



## PERBANDINGAN BIOREAKTOR MEMBRAN DAN BIOREAKTOR MEMBRAN BERELEKTRIK UNTUK RAWATAN AIR SISA KILANG MINYAK KELAPA SAWIT

(Comparison of Membrane Bioreactor and Electric Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment of The Palm Oil Mill)

Teow Yeit Haan<sup>1,2\*</sup>, Sharmila Pragash Sundaram<sup>1</sup>, Najah Hafizah Musa<sup>1</sup>, Syarifah Nornabilah Syed Muaz<sup>1</sup>, Shakir Ahmad Mohamed Sultan<sup>1</sup>, Nur Ameera Rosli<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical and Process Engineering, Faculty of Engineering and Built Environment

<sup>2</sup>Research Centre for Sustainable Process Technology, Faculty of Engineering and Built Environment  
Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

\*Pengarang utama: yh\_teow@ukm.edu.my

Received: 29 January 2021; Accepted: 1 March 2021; Published: xx April 2021

### Abstrak

Perkembangan industri kelapa sawit yang pesat menyebabkan pencemaran alam sekitar yang disebabkan oleh air sisa kilang minyak kelapa sawit (POME) yang terhasil dari proses pengekstrakan minyak sawit. Bioreaktor membran (MBR) dengan gabungan rawatan biologi dan teknologi membran merupakan kaedah yang berkesan untuk rawatan POME. Penerapan ini dapat ditambahbaik dengan pengenalan bioreaktor membran berelektrik (EMBR) dimana daya tolakan yang terhasil antara permukaan membran konduktif GO/MCWNTs dan zarah-zarah dalam POME dijangka akan meningkatkan lagi prestasi sistem EMBR. Objektif kajian ini adalah untuk mengkaji keberkesanan membran konduktif GO/MCWNTs di sistem bioreaktor membran berelektrik (EMBR) untuk rawatan POME dan dibandingkan dengan sistem MBR tanpa medan elektrik. Prestasi sistem MBR dan EMBR dinilai dengan peratusan penyingkiran permintaan oksigen kimia (COD) dan nitrogen amonia ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ). Manakala, untuk kajian penurasan jangka panjang, penapisan membran konduktif GO/MCWNTs beroperasi selama 32 minit dan diberhentikan. Ia diikuti dengan pembekalan medan elektrik arus terus merentasi membran konduktif GO/MCWNTs selama 6 minit untuk sistem EMBR, dan sistem MBR diberhenti tanpa bekalan medan elektrik. Proses berselang-seli ini diulangi untuk 4 kitaran. Prestasi sistem EMBR yang dialirkan elektirk adalah lebih baik daripada sistem MBR tanpa aliran elektirk dengan peratusan penyingkiran COD dan  $\text{NH}_3\text{-N}$  setinggi 82.07% dan 70.5% untuk sistem EMBR dan 53.63 % dan 43.81% bagi sistem MBR. Hal ini membawa kesimpulan bahawa sistem EMBR mempunyai keberkesanan penyingkiran yang baik and fluks penurasan yang lebih tinggi berbanding sistem MBR untuk rawatan POME.

**Kata kunci:** bioreaktor membran berelektrik, membran konduktif GO/MCWNTs, membran bioreaktor, rawatan air, air sisa kilang kelapa sawit

### Abstract

The rapid development of the palm oil industry results in environmental pollution caused by the wastewater of the palm oil mill (POME) from the palm oil extraction process. Membrane bioreactor (MBR) with a combination of biological treatment and

membrane technology is an effective method for POME treatment. This application can be improved with the use of electromagnetic membrane bioreactors (EMBRs) where the repulsive force form between the surface of GO/MCWNTs conductive membranes and particles in POME can enhance the performance of EMBR system. The objective of this study was to examine the effectiveness of GO/MCWNTs conductive membrane in electric membrane bioreactor (EMBR) system for POME treatment and to compare with the MBR system without an electric field. The performance of MBR and EMBR systems is assessed by the percentage of removal of chemical oxygen demand (COD) and ammonia nitrogen ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ). Meanwhile, for long-term filtration studies, GO/MCWNTs conductive membrane filtering operates for 32 minutes and discontinued. It was followed by an electric supply across the GO/MCWNTs conductive membrane for 6 minutes for EMBR system, and the MBR system was discontinued without electric supply. This intermittent process is repeated for 4 cycles. The performance of EMBR system with electric supply is better than an electro-free MBR system with COD and  $\text{NH}_3\text{-N}$  removal percentages as high as 82.07% and 70.5% for EMBR system and 53.63% and 43.81% for MBR system. This concluded that the EMBR has good removal efficiency and higher filtration flux than MBR system for POME treatment.

**Keywords:** electric membrane bioreactor, GO/MCWNTs conductive membrane, membrane bioreactor, water treatment, wastewater of the palm oil mill

### Pengenalan

Industri minyak kelapa sawit merupakan antara penyumbang tertinggi kepada ekonomi Malaysia disebabkan permintaannya yang tinggi di seluruh dunia. Namun, perkembangan industri kelapa sawit yang pesat juga mendatangkan kesan negatif seperti pencemaran alam sekitar yang disebabkan oleh air sisa kilang minyak kelapa sawit (POME) yang terhasil dari proses pengekstrakan minyak sawit [1]. Jumlah air yang banyak diperlukan untuk proses pengekstrakan minyak sawit. Antaranya, lebih daripada separuh jumlah air ini akan berakhir sebagai POME. Pengeluaran POME dilaporkan sekitar 50 juta tan pada kadar tahunan 2017 [2].

POME merupakan salah satu air sisa yang paling banyak dihasilkan di Malaysia dan mempunyai tahap kekotoran yang 100 kali lebih kotor daripada air sisa bandar. Pelepasan POME ke persekitaran tanpa rawatan akan mendatangkan kesan yang buruk terhadap alam sekitar. POME mengandungi asid organik, karbohidrat, mineral, dan protein yang tinggi. Nutrien yang tinggi ini menjadikannya sumber pertumbuhan mikrob dan mendorong kepada eutrofikasi jika dibuang terus ke sumber air seperti sungai tanpa rawatan [3]. POME boleh dirawat melalui rawatan biologi kerana kandungan organiknya tinggi. Rawatan biologi dipromosi kerana penggunaan tenaga elektrik yang rendah dan hasil enapcemar daripada rawatan biologi boleh digunakan sebagai baja untuk tanaman [4]. Walaubagaimanapun, terdapat beberapa kelemahan

terhadap rawatan biologi seperti penggunaan ruang yang besar, tidak berkesan untuk menyingkirkan bahan bukan

organik yang terkandung dalam air sisa seperti patogen dan jangka masa rawatan yang panjang.

Sistem penapisan membran merupakan teknologi termaju yang dapat menangani kelemahan rawatan biologi. Kualiti air rawatan yang tinggi dan konsisten dapat dihasilkan melalui proses penurasan membran, dimana sistem penapisan membran hanya memerlukan ruang kecil untuk rawatan, dan operasi rawatan secara spontan [5]. Namun pemendapan kotoran seperti bahan organik daripada POME atas permukaan membran merupakan kelemahan teknologi membran, dimana ia akan menyingkatkan jangka hayat membran. Hal ini akan mengenakan kos operasi tambahan untuk pembersihan membran mahupun penggantian membran [6]. Kaedah yang berkesan untuk rawatan POME disamping mengurangkan pemendapan bahan organik daripada POME pada permukaan membran boleh dilakukan dengan menggabungkan kedua-dua rawatan biologi dan teknologi membran. Sistem penggabungan ini dinamakan sebagai bioreaktor membran (MBR).

Pengubahsuaian permukaan membran dengan ciri hidrofilik merupakan salah satu kaedah yang berkesan untuk mengurangkan kotoran pada membran [7]. Secara amnya, kebanyakan kotoran dalam air sisa seperti bahan organik adalah bercas negatif. Maka, pengubahsuaian permukaan membran bersifat hidrofilik dan bercas

negatif dapat meningkatkan prestasi membran disamping mengelak kotoran pada membran dengan penghasilan daya tolakan elektrostatis antara membran dan kotoran [8]. Kumpulan penyelidikan kami telah berjaya menghasilkan membran konduktif dengan menggunakan grafena oksida (GO) dan nanotub karbon pelbagai dinding (MWNCTs) melalui kaedah pengadunan fasa songsang. Nisbah GO:MWNCTs yang optimum telah direka pada 1:9 berdasarkan kekonduksian membran. Membran konduktif GO/MCWNTs yang dihasilkan ini berjaya mengurangkan kotoran pada permukaan membran untuk proses rawatan POME dengan bekalan medan elektrik. Fluks membran dapat dikekalkan untuk jangka masa operasi penurasan yang lebih panjang berbanding dengan membran yang lain [9].

Objektif kajian ini adalah untuk mengkaji keberkesanan membran konduktif GO/MCWNTs di sistem bioreaktor membran berelektrik (EMBR) untuk rawatan POME dan dibandingkan dengan sistem MBR yang tanpa medan elektrik. Daya tolakan yang terhasil antara permukaan membran konduktif GO/MCWNTs dan zarah-zarah dalam POME dijangka akan meningkatkan lagi prestasi teknologi yang menggabungkan kedua-dua rawatan biologi dan teknologi membran ini.

#### **Bahan dan Kaedah**

##### **Sintesis membran konduktif**

GO disintesis daripada grafin dengan menggunakan kaedah Hummer [10]. Membran konduktif GO/MCWNTs dihasilkan dengan mencampur bahan nano karbon ke dalam larutan polimer membran. Pada permulaannya, GO dan MWNCTs dengan nisbah 1:9 w/w dicampur ke dietilacetamida (DMAc). Campuran tersebut dikacau sehingga sebati dan disonifikasi selama 30 minit pada 40 KHz dan 124 W dengan menggunakan ultrasonikator, WUC-A03H (Wisd. Korea). Seterusnya, polivinilidena fluorida (PVDF) ditambah ke dalam larutan campuran bahan nano karbon secara perlahan-lahan. Larutan polimer membran dikacau pada 250 rpm dan dipanaskan pada suhu 65 °C selama 4 jam [11]. Larutan membran polimer yang terhasil kemudiannya dituang rata di atas kaca. Membran konduktif GO/MCWNTs dihasilkan dengan menggunakan alat aplikasi filem Elcometer 4340 (Elcometer Ltd., UK)

pada ketebalan 200 µm. Lapisan membran konduktif GO/MCWNTs seterusnya direndam ke dalam air ultrapure (UP) dengan kadar segera. Membran konduktif GO/MCWNTs yang terhasil dikeluarkan dari air UP selepas rendaman seharian.

##### **Penyesuaian iklim bakteria dalam sistem MBR dan sistem EMBR**

Penyesuaian iklim bakteria dalam EMBR dijalankan dengan mengguna POME mentah dan POME aerobik yang dikumpul dari kilang kelapa sawit yang terletak di Bestari Jaya, Selangor Darul Ehsan, Malaysia. 9.6 L POME aerobik diguna sebagai inokulum (80% daripada isipadu EMBR), Manakala 2.4 L POME aerobik (20% daripada isipadu EMBR) ditambah untuk menjadikan isipadu keseluruhan 12 L. Aliran udara disalurkan ke sistem EMBR pada 10m<sup>3</sup>/h. Parameter seperti pH, oksigen terlarut (DO), permintaan oksigen kimia (COD), permintaan oksigen biokimia (BOD), dan nitrogen amonia (NH<sub>3</sub>-N) dipantau untuk mengenalpasti keselesaan proses penyesuaian iklim bakteria dalam sistem EMBR.

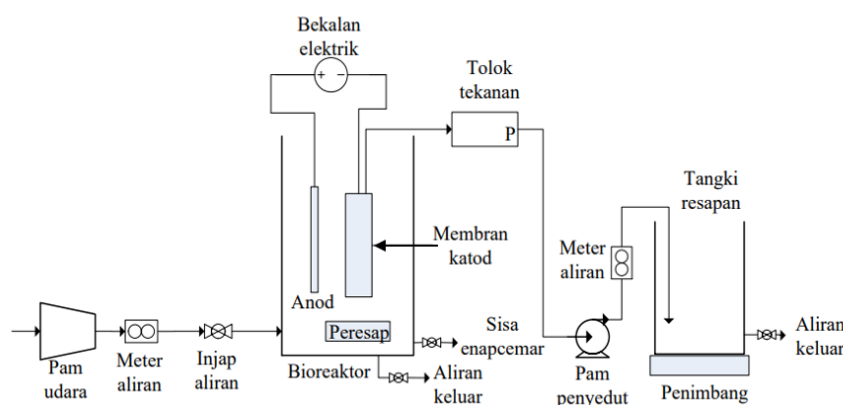
##### **Penilaian prestasi sistem MBR dan EMBR**

POME aerobik diguna sebagai efluen yang dirawat di sistem MBR dan EMBR. Helaian membran konduktif GO/MCWNTs yang diguna pada katod dalam sistem EMBR, manakala kepingan keluli tahan karat diguna pada anod. Jarak antara katod dan anod ditetapkan pada 35 mm. Flux sistem MBR dan EMBR ditentukan pada 15 L/m<sup>2</sup> h dan aliran udara disalurkan ke sistem adalah 10m<sup>3</sup>/h untuk memastikan kepekatan DO sistem adalah di antara 6 - 8 mg/L [12]. Pam penyedut digunakan untuk menyedut efluen yang ditapis oleh membran konduktif GO/MCWNTs. Untuk kajian penurasan jangka panjang, penapisan membran konduktif GO/MCWNTs beroperasi selama 32 minit dan diberhentikan. Ia diikuti dengan pembekalan medan elektrik arus terus merentasi membran konduktif GO/MCWNTs selama 6 minit untuk sistem EMBR, manakala sistem MBR diberhenti tanpa bekalan medan elektrik. Proses berselang-seli ini diulangi untuk 4 kitaran. Rajah 1 menunjukkan lukisan skematik persediaan sistem MBR dan EMBR.

### Analisis kualiti air

Suhu, pH, dan DO diukur dengan menggunakan meter pH, meter suhu PHM4202, dan meter DO, masing-masing (Hanna, UK). Untuk analisis COD, 2 mL sampel air dan air suling dituang kedalam kelalang COD secara berasingan dan dipanaskan kepada 150 °C selama 2 jam di Digital Reactor Block DRB200 (Hach, USA). Selepas pemanasan selama 2 jam, kedua-dua sampel air dan air suling dibiarkan sejuk dan diukur dengan Spectrophotometer DR3900 (Hach, USA). Manakala

untuk analisis  $\text{NH}_3\text{-N}$ , 3 titisan penstabil mineral dimasukkan ke dalam silinder penyukat yang mengandungi sampel air dan digoncang. Seterusnya, 3 titisan polivinil alkohol ditambah ke dalam campuran larutan tersebut dan digoncang. Kemudiannya, 1 mL reagen Nessler ditambah, digoncang, dan dibiarkan selama 1 minit. 10 mL larutan campuran daripada silinder penyukat dimasukkan ke dalam kuvet dan diukur dengan Spectrophotometer DR3900 (Hach, USA).



Rajah 1. Lukisan skematik persediaan sistem MBR dan EMBR

### Keputusan dan Perbincangan

#### Pengesuaian iklim bakteria dalam sistem EMBR

Rajah 2 menunjukkan bacaan parameter seperti suhu, pH, DO, COD, dan  $\text{NH}_3\text{-N}$  yang tercatat semasa proses penyesuaian iklim bakteria selama 4 minggu berturut-turut. Parameter suhu bermula hari pertama ke hari 15 adalah turun naik dan bermula mencapai kestabilan selepas hari ke 15. Manakala parameter pH menaik secara berterusan. Sekitar hari ke 19 hingga ke 29, bacaan pH turut mencapai kestabilan dan berada dalam lingkungan 8 - 10. Bacaan COD dan  $\text{NH}_3\text{-N}$  menunjukkan penurunan secara mendadak pada hari pertama sehingga hari ke 8. Peratusan penurunan sebanyak 95.5% dan 81.4% tercatat oleh parameter COD dan  $\text{NH}_3\text{-N}$ , masing-masing. Manakala, bacaan DO meningkat sebanyak 58%. Menyusul dari hari ke 10 hingga hari ke 19, bacaan bagi ketiga-tiga parameter COD,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , dan DO cenderung mencapai kestabilan.

Penyesuaian iklim bakteria dalam sistem EMBR selesai pada hari 19 apabila bacaan parameter menjadi stabil. Selepas hari 19, parameter COD dan  $\text{NH}_3\text{-N}$  mula meningkat dan bacaan DO menurun. Peningkatan COD dan  $\text{NH}_3\text{-N}$  adalah sebanyak 68% dan 63%, manakala DO menurun sebanyak 72.8% berbanding dengan hari sebelumnya. Berbanding dengan kajian yang dilakukan oleh Wong et al., 27 hari diperlukan untuk membolehkan kesemua bakteria aerobik menyesuaikan persekitaran baru dengan sempurna [13]. Namun, kajian ini hanya memerlukan 15 hari untuk mencapai penyesuaian iklim bakteria dalam sistem EMBR yang dikenalpasti dengan kestabilan bacaan parameter.

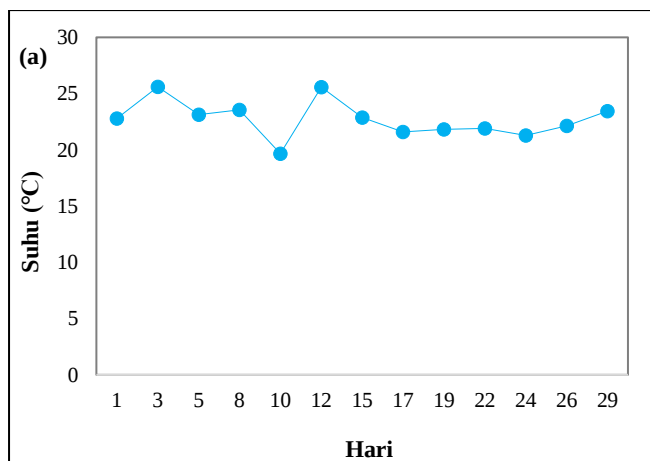
#### Penilaian prestasi sistem MBR dan EMBR

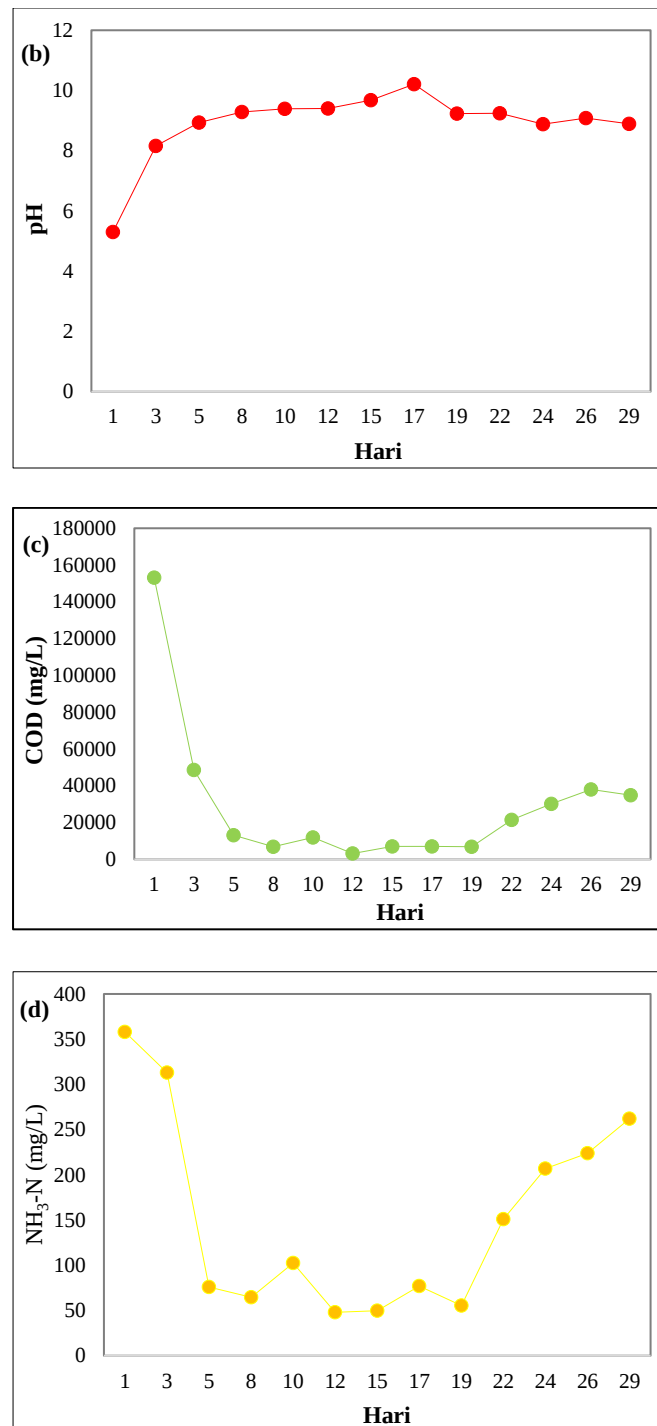
Prestasi membran konduktif GO/MCWNs di sistem MBR dan EMBR dinilai berdasarkan peratusan penyingkiran COD dan  $\text{NH}_3\text{-N}$ . Rajah 3 menunjukkan

peratus penyingkiran COD dan  $\text{NH}_3\text{-N}$  untuk sistem MBR dan EMBR. Secara amnya, prestasi sistem EMBR yang dialirkan elektirk adalah lebih baik daripada sistem MBR tanpa aliran elektirk dengan peratusan penyingkiran COD dan  $\text{NH}_3\text{-N}$  setinggi 82.07% dan 70.5%. Hal ini kerana aliran elektrik merentasi permukaan membran konduktif GO/MCWNTs di sistem EMBR meningkat kecekapan sistem EMBR untuk penyingkir COD dan  $\text{NH}_3\text{-N}$  dari POME melalui mekanisme elektroforesis. Bekalan elektrik di sistem EMBR memberi muatan negatif pada permukaan membran konduktif GO/MCWNTs. Cas negatif tambahan pada permukaan membran konduktif GO/MCWNTs ini mendorong penolakan molekul makro bercas negatif di POME seperti bahan organik semulajadi, seterusnya mencatat prestasi penyingkiran yang lebih baik untuk sistem EMBR [14].

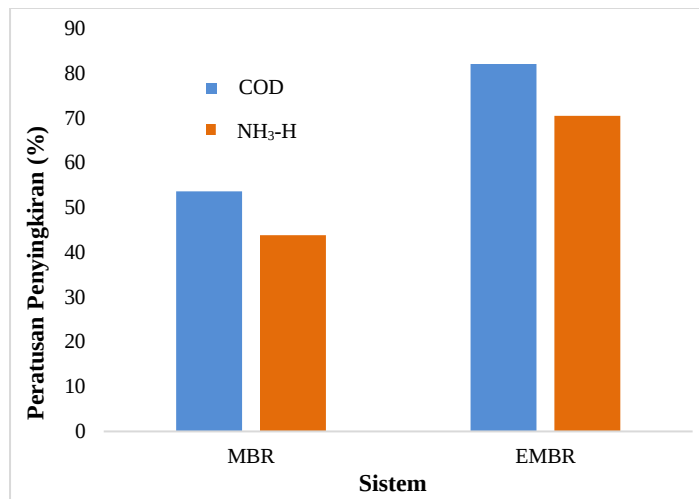
Rajah 4 menunjukkan fluks penurasan jangka panjang untuk sistem MBR dan sistem EMBR. Secara keseluruhannya, nilai fluks menurun sepanjang proses penurasan untuk keempat-empat kitaran. Namun, fluks sistem EMBR adalah lebih tinggi daripada fluks sistem MBR. Hal ini kerana disebabkan oleh mekanisma elektroforesis yang bertindak pada permukaan membran

konduktif GO/MCWNTs apabila disalur dengan medan elektrik. Elektroforesis berlaku apabila pergerakan molekul makro bercas dipengaruhi oleh medan elektrik seragam spasial yang terhasil antara elektrod. Medan elektrik yang disalur ke sistem EMBR akan memberi cas negatif kepada membran konduktif GO/MCWNTs yang bertindak sebagai katod. Cas negatif tambahan pada permukaan membran konduktif GO/MCWNTs menolak molekul makro yang bercas negatif dari mendekati permukaan membran melalui mekanisme elektroforesis ini. Tolakan elektrostatik yang kuat antara kotoran dan permukaan membran konduktif GO/MCWNTs mengurangkan pengotoran pada permukaan membran di sistem EMBR dan menjelaskan fluks sistem EMBR yang lebih tinggi daripada fluks sistem MBR [15]. Peratusan pengurangan fluks relatif oleh sistem MBR adalah lebih cenderung berbanding dengan sistem EMBR iaitu sebanyak 73.40% bagi sistem MBR dan 40.01% bagi sistem EMBR. Ini membuktikan bahawa sistem EMBR mempunyai keberkesanan penyingkiran yang baik, fluks penurasan yang lebih tinggi, dan tahap ketahanan kotoran yang lebih berkesan berbanding sistem MBR.

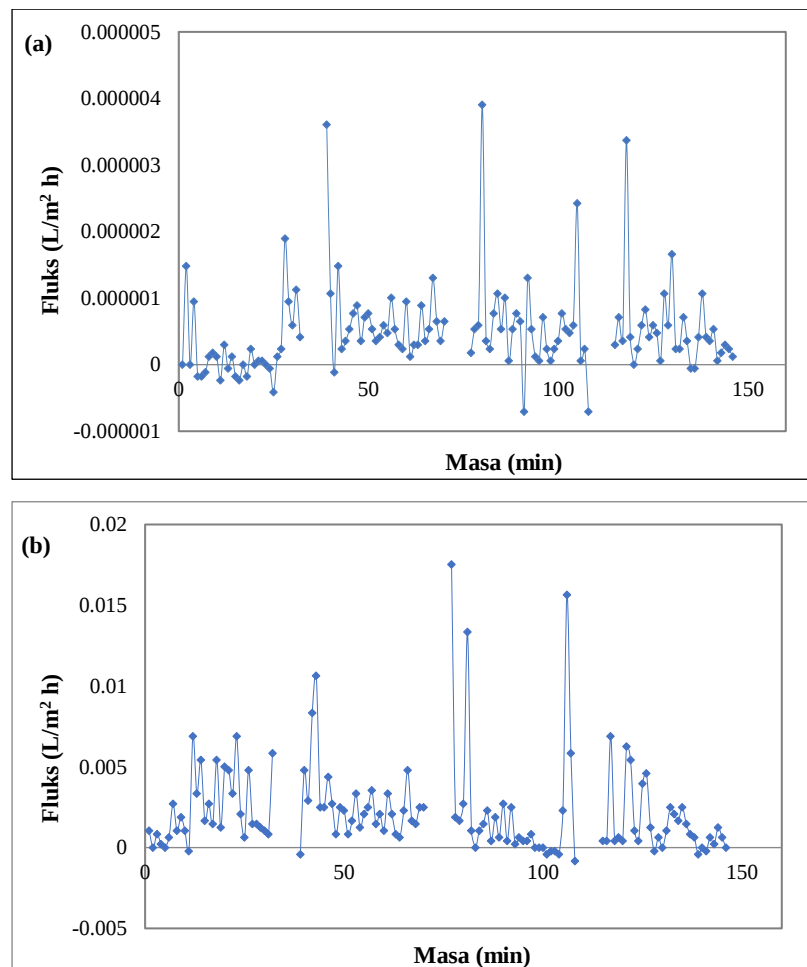




Rajah 2. Bacaan parameter diambil semasa proses penyesuaian iklim bakteria selama 4 minggu berturut-turut (a) suhu (b) pH (c) DO (d) COD (e) NH<sub>3</sub>-N



Rajah 3. Peratusan penyingkiran COD dan  $\text{NH}_3\text{-N}$  untuk sistem MBR dan EMBR



Rajah 4. Fluks penurasan jangka panjang untuk (a) sistem MBR (b) sistem EMBR

### Kesimpulan

Prestasi sistem EMBR yang dialirkan elektirk adalah lebih baik daripada sistem MBR tanpa aliran elektirk dengan peratusan penyingkiran COD dan  $\text{NH}_3\text{-N}$  setinggi 82.07% dan 70.5% untuk sistem EMBR dan 53.63% dan 43.81% bagi sistem MBR. Daya tolakan elektrostatik yang kuat antara kotoran dan permukaan membran konduktif GO/MCWNTs berjaya mengurangkan kotoran pada permukaan membran di sistem EMBR sejurusnya mendorong kepada peratusan pengurangan fluks relatif yang sedikit berbanding dengan sistem MBR. Hal ini membawa kesimpulan bahawa sistem EMBR mempunyai keberkesanan penyingkiran yang baik, fluks penurasan yang lebih tinggi, dan tahap ketahan kotoran yang lebih berkesan berbanding sistem MBR untuk rawatan POME.

### Penghargaan

Penulis ingin merakamkan penghargaan kepada Dana Padanan Kolaborasi (DPK-2021-002) dan Dana Modal Insan (MI-2019-017) atas sokongan kewangan yang diberi untuk kajian ini.

### Rujukan

1. Wan Mohammad Hamdan, W. N. A., Teow, Y. H. and Mohammad, A. W. (2018). Sustainable approach in palm oil industry - green synthesis of palm oil mill effluent based graphene sand composite (P-GSC) for aerobic palm oil mill effluent treatment. *Jurnal Kejuruteraan SI*, 1(7): 11-20.
2. Aziz, N. I. H. A. and Hanafiah, M. M. (2017). The potential of palm oil mill effluent (POME) as a renewable energy source. *Acta Scientifica Malaysia*, 1 (2): 9-11.
3. Subramaniam, M. N., Goh, P. S., Lau, W. J., Tan, Y. H., Ng, B. C. and Ismail, A. F. (2017). Hydrophilic hollow fiber PVDF ultrafiltration membrane incorporated with titanate nanotubes for decolourization of aerobically-treated palm oil mill effluent. *Chemical Engineering Journal*, 316: 101-110.
4. Sajjad, A. A., Teow, Y. H. and Mohammad Hussain, A. W. (2018). Sustainable approach for recycling palm oil mill effluent (POME) using integrated biofilm/membrane filtration system for internal plant usage. *Jurnal Teknologi*, 80(4): 165-172.
5. Teow, Y. H., Ooi, B. S., Ahmad, A. L. and Lim, J. K. (2012). Mixed-matrix membrane for humic acid removal: influence of different types of  $\text{TiO}_2$  of membrane morphology and performance. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 3(6): 374-379.
6. Ghani, M. S. H., Teow, Y. H., Ang, W. L., Mohammad, A. W., Ngteni, R. and Mohamed Yusof, K.M. (2017). Fouling assessment of tertiary palm oil mill effluent (POME) membrane treatment for water reclamation. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 8(3): 412-423.
7. Teow, Y. H., Ahmad, A. L., Lim, J. K., Ngang, H. P., Susan, L.Y. and Ooi, B.S. (2015). Hydroxyl functionalized PVDF- $\text{TiO}_2$  ultrafiltration membrane and its antifouling properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(21): 41844.
8. Huang, J., Wang, Z., Zhang, J., Zhang, X., Ma, J. and Wu, Z. (2015). A novel composite conductive microfiltration membrane and its anti-fouling performance with an external electric field in membrane bioreactors. *Scientific Reports*, 5(1): 9268.
9. Ho, K. C., Teow, Y. H., Ang, W. L. and Mohammad, A. W. (2017). Novel GO/MWCNTs mixed-matrix membrane with enhanced antifouling property for palm oil mill effluent treatment. *Separation and Purification Technology*, 177: 337-349.
10. Ho, K. C., Teow, Y. H. and Mohammad, A.W. (2019). Optimization of nanocomposite conductive membrane formulation and operating parameters for electrically-enhanced palm oil mill effluent filtration using response surface methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 126: 297-308.
11. Teow, Y. H., Ahmad, A. L., Lim, J. K. and Ooi, B. S. (2012). Preparation and characterization of PVDF/ $\text{TiO}_2$  mixed matrix membrane via in situ colloidal precipitation method. *Desalination*, 295: 61-69.

12. Zhang, J., Satti, A., Chen, X., Xiao, K., Sun, J., Yan, X. and Liang, P. (2015). Low-voltage electric field applied into MBR for fouling suppression: Performance and mechanisms. *Chemical Engineering Journal*, 273: 223-230.
13. Wong, Y., Ong, S., Lim, K. and Lee, H. (2011). Acclimatization and performance study of acidogenesis anaerobic degradation process for palm oil mill effluent. *International Conference on Environment and Industrial Innovation IPCBEE*, 12: 1-5.
14. Ho, K. C., Teow, Y. H., Mohammad, A.W. and Ang, W.L. (2017). An overview of electrically-enhanced membrane bioreactor (EMBR) for fouling suppression. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 10(3): 128-138.
15. Teow, Y. H., Ooi, B.S. and Ahmad, A. L. (2017). Study on PVDF-TiO<sub>2</sub> mixed-matrix membrane behaviour towards humic acid removal. *Journal of Water Process Engineering*, 15: 99-106.