



## Review: Potensi Pengembangan Membran Polimer Hidrofilik untuk Produksi Biodiesel Berbasis Mikroalga

Widi Citra Lestari<sup>1</sup>, Ellyzia Sukma Ningtiar<sup>2</sup>, Mochammad Yusuf Irianto<sup>3</sup>, Nurul Widiastuti<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Departement Kimia, Fakultas Sains, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Email:

[widicitralestari@gmail.com](mailto:widicitralestari@gmail.com)

### Abstract

Harvesting microalgae is an important process to be carried out in the production of biodiesel from microalgae. The method of harvesting by filtration technique provides many advantages over other methods. Polymer is a membrane material that is often used for harvesting microalgae. However, polymer membranes have limited hydrophobic properties, thus, modification was needed to improve the hydrophilic properties and performance of polymer membranes. The polyvylene fluoride (PVDF) flat-sheet membrane has advantages over other membrane materials which are rated with a flux rate of 67.3 L / m<sup>2</sup>h and a rejection value of 100%. Then, the development with hollow fiber modulation on the PVDF membrane was considered very suitable, which was reported to have succeeded in increasing the membrane flux in the harvest of *Scenedemus Acuminatus* reaching up to 5136 L / m<sup>2</sup>h. The addition of PVDF with the inorganic additive LiCl was successful in increasing its hydrophilicity as the water permeation size increased up to 542 L / m<sup>2</sup>h. In addition, the use of triethyl phosphate (TEP) as a solvent is more environmentally friendly and compatible with PVDF membranes. As a result, it can increase membrane porosity by up to 92.7%. Apart from improving the membrane material, this review also reports the design and economic analysis to produce an effective and efficient of polymeric membranes for microalgae harvesting.

**Keywords:** Biodiesel, microalgae harvesting, filtration membrane, polymer material, additive effect.

### Abstrak

Pemanenan mikroalga menjadi proses yang penting untuk dilakukan dalam produksi biodiesel dari mikroalga. Metode pemanenan dengan teknik filtrasi memberikan berbagai keunggulan dibandingkan dengan metode lainnya. Polimer merupakan material membran yang sering digunakan untuk pemanenan mikroalga. Namun, membran polimer memiliki keterbatasan sifat hidrofobik, sehingga perlu dilakukan modifikasi untuk meningkatkan sifat hidrofilik dan kinerja dari membran polimer. Membran flat-sheet poliviliden fluorida (PVDF) dengan laju fluks sebesar 67,3 L/m<sup>2</sup>h dan nilai rejeksi 100%, memiliki keunggulan dibandingkan dengan material membran lainnya. Kemudian, pengembangan dengan modulasi hollow fiber pada membran PVDF dinilai sangat cocok, dengan hasil fluks membran pada pemanenan *Scenedemus Acuminatus* mencapai 513,6 L/m<sup>2</sup>h. Penambahan aditif anorganik LiCl pada PVDF berhasil meningkatkan hidrofilisitasnya dengan permeasi air mencapai 542 L/m<sup>2</sup>h. Selain itu, penggunaan trietil fosfat (TEP) sebagai pelarut yang lebih ramah lingkungan dan kompatibel dengan PVDF mampu meningkatkan porositas membran mencapai 92,7 %. Pada review ini juga ditinjau rancangan desain dan analisis ekonomi untuk menghasilkan membran polimer yang efektif dan efisien dalam pemanenan mikroalga.

**Kata Kunci:** Biodiesel, pemanenan mikroalga, membran filtrasi, material polimer, pengaruh aditif.

## 1. Pendahuluan

Indonesia sebagai negara maritim memiliki area yang luas untuk budidaya mikroalga, yaitu sebesar 26.700 ha dengan potensi produksi mencapai 462.400 ton/tahun (Khotimah, 2018). Mikroalga ini berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber bahan baku untuk produksi biodiesel (Jorquera dkk., 2010). Hal itu dikarenakan masa mitosis mikroalga berlangsung sangat cepat (3,5 jam) dengan masa inkubasi yang singkat (6-10 hari) (Christi, 2007). Kelebihan lain, mikroalga sangat efisien dalam menyerap sinar matahari, sehingga memiliki produktivitas tinggi untuk mengubah CO<sub>2</sub> menjadi lemak sebagai bahan utama pembuatan biodiesel (Scott dkk., 2010). Selain itu, pengebangbiakan kultur mikroalga hanya memerlukan lahan yang kecil (Yin dkk., 2020). Tabel 1 menunjukkan keunggulan mikroalga dibandingkan dengan sumber bahan baku biodiesel yang lain, dimana mikroalga memiliki kandungan lemak sebesar 70% berat biomassa kering dengan *yield* lemak 136.900 L lemak/ha/tahun, serta penggunaan lahan yang kecil hanya 0,1 m<sup>2</sup>/tahun/L biodiesel dengan produktivitas biodiesel mencapai 142.475 L biodiesel/ha/tahun (Mata dkk., 2010).

Tabel 1: Perbandingan Berbagai Sumber Bahan Baku Biodiesel

Jenis Sumber Bahan Baku Biodiesel	Kandungan Lemak (% berat biomassa kering)	Yield Lemak (L lemak/ha/tahun)	Penggunaan Lahan (m <sup>2</sup> /tahun/L biodiesel)	Produktivitas Biodiesel (L biodiesel/ha/tahun)
Jagung	44	172	56	179
Kedelai	18	636	15	661
Jarak	28	741	13	772
Camelina	42	915	12	809
Bunga Matahari	40	1.070	9	1.113
Minyak sawit	36	5.366	2	5.585
Mikroalga	70	136.900	0,1	142.475

Sumber: (Mata, dkk., 2010)

Pada tahapan produksi biodiesel dari mikroalga, tahap pemanenan mikroalga merupakan tahapan yang penting dilakukan sebelum ekstraksi minyak, karena konsentrasi mikroalga yang rendah dalam media kulturnya (0,02 - 0,06) % b/b (Mujeeb dkk., 2016). Oleh karena itu, diperlukan sebuah pemisahan antara air sebagai media kultur dengan sel mikroalga untuk mendapatkan konsentrasi mikroalga yang tinggi, proses ini dinamakan *dewatering* (Bilad dkk., 2014). Proses *dewatering* umumnya menggunakan Teknik konvensional yang memerlukan biaya tinggi, seperti sentrifugasi dan flotasi. Pada teknik sentrifugasi, pemanenan dengan *recovery* rata-rata 95% untuk 9 jenis mikroalga yang membutuhkan gaya sentrifugasi sebesar 13.000 g, dengan konsumsi energi listrik lebih dari 3000 kWh/ton biomassa kering (Al Hattab dkk., 2015). Sedangkan pada teknik flotasi, penggunaan agitator dengan kecepatan tinggi memerlukan biaya yang besar seperti pada teknik sentrifugasi (Al Hattab dkk., 2015). Berdasarkan kelemahan dari teknik-teknik konvensional tersebut, teknik filtrasi menawarkan metode yang lebih efektif untuk pemanenan mikroalga. Hal itu dikarenakan metode filtrasi dapat memulihkan biomassa dengan waktu cepat, tidak terbatas oleh ukuran dan densitas mikroalga, konsumsi energi yang rendah, selektivitas mikroalga yang tinggi (> 90%) (Huang dkk., 2012), dan menghasilkan jumlah zat terlarut pekat yang tinggi (154,85 g/L) (Zhang dkk., 2010).

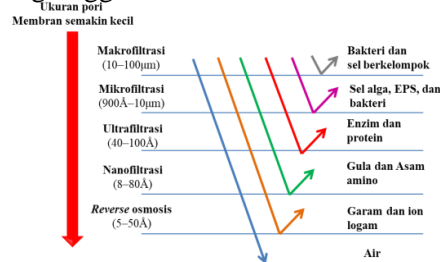
Kunci utama keberhasilan metode filtrasi dengan membran untuk *dewatering* mikroalga adalah pemilihan material membran, kompatibilitas pelarut, modulasi, dan rancangan *scale-up*. *Narrative Review* ini melaporkan pengembangan material membran polimer dengan modifikasi penambahan aditif baru, pelarut yang kompatibel dan ramah lingkungan, kesesuaian modulasinya, serta rancangan *scale-up* untuk aplikasi pemanenan mikroalga yang efektif demi menghasilkan nilai fluks dan rejeksi mikroalga yang tinggi.

## 2. Pembahasan

Pada penelitian ini, pokok utama yang akan dibahas adalah pengembangan material membran untuk aplikasi pemanenan mikroalga, seperti pemilihan material polimer, modulasi, pemilihan zat aditif, dan juga pelarut yang ramah lingkungan. Potensi rancangan scale-up dan analisis biaya juga akan dibahas pada penelitian ini. dan juga mengenai pemilihan jenis mikroalga yang paling berpotensi untuk sumber utama produksi biodiesel.

### 2.1 Jenis Mikroalga yang berpotensi sebagai Bahan Baku Biodiesel

Lipid merupakan komponen sel mikroalga yang berperan penting dalam konversi mikroalga menjadi biodiesel. Kapasitas konversi lipid menjadi biodiesel sebesar 1390 L biogas ( $\text{CH}_4$  (72%) dan  $\text{CO}_2$  (28%)), dimana nilai ini memiliki kapasitas paling tinggi dibandingkan protein (800 L biogas ( $\text{CH}_4$  (60%) dan  $\text{CO}_2$  (40%)) dan karbohidrat (746 L biogas ( $\text{CH}_4$  (50%) dan  $\text{CO}_2$  (50%)) (Schenk, dkk., 2008). Oleh karena itu, pemanfaatan lemak memiliki potensi lebih besar sebagai bahan baku biodiesel dibandingkan biomassa lainnya. Setiap jenis mikroalga memiliki kandungan lipid (% berat biomassa kering) yang berbeda-beda, seperti *Nannochloropsis sp.* sebesar 37–60% dan dalam keadaan stres mikroalga mampu menghasilkan lemak trigliserida (TGAs) yang digunakan untuk pembuatan biodiesel sebesar 23-58% dari total kandungan lemak yang diproduksinya (Ma dkk., 2014), *Isochrysis* 25–33% (Bougaran dkk., 2012), *Dunaliella salina* 23% (Yu dkk., 2014), *Haematococcus pluvialis* 16–35% (Damiani dkk., 2010), dan *Neochloris oleoabundans* 2–47% (Bona, dkk., 2014). Berdasarkan hal tersebut, *Nannochloropsis sp.* memiliki kandungan lipid yang lebih besar dibandingkan mikroalga lainnya. Mikroalga *Nannochloropsis sp.* umumnya memiliki ukuran diameter 2-5  $\mu\text{m}$  (Khairuddin dkk., 2019). Dengan demikian, membran mikrofiltrasi (sesuai yang ditunjukkan pada gambar 1) kompatibel untuk digunakan sebagai teknologi pemanenan mikroalga *Nannochloropsis sp.*, sehingga menghasilkan fluks pemanenan dan % rejeksi yang tinggi.



Gambar 1: Skema penolakan zat terlarut dalam berbagai jenis filtrasi (Dexler dan Yeh, 2014)

### 2.2 Pengembangan Material Membran Pemanenan Mikroalga

Pada pengembangan material membran, PVDF menunjukkan kinerja yang cukup baik dibandingkan dengan polimer lainnya, di mana hal tersebut dapat ditinjau dari nilai fluks pemanenan yang ditunjukkan pada Tabel 2. Selain itu, PVDF juga memiliki kekuatan mekanik tinggi yang disebabkan oleh struktur polimernya yang semi-kristalin, stabilitas termal yang baik, dan ketahanan terhadap bahan kimia yang baik (Liu dkk., 2011).

Tabel 2: Kinerja material membran polimer terhadap laju fluks air

Membran/Mikroalga	Ukuran Pori	Deskripsi	Fluks ( $\text{L}/\text{m}^2.\text{h}$ )
PES	30 kDa	UF/Hollow fiber	12,5
PS	80 kDa	UF/Hollow fiber	46,8
PP	100 kDa	UF/Hollow fiber	105,7
PVC	50 kDa	UF/Hollow fiber	119,4
PVDF	30 kDa	UF/Hollow fiber	320,2
<b>PVDF</b>	<b>0,1 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>MF/Hollow fiber</b>	<b>510,3</b>

(Sumber : Liu dkk., 2010)

Tabel 3: Hidrofilisitas membran sebelum dan setelah penambahan zat aditif

Membran	Sudut Kontak *	Sudut Kontak	Fluks *	Fluks	Pustaka
PVDF /PVP	$\pm 83^\circ$	$\pm 75^\circ$	67,3 L/m <sup>2</sup> .h	107,5 L/m <sup>2</sup> .h	(Arahman dkk., 2019)
PVDF/PEG 400	$87^\circ$	$55^\circ$	$\pm 87,5$ L/m <sup>2</sup> .h	150 L/m <sup>2</sup> .h	Hwang dkk., 2015
PVDF/TiO <sub>2</sub>	$80^\circ$	$\pm 50^\circ$	27.07 L/m <sup>2</sup> .h	82.50 L/m <sup>2</sup> .h	Yuliwati dan Ismail, 2011
<b>PVDF/LiCl</b>	<b><math>88^\circ</math></b>	<b><math>72^\circ</math></b>	-	<b>542</b> <b>L/m<sup>2</sup>h</b>	<b>(Lee dkk., 2015)</b>
<b>PES/LiCl</b>	-	<b><math>60 - 65^\circ</math></b>	-	<b>548,2</b> <b>L/m<sup>2</sup>h</b>	<b>(Khairuddin dkk., 2017)</b>

\*Sebelum Penambahan Aditif

Pengembangan membran hidrofilik (nilai sudut kontak  $< 90^\circ$ ) melalui penambahan zat aditif pada preparasi membran polimer telah berhasil diaplikasikan untuk pemanenan mikroalga. Terdapat 2 jenis aditif yang dapat digunakan yaitu aditif organik dan aditif anorganik. Penggunaan aditif organik seperti PVP dan PEG dalam preparasi membran sebelumnya juga telah banyak digunakan dalam menurunkan hidrofobisitas membran (Arahman dkk., 2019; Hwang dkk., 2015). Penambahan PVP pada preparasi membran PVDF untuk pemanenan *Chlorella* sp. berhasil menurunkan nilai sudut kontak dari  $83^\circ$  sampai  $75^\circ$ . Aditif PVP memiliki sifat hidrofilik sehingga mampu menurunkan nilai sudut kontak dari  $\sim 83^\circ$  menjadi  $\sim 75^\circ$  yang menandakan bahwa sifat hidrofilik membran mengalami peningkatan (Arahman dkk., 2019). Selain aditif polimer, penggunaan aditif anorganik seperti garam halida juga dapat memberikan struktur yang sesuai dan kinerja yang lebih tinggi (Saputra dkk., 2015). Pada penelitian Khairuddin dkk (2017), membran PES/LiCl menunjukkan laju fluks yang sangat tinggi, yaitu mencapai  $548,2 \text{ L/m}^2\text{h}$  dengan struktur makrovoid berbentuk jari memanjang. Penggunaan LiCl sebagai aditif juga digunakan dalam preparasi membran PVDF. Hasil penelitian lainnya juga melaporkan bahwa membran PVDF/LiCl *hollow fiber* memberikan nilai fluks air mencapai  $542 \text{ L/m}^2\text{h}$  (Lee dkk, 2015). Besarnya fluks air sangat berkaitan dengan besar porositas, ukuran pori, dan struktur pori. Pemberian kombinasi 2% LiCl dengan PVDF dilaporkan akan membentuk pori spons dengan porositas yang tinggi (Sunarti dan Ahmed dkk., 2016).

### 2.2.1 Penggunaan Pelarut Ramah Lingkungan

Pelarut merupakan bagian penting dalam menentukan morfologi membran. Beberapa jenis pelarut organik yang sering digunakan, seperti NMP, DMA, dan DMF memiliki kemampuan yang baik dalam melarutkan polimer. Namun, penggunaan pelarut tersebut dapat menyebabkan resiko yang serius bagi kesehatan dan lingkungan, seperti DMF dan DMAc dapat mengakibatkan cedera hepato seluler akut, pankreatitis, dan kanker testis. Selain itu, pelarut NMP juga dapat menyebabkan penyakit serius seperti, gangguan janin, kelahiran tidak normal, hingga kemandulan. Oleh karena itu, perlu adanya penggantian pelarut tersebut dengan pelarut yang bersifat non toksik. Dalam preparasi membran PVDF *hollow fiber*, Chang dkk (2017) menggunakan pelarut non toksik, seperti TEP merupakan alternatif untuk menggantikan beberapa pelarut toksik. Penggunaan pelarut TEP dinilai lebih aman dan hanya berbahaya apabila ditelan, sehingga peneliti dapat terlindungi dengan baik dan hanya membutuhkan pengolahan limbah cair yang sederhana. Selain itu, dari penelitian tersebut, penggunaan TEP sebagai pelarut sekaligus campuran air dalam media koagulasi mampu menyebabkan porositas membran meningkat hingga mencapai 92,7%. Pada penelitian lainnya, preparasi membran PVDF untuk aplikasi mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi juga dilakukan menggunakan pelarut non toksik TEP (Marino dkk., 2018).

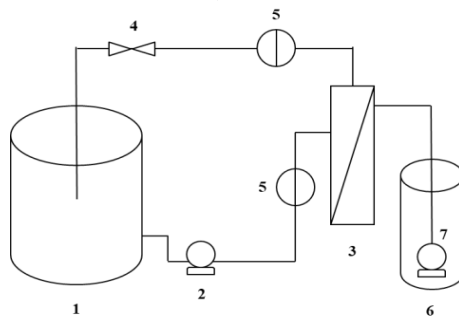
### 2.2.2 Modulasi dan Rancangan Scale Up dan Analisis Biaya dalam Penerapan Teknologi Membran Pemanenan Mikroalga

Modul membran yang sering digunakan untuk pemanenan mikroalga adalah *flat sheet* (Hwang dkk., 2015), *hollow fiber* (Bhave dkk., 2012), *spiral wound* (Gerardo dkk., 2015), dan tubular (Rossi, dkk., 2004). Membran *hollow fiber* memiliki beberapa keunggulan dibandingkan modul lainnya, seperti karakteristik mekanis yang mendukung, menawarkan *packing* yang lebih padat dan luas permukaan membran yang lebih tinggi, dan proses pembuatan modul mudah ditangani. Selain itu, juga menghilangkan kebutuhan akan *spacer* (Peng dkk., 2012). Berdasarkan hal tersebut, banyak penelitian yang menggunakan modul *hollow fiber* untuk aplikasi pemanenan mikroalga, hal tersebut dikarenakan membran *hollow fiber* memiliki luas permukaan yang lebih tinggi, seperti pada penerapan membran PVDF *hollow fiber* untuk pemanenan *Scenedemus* sp. mampu menghasilkan nilai fluks sebesar 513,6 L/m<sup>2</sup>h (Liu dkk., 2020). Tabel perbandingan kinerja membran PVDF terhadap berbagai jenis modulasi dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Kinerja membran polimer PVDF terhadap beberapa model modulasi

Membran/ Mikroalga	Deskripsi	Fluks (L/m <sup>2</sup> .h)	Rejeksi (%)	Keterangan	Pustaka
PVDF/ <i>Chlorella</i> sp.	MF/ <i>cross-flow</i> ; <i>Flat sheet</i> ; ukuran pori 0,013 -0,017 $\mu$ m	67,3	100	Hidrofilik sangat lemah, sudut kontak 87°	(Hwang dkk., 2015)
PVDF/ <i>Nannochloropsis oculata</i>	MF/ <i>cross-flow</i> ; <i>flat sheet</i> ; ukuran pori 0,4 $\mu$ m	50	-	-	(Baerdem aeker dkk., 2013)
<b>PVDF/<i>Scenedemus Acuminatus</i></b>	<b>MF/<i>cross-flow</i>; <i>Hollow Fiber</i>; ukuran pori 0,45; <i>Sponge-like</i>,</b>	<b>513,6</b>	<b>99,6-100</b>	<b>Resistensi terhadap oksidasi tinggi</b>	<b>(Liu dkk. 2020)</b>

Penerapan teknologi membran untuk pemanenan mikroalga sangat berpotensi dikembangkan dalam skala besar. Berdasarkan penggunaannya, teknologi membran memerlukan energi yang lebih rendah yaitu 0,17-2 kWh/m<sup>3</sup> dibandingkan dengan energi yang diperlukan untuk proses sentrifugasi (0,5–8 kWh/m<sup>3</sup>), flokulasi (0,1–14,8 kWh/m<sup>3</sup>), dan flotasi (1,5–20 kWh/m<sup>3</sup>) (Mo dkk., 2015). Beberapa penelitian telah berhasil menerapkan membran untuk pemanenan mikroalga *Dunaliella salina* dalam skala besar dengan menggunakan membran PES yang dirangkai seperti Gambar 2.2. Dalam penelitian tersebut, setiap elemen membran terdapat 832 *fibers* yang memiliki panjang 0,42 m, diameter dalam 2,2 mm, dan luas 2,5 m<sup>2</sup>. Penelitian lainnya juga sudah menggunakan membran untuk pemanenan *Chlorella minutissima* (Gerardo dkk., 2015) dan *Scenedesmus acuminatus* (Wang dkk., 2019) dalam skala besar.



Keterangan:

1. Tangki umpan
2. Pompa resirkulasi
3. Modul membran
4. Katub pembatas
5. Pengatur tekanan
6. Tangki permeat
7. Pompa *backflush*

Gambar 2: Rancangan membran mikrofiltrasi untuk pemanenan mikroalga (Monte, dkk., 2018)

Selain dari rancangan *scale up*, aspek ekonomi juga ikut diperhitungkan, diantaranya biaya modal yang meliputi biaya pembelian peralatan sistem membran dan biaya operasional yaitu biaya yang berkaitan

dengan konsumsi energi, pemanenan, pembersihan dan pencucian membran, reagen, dan biaya tenaga kerja (Wang dkk., 2019). Proses pemanenan *Scenedesmus acuminatus* dilaporkan mengkonsumsi biaya sebesar 0,295\$/kg.

### 3. Kesimpulan

Dari hasil pembahasan review dapat disimpulkan bahwa polimer PVDF memiliki keunggulan dibandingkan dengan material membran lainnya yang dinilai dengan laju fluks sebesar 67,3 L/m<sup>2</sup>h dan nilai rejeksi 100%. Selain itu, penggunaan modulasi hollow fiber pada membran PVDF dinilai sangat cocok, dimana dilaporkan meningkatkan fluks membran pada pemanenan *Scenedesmus Acuminatus* mencapai 513,6 L/m<sup>2</sup>h. Penambahan PVDF dengan aditif anorganik LiCl berhasil meningkatkan hidrofilitasnya yang dinilai dari besar permeasi air yang meningkat mencapai 542 L/m<sup>2</sup>h. Kemudian, penggunaan TEP sebagai pelarut yang lebih ramah lingkungan juga kompatibel dengan membran PVDF dimana mampu meningkatkan porositas membran mencapai 92,7 %. Dengan demikian, kombinasi membran PVDF/LiCl/TEP dengan modulasi *hollow fiber* memiliki potensi besar sebagai membran untuk pemanenan *Nannochloropsis* sp. yang efektif dan efisien.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pemerintah melalui Kemendikbud Dikti yang mendanai Program Kreativitas Mahasiswa 2020.

### Daftar Pustaka

- Al Hattab, M., Ghaly, A., & Hammouda, A. 2015. Microalgae Harvesting Methods for Industrial Production of Biodiesel: Critical Review and Comparative Analysis Fundamentals of Renewable Energy and Applications. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*. 5 (2): 1-26.
- Arahman, N., Mulyati, S., Fahrina, A., Muchtar, S. 2019. Improving Water Permeability of Hydrophilic PVDF Membrane Prepared via Blending with Organic and Inorganic Additives for Humic Acid Separation. *Molecules*. 24 (22) : 4099.
- Baerdemaeker, T.D., Lemmens, B., Dotremont, C., Fret, J., Roef, L., Goiris, K., Diels, L. 2013. Benchmark study on algae harvesting with backwashable submerged flat panel membranes. *Bioresour. Technol.* 129: 582-591.
- Bhave, R., Kuritz, T., Powell, L., Adcock, D. 2012. Membrane-based energy efficient dewatering of microalgae in biofuels production and recovery of value added co-products. *Environmental Science and Technology*. 46: 5599-5606.
- Bilad, M. R., Arafat, H. A., & Vankelecom, I. F.J. 2014. Membrane technology in microalgae cultivation and harvesting: A review. *Biotechnology Advances*. 32 (7): 1283-1300.
- Bilad, M.R., Vandamme, D., Foubert, I., Muylaert, K., dan Vankelecom, I.F.J. 2012. Harvesting microalgal biomass using submerged microfiltration membranes. *Bioresource Technology*. 111: 343-352.
- Bona, F., Capuzzo, A., Franchino, M., Maffei, M.E. 2014. Semicontinuous nitrogen limitation as convenient operation strategy to maximize fatty acid production in *Neochloris oleoabundans*. *Algal Res.* 5: 1-6.
- Bougaran, G., Rouxel, C., Dubois, N., Kaas, R., Grouas, S., Lukomska, E., Le Coz, J.R., Cadoret, J.P. 2012. Enhancement of neutral lipid productivity in the microalga *Isochrysis affinis galbana* (T-iso) by a mutation-selection procedure. *Biotechnol. Bioeng.* 109: 2737-2745.
- Chang, J., Zuo, J., Zhang, L., O'Brien, G.S., Chung, T.S. 2017. Using green solvent, triethyl phosphate (TEP), to fabricate highly porous PVDF hollow fiber membranes for membrane distillation. *J. Membr. Sci.* 539: 295-304.
- Christi, Y. 2007. Biodiesel from Microalgae. *Biotechnology Advances*. 25(30): 294 - 306.

- Damiani, C.M., Popovich, C.A., Constenla, D., Leonardi, P.I. 2010. Lipid analysis in *Haematococcus pluvialis* to assess its potential use as a biodiesel feedstock. *Bioresour. Technol.* 101: 3801–3807.
- Drexler, I., dan Yeh, D. 2014. Membrane applications for microalgae cultivation and harvesting: a review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology.* 13 (4): 487-504.
- Gerardo, M.L., Zanain, M.A., dan Lovitt, R.W. 2015. Pilot-scale cross-flow microfiltration of *Chlorella minutissima*: A theoretical assessment of the operational parameters on energy consumption. *Chemical Engineering Journal.* 280: 505-513.
- Guo, W., Ngo, H.H., dan Li, J. 2012. A mini-review on membrane fouling. *Bioresource Technology.* 122: 27-34.
- Huang, C., Chen, X., & Liu, T. 2012. Harvesting of *Chlorella* sp. using hollow fiber ultrafiltration. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 19: 1416–1421.
- Hu, W., Yun, J., Deng, B., Hu, Z. 2015. Application of Nano TiO<sub>2</sub> modified hollow fiber membranes in algal membrane bioreactors for high-density algae cultivation and wastewater polishing. *Bioresource Technology.* 193:135-141.
- Hwang, T., Kotte, M.R., Han, J., Oh, Y., Diallo, M.S. 2015. Microalgae Recovery by Ultrafiltration Using Novel Fouling-resistant PVDF membranes with in situ PEGylated Polyethyleneimine particles. *Journal Water Research.* 73: 181-192.
- Jorquera, O., Kiperstok, A., Sales, E. A., Embiruçu, M., & Ghirardi, M. L. 2010. Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors. *Bioresource Technology.* 101 (4): 1406-1413.
- Khairuddin, N.F.M., Idris, A., Irfan, M., Loong, T.C. 2017. Microalgae harvesting of *Nannochloropsis* sp. Using polyethersulphone/lithium chloride/functionalised multiwall carbon nanotube membranes fabricated via temperature induced phase inversion and non-solvent induced phase inversion. *International Journal of Nanoparticles.* 9 (2): 71.
- Khairuddin, N.F.M., Idris, A., dan Hock L.W. 2019. Harvesting *Nannochloropsis* sp. using PES/MWCNT/LiBr membrane with good antifouling properties. *Separation and Purification Technology.* 212: 1-11.
- Khotimah, K. 2018. Membangun Ketahanan Energi Pendukung Pertahanan Maritim Melalui Pemanfaatan Mikroalga Sebagai Biodiesel Bagi Masyarakat Pesisir. *Jurnal Pertahanan & Bela Negara.* 8 (1): 67-84.
- Lee, J., Park, B., Kim, J., Park, S.B. 2015. Effect of PVP, Lithium Chloride, and Glycerol Additives on PVDF Dual-Layer Hollow Fiber Membranes Fabricated Using Simultaneous Spinning of TIPS and NIPS. *Macromolecular Research.* 23 (3): 291-299.
- Liu, F., Hashim, N.A., Liu, Y., Abed, M.R.M., Li, K. 2011. Progress in the production and modification of PVDF membranes. *J. Membr. Sci.* 375 (1–2): 1–27.
- Liu, R., Wang, L., Yang, L., Liu, Q., Gao, Y., Xiao, J., Hu, Q., Zhang, X. 2020. Ultrafiltration and microfiltration membrane performance, cleaning, and flux recovery for microalgal harvesting. *Journal of Applied Phycology.*
- Ma, Y.B., Wang, Z.Y., Yu, C.J., Yin, Y.H., Zhou, G.K. 2014. Evaluation of the potential of 9 *Nannochloropsis* strains for biodiesel production. *Bioresour. Technol.* 167: 503–509.
- Marino, T., Russo, F., Figoli, A., May, H. 2018. The Formation of Polyvinylidene Fluoride Membranes with Tailored Properties via Vapour/Non-Solvent Induced Phase Separation. *Membranes.* 8: 1-17.
- Mata, T.M., Martins, A.A., dan Caetano, N.S. 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 14: 217-232.
- Mo, W., Soh, L., Werber, J.R., Elimelech, M., Zimmerman, J.B. 2015. Application of membrane dewatering for algal biofuel. *Algal Research.* 11: 1-12.

- Monte, J., Sá, M., Galinha, C.F., Costa, L., Hoekstra, H., Brazinha, C., Crespo, J.G. 2018. Harvesting of *Dunaliella salina* by membrane filtration at pilot scale. *Separation and Purification Technology*. 190: 252-20.
- Mujeeb, M. A., Vedamurthy, A. B., & T, Shivasharana C. 2016. Current strategies and prospects of biodiesel production: A review. *Pelagia Research Library Advances in Applied Science Research*. 7(1) :120-133.
- Nurra, C., Clavero, E., Sa lvadó, J., Trras, C. 2014. Vibrating Membrane Filtration as Improved Technology for Microalgae Dewatering. *Bioresource Technology*. 157: 247- 253.
- Peng, N., Widjojo, N., Sukitpaneenit, P., May, M., Lipscomb, G.G., Chung, T., Lai, J. 2012. Progress in Polymer Science Evolution of polymeric hollow fibers as sustainable technologies: Past , present , and future. *Progress in Polymer Science*. 37: 1401-1424.
- Rossi, N., Jaouen, P., Legentilhomme, P., Petit, I. 2004. Harvesting of *Cyanobacterium Arthrospira platensis* using organic filtration membranes. *Food Bioprod. Process*. 82: 244–250.
- Rossignol, N., Vandanjon, L., Jaouen, P., Quemeneur, F. 1999. Membrane technology for the continuous separation microalgae/culture medium: compared performances of cross-flow microfiltration and ultrafiltration. *Aquacultural Engineering*. 20:191-208.
- Saputra, B. Dan Noor, E. 2015. High Performance Membranes Using Lithium Additives: A Review. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 6: 407-410.
- Schenk, P.M., Hall, S.R.T., Stephens, E., Marx, U.C., Mussnug, J.H., Posten, C., Kruse, O., Hankamer, B. 2008. Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. *Bioenergy Research* 1(1):20–43.
- Wang, L., Pan, B., Gao, Y., Li, C., Ye, J., Yang, L., Chen, Y., Hu, Q., Zhang, X. 2019. Efficient membrane microalgal harvesting: Pilot-scale performance and techno-economic analysis. *Journal of Cleaner Production*. 218: 83-95.
- Yin, Z., Zhu, L., Li, S., Hu, T., Chu, R., Mo, F., Hu, D., Liu, C., Li, B. 2020. A comprehensive review on cultivation and harvesting of microalgae for biodiesel production: Environmental pollution control and future directions. *Bioresource Technology*. 301: 122804.
- Yu, H.T., Tian, F.L., Wang, H.Y., Hu, Y.H., Sheng, W.L. 2014. An application of *Dunaliella salina* algae: Biodiesel. *Adv. Mater. Res*. 953–954: 281–283.
- Zhang, X., Hu Q., Sommerfeld, M., Puruhito, E., & Chen, Y. 2010. Harvesting algal biomass for biofuels using ultrafiltration membranes. *Bioresour. Technol*. 101 29730.