger. 2015. "Oil/Water Separation with Selective Superantwetting/Superwetting Surface Materials." *Angewandte Chemie - International Edition* 54(8):2328–38.
- Ifelebuegu, Augustine O., and Ambulai Johnson. 2017. "Nonconventional Low-Cost Cellulose- and Keratin-Based Biopolymeric Sorbents for Oil/Water Separation and Spill Cleanup: A Review." *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 47(11):964–1001.
- Jamshidi Gohari, R., E. Halakoo, W. J. Lau, M. A. Kassim, T. Matsuura, and A. F. Ismail. 2014. "Novel Polyethersulfone (PES)/Hydrous Manganese Dioxide (HMO) Mixed Matrix Membranes with Improved Anti-Fouling Properties for Oily Wastewater Treatment Process." *RSC Adv.* 4(34):17587–96.
- Jiang, Jingxian, Qinghua Zhang, Xiaoli Zhan, and Fengqiu Chen. 2019. "A Multifunctional Gelatin-Based Aerogel with Superior Pollutants Adsorption, Oil/Water Separation and Photocatalytic Properties." *Chemical Engineering Journal* 358(July 2018):1539–51.
- Joscelyne, Simon M., and Gun Trägårdh. 2000. "Membrane Emulsification — a Literature Review." *Journal of Membrane Science* 169(1):107–17.
- Liu, Chun, Hiroshi Tanaka, Jin Ma, Lei Zhang, Jing Zhang, Xia Huang, and Yoshiaki Matsuzawa. 2012. "Effect of Microbubble and Its Generation Process on Mixed Liquor Properties of Activated Sludge Using Shirasu Porous Glass (SPG) Membrane System." *Water Research* 46(18):6051–58.
- Ma, Qinglang, Hongfei Cheng, Anthony G. Fane, Rong Wang, and Hua Zhang. 2016. "Recent Development of Advanced Materials with Special Wettability for Selective Oil/Water Separation." *Small* 12(16):2186–2202.
- Mi, Baoxia, and Menachem Elimelech. 2010. "Organic Fouling of Forward Osmosis Membranes: Fouling Reversibility and Cleaning without Chemical Reagents." *Journal of Membrane Science* 348(1–2):337–45.
- Ong, C. S., W. J. Lau, P. S. Goh, B. C. Ng, and A. F. Ismail. 2013. "Preparation and Characterization of PVDF–PVP–TiO<sub>2</sub> Composite Hollow Fiber Membranes for Oily Wastewater Treatment Using Submerged Membrane System." *Desalination and Water Treatment* 53(5):1–11.
- Ong, C. S., W. J. Lau, P. S. Goh, B. C. Ng, and A. F. Ismail. 2014. "Investigation of Submerged Membrane Photocatalytic Reactor (SMPR) Operating Parameters during Oily Wastewater Treatment Process." *Desalination* 353:48–56.
- Padaki, M., R. Surya Murali, M. S. Abdullah, N. Misdan, A. Moslehyani, M. A. Kassim, N. Hilal, and A. F. Ismail. 2015. "Membrane Technology Enhancement in Oil–Water Separation. A Review." *Desalination* 357:197–207.
- Pendergast, Marytheresa M., and Eric M. V. Hoek. 2011. "A Review of Water Treatment Membrane Nanotechnologies." *Energy & Environmental Science* 4(6):1946.
- Pendergast, MaryTheresa M., and Eric M. V. Hoek. 2011. "A Review of Water Treatment Membrane Nanotechnologies." *Energy & Environmental Science* 4(6):1946.
- PERMENLH. 2010. *Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha Dan/Atau Kegiatan Minyak Dan Gas Serta Panas Bumi.*
- Sarbatly, Rosalam, Duduku Krishnaiah, and Zykamilia Kamin. 2016. "A Review of Polymer Nanofibres by Electrospinning and Their Application in Oil–Water Separation for Cleaning up Marine Oil Spills." *Marine Pollution Bulletin* 106(1–2):8–16.
- Situmorang, Ricky Febrianto. 2016. "Pemisahan Emulsi Minyak Dari Air Menggunakan Teknologi Membran Pemisahan Emulsi Minyak Dari Air Menggunakan Teknologi Membran." (June).
- Wang, Xianfeng, Jianyong Yu, Gang Sun, and Bin Ding. 2016. "Electrospun Nanofibrous Materials: A Versatile Medium for Effective Oil/Water Separation." *Materials Today* 19(7):403–14.
- Yi, X. S., S. L. Yu, W. X. Shi, N. Sun, L. M. Jin, S. Wang, B. Zhang, C. Ma, and L. P. Sun. 2011. "The DOI : 10.35970/jppl.v2i2.348
- Corresponding Author : farhanhikmawan27@gmail.com, dodi.satriawan@pnc.ac.id

- Influence of Important Factors on Ultrafiltration of Oil/Water Emulsion Using PVDF Membrane Modified by Nano-Sized TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.” *Desalination* 281(1):179–84.
- Yong, Jiale, Qing Yang, Chunlei Guo, Feng Chen, and Xun Hou. 2019. “A Review of Femtosecond Laser-Structured Superhydrophobic or Underwater Superoleophobic Porous Surfaces/Materials for Efficient Oil/Water Separation.” *RSC Advances* 9(22):12470–95.
- Yu, Yuanlie, Hua Chen, Yun Liu, Vincent Craig, Lu Hua Li, and Ying Chen. 2014. “Superhydrophobic and Superoleophilic Boron Nitride Nanotube-Coated Stainless Steel Meshes for Oil and Water Separation.” *Advanced Materials Interfaces* 1(1):1300002.
- Yuliwati, E., A. F. Ismail, T. Matsuura, M. A. Kassim, and M. S. Abdullah. 2011. “Characterization of Surface-Modified Porous PVDF Hollow Fibers for Refinery Wastewater Treatment Using Microscopic Observation.” *Desalination* 283:206–13.