

Mitigasi Kekotoran Membran Osmosis Hadapan Tarikan Baja (FDFO) semasa Pemekatan Efluen Kilang Minyak Sawit Anaerobik (AnPOME) (Fertilizer-drawn Forward Osmosis (FDFO) Membrane Fouling Mitigation during the Concentration of Anaerobic Palm Oil Mill Effluent (AnPOME))

Ruwaida Abdul Wahid^a, Ang Wei Lun^{a*} & Abdul Wahab Mohammad^b

^aJabatan Kejuruteraan Kimia & Proses, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina,
 Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia

^bChemical and Water Desalination Engineering Program,
 College of Engineering, University of Sharjah, United Arab Emirates

*Corresponding author: wl_ang@ukm.edu.my

Received 17 October 2024, Received in revised form 1 February 2025
 Accepted 2 March 2025, Available 30 October 2025

ABSTRAK

Pertumbuhan pesat pengeluaran minyak sawit telah meningkatkan penghasilan sisa biojisim yang ketara, terutamanya efluen kilang minyak sawit (POME). Memandangkan industri minyak sawit sedang beralih ke arah kelestarian alam sekitar dan daya saing, adalah penting untuk menangani cabaran ekologi yang ditimbulkan oleh POME. Kajian ini menyiasat kecenderungan pembentukan kekotoran membran dan strategi mitigasi semasa proses pemekatan efluen kilang minyak sawit anaerobik (AnPOME) menggunakan proses osmosis hadapan tarikan baja (FDFO). Menggunakan monoammonium fosfat (MAP) sebagai larutan penarik (LP), kajian ini menilai bagaimana pembentukan kekotoran berlaku dan keberkesanan pembersihan secara pembilasan hidraulik (PH) dan pencucian berbalik osmotik (PBO). Eksperimen ini mendedahkan bahawa fluks air awalan merosot dengan mendadak disebabkan oleh pemendapan bahan kotor pada lapisan aktif membran, diikuti dengan penurunan yang stabil. Pembersihan fizikal memulihkan fluks dengan berkesan, dengan PBO menunjukkan prestasi cemerlang dalam memulihkan fungsi membran. Walaupun gabungan PH dan PBO berjaya mengeluarkan bahan kotor, namun tidak memulihkan fluks air sepenuhnya. Pembersihan awal oleh PH menghasilkan pemulihan fluks 88.3%. Sebagai perbandingan, pembersihan seterusnya oleh PBO mencapai pemulihan fluks 103.9%, menunjukkan bahawa PBO memulihkan fluks dengan berkesan dan memperbaiki keadaan membran. Walaupun kedua-dua kaedah pembersihan PH dan PBO boleh mengurangkan sebahagian kekotoran, pengoptimuman selanjutnya dan gabungan berpotensi kaedah ini adalah perlu untuk meningkatkan kecekapan pembersihan dan mengekalkan prestasi operasi jangka panjang membran.

Kata kunci: Osmosis hadapan tarikan baja; pengotoran; pembersihan fizikal; pembilasan hidraulik; pencucian balik osmotik

ABSTRACT

The rapid expansion of palm oil production has significantly increased the generation of biomass residues, notably palm oil mill effluent (POME). As the palm oil industry shifts towards environmental sustainability and competitiveness, it is essential to address the ecological challenges posed by POME. This study investigates the membrane fouling propensity and mitigation strategies during the concentration of anaerobic palm oil mill effluent (AnPOME) using Fertilizer-drawn forward osmosis (FDFO). Utilizing monoammonium phosphate (MAP) as the draw solution (DS), the study evaluates the fouling behaviour and cleaning efficacy of hydraulic flushing (HF) and osmotic backwashing (OB). Experiments revealed that initial water flux declined sharply due to the deposition of foulants on the membrane's active layer, followed by a steady decrease. Physical cleaning effectively recovered the flux, with OB demonstrating superior performance in restoring membrane function. While the combination of HF and OB managed to remove the foulants, but they did not

completely restore the water flux. The initial cleaning by HF resulted in an 88.3% flux recovery. In comparison, the subsequent cleaning by OB achieved a 103.9% flux recovery, indicating that OB effectively restored the flux and improved the membrane condition. Although both HF and OB can partially alleviate fouling, further optimization and potential combinations of these methods are necessary to enhance cleaning efficiency and sustain the long-term operational performance of the membrane.

Keywords: *Fertilizer-drawn forward osmosis; fouling; physical cleaning; hydraulic flushing; osmotic backwashing*

PENGENALAN

Perkembangan pesat pengeluaran minyak sawit memberi kesan langsung kepada peningkatan sisa biojisim Kilang minyak sawit di seluruh dunia menggunakan air dalam pengekstrakan minyak sawit mentah dari tandan buah segar, menghasilkan air buangan yang banyak dirawat dalam kolam tadahan biologi. Indonesia dan Malaysia, pengeluar utama minyak sawit, secara bersama menghasilkan sehingga 1.36 milion tan effluen kilang minyak sawit (POME) setiap tahun. Sebanyak 5-7.5 tan air diperlukan untuk menghasilkan 1 tan minyak sawit mentah, yang mana lebih daripada separuh menjadi POME (Mohammad et al. 2021). POME mentah adalah ampaiian koloid likat berwarna coklat yang mengandungi kira-kira 95% air, 0.6-0.7% minyak dan gris, dan 4-5% pepejal penuh, yang dilepaskan pada suhu 80-90°C (Ruysschaert & Salles 2014; Mohammad et al. 2021) POME tidak toksik kerana tidak melibatkan bahan kimia tambahan semasa pengilangan (Kamarudin et al. 2015), namun keasidan dan kandungan organik yang ketara mendatangkan risiko kepada alam sekitar jika dilepaskan tanpa dirawat ke dalam badan air (Chin et al. 2013; Nasution et al. 2018).

Merawat POME mempunyai potensi besar untuk pemulihan sumber, seperti biogas untuk bahan api dan penggunaan semula nutrien melalui enapcemar anaerobik/aerobik dan POME yang dirawat untuk aplikasi tanah. Had pelepasan yang ketat telah mendorong industri minyak sawit untuk meneroka proses rawatan canggih dengan pendekatan yang mampan. Rawatan biologi konvensional, seperti sistem kolam anaerobik dan aerobik, kurang cekap kerana beban permintaan oksigen biokimia (BOD) yang tinggi, pH rendah, dan pepejal terampai dalam POME yang bersifat koloid (Tan et al. 2021; Dominic & Baidurah 2022), membawa kepada pencemaran alam sekitar. Analisis terperinci kos menyerlahkan ketidakcekapan sistem tersebut, yang mana sumber yang boleh diperbaharui kurang digunakan serta menghasilkan keuntungan yang minimum (Mohammad et al. 2021).

Rawatan POME yang berkesan amat penting dalam melindungi alam sekitar dan menjamin pertumbuhan ekonomi yang mampan dalam pengilangan minyak sawit

(A. L. Ahmad et al. 2009). Industri ini beralih ke arah kelestarian alam sekitar dan daya saing (A. L. L. Ahmad et al. 2015), disokong oleh organisasi seperti *Roundtable on Sustainable Palm Oil* (RSPO) dan *Malaysian Sustainable Palm Oil* (MSPO), yang mempromosikan amalan lestari (Naidu et al. 2024). Teknologi rawatan POME yang bertepatan menawarkan faedah seperti pengurangan sisa, kecekapan sumber, dan peningkatan peluang ekonomi, dalam menyokong pertumbuhan mampan. Konsep sistem pelepasan sifar bertujuan untuk memulihkan bahan yang boleh digunakan seperti minyak, enapcemar, dan air, bagi mengurangkan penjanaaan sisa dan menggunakan nutrien yang diperoleh daripada bahan enapcemar terawat sebagai baja (Loh et al. 2014; Dominic & Baidurah 2022). Teknologi membran, antara pelbagai kaedah rawatan, secara berkesan dapat menangani penyingkiran bahan cemar, pemulihan air, dan pemulihan sumber biologi dari POME, menghasilkan air berkualiti (Ang et al. 2020) yang sesuai untuk kegunaan industri, pengairan, malahan boleh diminum.

Osmosis hadapan (FO) telah mendapat perhatian yang besar untuk peranannya dalam rawatan POME, terutamanya sebagai satu alternatif yang cekap tenaga dan kos efektif kepada kaedah penapisan membran yang lain. FO memanfaatkan tekanan osmotik semula jadi sebagai daya pendorong, membolehkan molekul air tawar bergerak dari larutan suapan (LS) ke larutan penarik (LP) melalui membran separa telap (Ndiaye et al. 2021). Proses ini menghasilkan larutan suapan yang lebih pekat dan larutan penarik yang dicairkan. Kelebihan ketara FO adalah kecenderungan kekotoran membran yang minimum dan proses pembersihan yang mudah. Proses spontan ini menggunakan tenaga yang lebih rendah, kurang kekotoran, kebolehbalian kekotoran yang lebih tinggi, dan kadar pemulihan keseluruhan yang lebih baik (Go et al. 2016; Xie et al. 2016; Schneider et al. 2019; Syuhada et al. 2019).

Kajian menunjukkan bahawa osmosis hadapan tarikan baja (FDFO) boleh digunakan untuk mengembalikan air dan mencairkan baja, yang mana memudahkan penggunaan langsung dalam sistem fertigasi atau akuaponik/hidroponik, oleh itu tiada keperluan untuk penjanaaan semula larutan penarik (Chekli et al. 2017; Gulied et al. 2019; Al Bazed et al. 2022). FDFO menjanjikan pemulihan nutrien dari air

sisanya tetapi menghadapi cabaran dengan kekotoran. Kekotoran boleh menjadi organik, tidak organik, biologi, atau koloid. Faktor-faktor seperti ciri-ciri membran, kualiti air suapan, dan komposisi larutan penarik mempengaruhi pembentukan kekotoran. Penyelidikan telah memberi tumpuan kepada memahami mekanisme kekotoran FO, mengenal pasti faktor-faktor yang mempengaruhi kekotoran membran, dan membangunkan strategi mitigasi seperti pra-perawatan suapan, memilih atau mengubah membran, menyesuaikan kimia larutan penarik, mengoptimumkan keadaan operasi, dan pembersihan membran (Zulkefli et al. 2021; Guizani et al. 2022; Zhu et al. 2022).

Beberapa kajian telah menunjukkan bahawa kekotoran organik dan inorganik membran FO boleh dipulihkan sepenuhnya melalui pembersihan fizikal (Kim et al. 2017; Lotfi et al. 2018; Jung et al. 2020). Pembilasan hidraulik (PH) dan pencucian balik osmotik (PBO) adalah dua kaedah pembersihan fizikal yang biasa digunakan dalam sistem FO. HF menggunakan daya ricih seperti aliran silang atau *peruang* untuk melepaskan bahan kotoran daripada permukaan membran, manakala PBO menggunakan telapan air berbalik untuk menghilangkan bahan kotoran yang terbentuk. PH boleh membersihkan membran yang dicemari oleh bahan-bahan seperti silika, skala gips, dan alginat tetapi kurang berkesan terhadap bahan kotoran yang melekat kuat seperti bakteria, protein-surfaktan kompleks, minyak mentah, dan melanoidins (Zhu et al. 2022). PBO adalah kaedah pembersihan khusus untuk membran FO yang mana larutan suapan dan penarik diganti dengan larutan yang baharu, mengubah kecerunan tekanan osmotik untuk telapan berbalik (Motsa et al. 2017). Proses ini melemahkan lekatan lapisan kekotoran dan secara beransur-ansur menghilangkan bahan kotoran longgar melalui daya ricih aliran silang, mengurangkan rintangan telapan dan meningkatkan pemulihan fluks air.

Penyelidikan ini menilai potensi FDFO sebagai alternatif rawatan POME dalam merealisasikan inisiatif pelepasan sifar oleh kilang sawit. Oleh itu, kajian kecenderungan dan mitigasi pengotoran membran adalah penting untuk memberikan penyelesaian yang menyeluruh kepada industri sawit. Memandangkan POME berfungsi sebagai sumber pemulihan air dan nutrien tetapi juga mengandungi partikel organik, adalah penting untuk menyiasat potensi FDFO dalam pemuliharaan sumber dan tingkah laku kekotoran serta keberkesanan proses pembersihannya. Kajian ini bertujuan untuk menilai kecenderungan kekotoran dan meneliti keberkesanan pembersihan fizikal kepada membran FDFO yang dicemari dengan AnPOME.

BAHAN DAN KAEDAH

LARUTAN SUAPAN DAN PENARIK

Efluen kilang minyak sawit yang dirawat secara anaerobik (AnPOME) diambil dari Kilang Kelapa Sawit Sime Darby Tennamaram di Selangor, Malaysia, digunakan sebagai larutan suapan (LS). AnPOME disimpan dalam bilik sejuk selama tempoh kajian ini. Ciri-ciri AnPOME diperlihatkan dalam Jadual 1. Permintaan oksigen kimia (COD) dan unsur utama nutrien iaitu, jumlah nitrogen (TN), jumlah fosforus (P) dan kepekatan kalium (K), telah ditentukan melalui kaedah ujian HACH untuk analisis air sisa menggunakan spektrofotometer (DR3900, HACH, Ames, IA, USA). Jumlah pepejal terampai (TSS) ditentukan oleh kaedah gravimetrik. Baja komersial monoammonium fosfat (MAP), diperolehi daripada pembekal tempatan, dipilih sebagai LP bagi eksperimen untuk larian pengotoran, kerana mempunyai purata fluks air yang tinggi dan penurunan fluks yang rendah, yang diperolehi daripada kajian terdahulu (Wahid et al. 2021). Natrium klorida (NaCl) pula digunakan sebagai LS dalam eksperimen untuk larian pembersihan. Larutan disediakan dengan melarutkan sebatian kimia dalam air deionisasi (DI). Kedua-dua LS dan LP digunakan secara terus tanpa sebarang rawatan awal.

JADUAL 1. Sifat efluen kilang kelapa sawit yang dirawat secara anaerobik (AnPOME).

Parameter	Kepekatan
pH	7.76
Jumlah pepejal terampai (TSS)	6948 mg/L
Permintaan oksigen kimia (COD)	8185 mg/L
Jumlah Nitrogen (TN)	366 mg/L
Fosforus (P)	512 mg/L
Potasium (K)	2408 mg/L

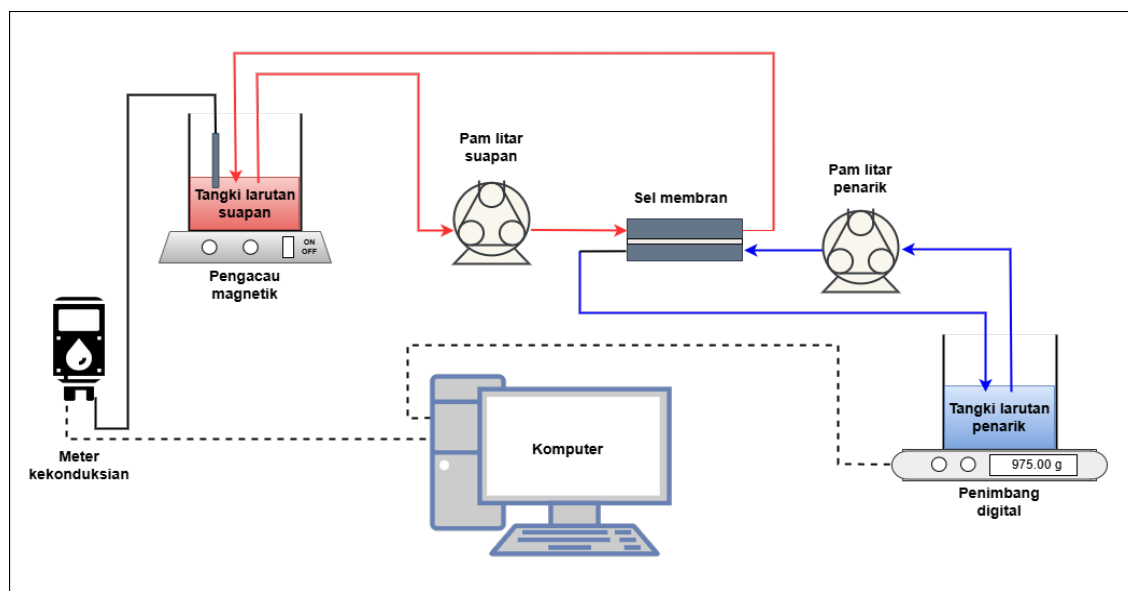
MEMBRAN FO

Membran komersial lembaran rata selulosa triasetat (CTA), OsmoF₂O™ (Fluid Technology Solutions, Incorporated (FTSH₂O) Albany, OR, USA) telah digunakan. Membran mempamerkan ciri-ciri intrinsik tertentu: pekali kebolehtelapan air (A) 0.51 L/m².jam.bar, pekali kebolehtelapan garam (B) lapisan aktif adalah 0.156 L/m².jam, dan parameter struktur (S) lapisan sokongan adalah 480 µm.

PERSEDIAAN SISTEM FO

Eksperimen ini menggunakan modul membran aliran silang (Sterlitech CF042 Cell, Kent, WA, USA) dengan kawasan efektif membran 0.0042 m^2 (Rajah 1). Kupon membran diletakkan dalam sel FO tanpa *peruang* dengan lapisan aktif (AL) menghadap bahagian suapan (mod AL-LS). Kadar aliran larutan suapan dan larutan penarik dikawal menggunakan dua pam peristaltik (BT600-2J, LongerPump, Hebei, China) ditetapkan kepada 600 mL/min , dengan halaju aliran silang (crossflow velocity, CFV) padanannya adalah 11.09 cm/s . Kedua-dua LS dan LP diedarkan dalam lingkaran tertutup, dalam aliran berlawanan pada setiap sisi membran pada suhu bilik ($25 \pm 2^\circ \text{C}$). Pengacau magnet (Benchmark Scientific Inc., Sayreville, New Jersey, USA)

digunakan untuk memastikan keseragaman dan menghalang pemendapan zarah terampai dalam larutan AnPOME. Perubahan dalam berat LP dipantau menggunakan penimbang elektronik (GF-6100, A&D Company Ltd, Tokyo, Jepun), manakala perubahan dalam kepekatan LS diukur dengan meter kekonduksian (EC1100, Horiba Scientific, Kyoto, Jepun). Kepekatan LS dan LP diukur di permulaan dan akhir setiap larian eksperimen, dengan data dijejaki dan direkodkan oleh komputer pada sela masa lima minit. Sistem membran FO telah distabilkan selama kira-kira 30 minit sebelum setiap larian dijalankan dengan mengedarkan air DI kepada dua-dua belah bahagian. Selepas itu, air DI telah digantikan dengan larutan LS dan LP yang ingin disiasat.



RAJAH 1. Gambar rajah skematik sistem penapisan osmosis hadapan (FO).

UJIAN PENGOTORAN DAN PEMBERSIHAN

Eksperimen pengotoran menggunakan keadaan asas ini di mana isipadu LS dan LP kedua-duanya 1.0 L , kepekatan LP ialah 1 M , dan CFV ialah 600 mL/min , digunakan untuk larian pemulihan pengotoran dan fluks. Sistem dibiarkan beroperasi selama 24 jam untuk larian pengotoran. Selepas selesai larian pengotoran, dua kaedah pembersihan telah digunakan untuk menilai keberkesannya untuk pemulihan air. Pembilasan hidraulik (PH), juga dikenali sebagai pembilasan permukaan membran, dilaksanakan dengan menggantikan kedua-dua LS dan LP dengan air DI dan mengedarkan semula selama 30 minit pada CFV berganda (iaitu, 1200 mL/min) dengan arah aliran terbalik daripada yang digunakan dalam larian pengotoran.

Pencucian balik osmotik (PBO) telah digunakan di mana LS dan LP masing-masing digantikan dengan 1 M NaCl dan DI, untuk menghasilkan fluks air negatif. PBO dikendalikan pada CFV 600 mL/min selama 30 minit. Setelah selesai larian pembersihan, LS dan LP yang awal telah digantikan semula ke dalam sistem untuk larian pemulihan fluks selama 24 jam. Pengotoran dan pembersihan dijalankan dalam dua kitaran secara berturut-turut untuk menilai kebolehan kitar semula membran. Kitaran pengotoran dan pembersihan dijalankan di bawah dua mod gabungan pembersihan: (1) PH digunakan dalam kedua-dua kitaran (PHH), dan (2) PH dalam kitaran pertama dan PBO dalam kitaran akhir (PHO). LS dan LP telah diganti serta-merta selepas setiap pembersihan tanpa perlu normalisasi sistem terlebih dahulu. Rajah 2 menggambarkan aliran eksperimen untuk ujian pengotoran dan pembersihan.

PENGUKURAN DAN ANALISIS

Fluks air (J_w) dalam proses FO disebabkan oleh resapan molekul air hasil daripada perbezaan tekanan osmotik merentasi membran. Penghijrahan air dari suapan ke bahagian tarikan semasa proses FO boleh diwakili oleh variasi berat LP (Emadzadeh et al. 2015), J_w ($L/m^2 \cdot jam$), dan dikira menggunakan persamaan:

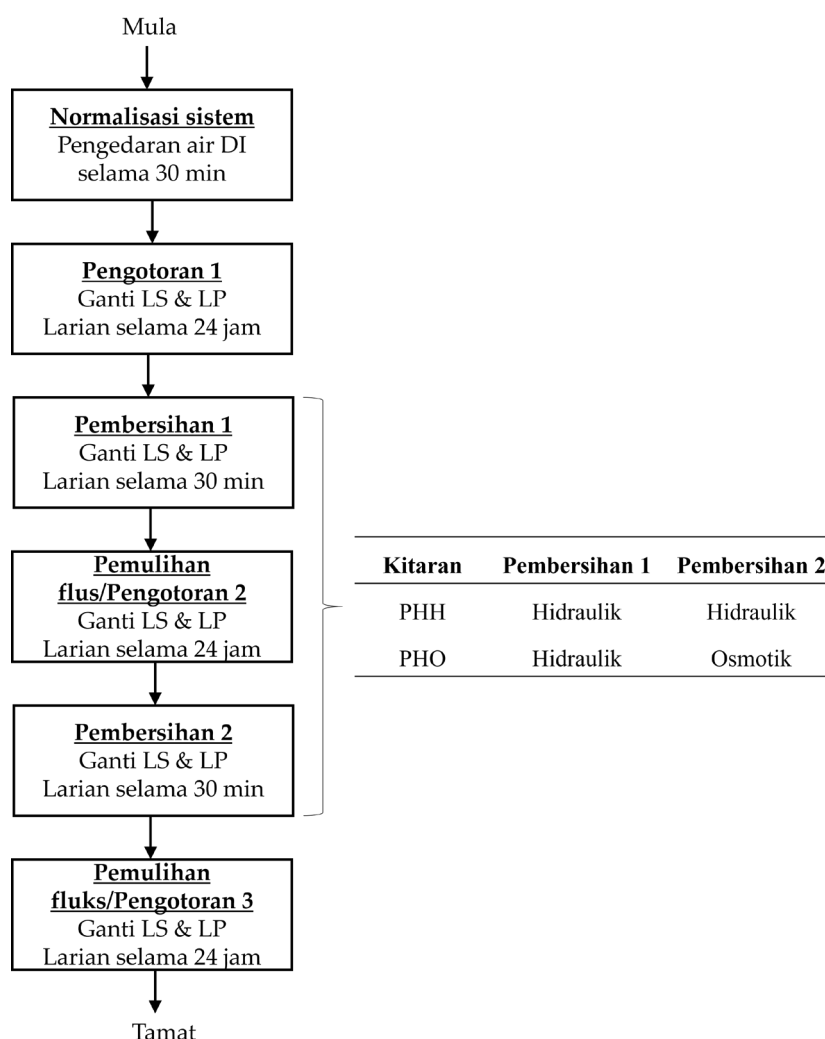
$$J_w = \frac{m_{D,t} - m_{D,o}}{\rho A \Delta t} \quad (1)$$

di mana $m_{D,t}$ dan $m_{D,o}$ ialah berat akhir dan awal LP (g) dalam tempoh Δt (jam), ρ ialah ketumpatan LS (g/L), dan A ialah luas efektif membran (m^2). Purata awal dan akhir J_w pengotoran, masing-masing ditentukan dengan purata fluks air bagi 2 jam pertama dan terakhir larian eksperimen.

Pemulihan fluks air ialah nisbah peratusan fluks selepas pembersihan, J_c , kepada fluks awal sebelum proses pembersihan, J_o . Fluks diukur di bawah keadaan yang sama seperti eksperimen asas. Pemulihan fluks memberikan ukuran keberkesanan proses pembersihan membran dan dikira menggunakan persamaan:

$$\text{Pemulihan fluks} = \frac{J_c}{J_o} \times 100 \quad (2)$$

Mikroskop Elektron Pengimbasan Pelepasan Medan, FE-SEM (Gemini SUPRA 55VP-ZEISS, Oberkochen, Jerman), telah digunakan bagi analisis morfologi membran, untuk pemerhatian visual keberkesanan proses pembersihan. Imej mikroskop permukaan lapisan aktif dan keratan rentas membran CTA dijana pada skala pembesaran 200 X dan 500 X.



RAJAH 2. Aliran proses untuk eksperimen kecenderungan pengotoran.

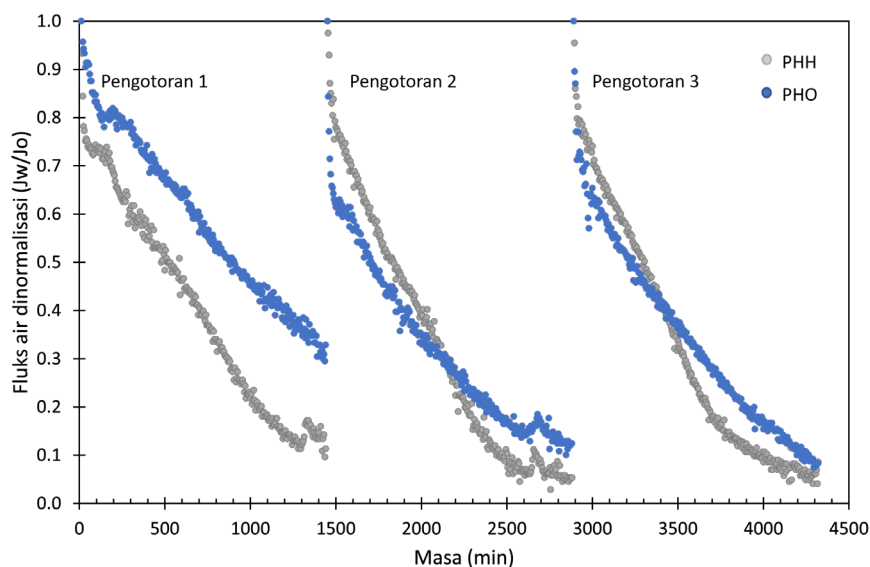
KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

TINGKAH LAKU FLUKS SEMASA KITARAN PEMBERSIHAN KOTORAN

Tingkah laku umum fluks pengotoran ialah fluks air, J_w menunjukkan penurunan mendadak dalam 100 minit pertama dan kemudian menggambarkan penurunan yang stabil sehingga akhir larian, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3. Penurunan fluks awal boleh dikaitkan dengan pемendapan kekotoran pada permukaan membran di bahagian suapan, dan garam terkumpul dalam LS disebabkan oleh fluks zat terlarut terbalik (*reverse solute flux*, RSF) yang meningkatkan tekanan osmotik bahagian suapan dan menambahkan kekotoran kepada permukaan membran disebabkan oleh penyusutan daya penggerak, yang seterusnya memburukkan lagi kesan tekanan osmotik yang dipertingkatkan oleh lapisan kek (*cake-enhanced osmotic pressure*, CEOP). Kecenderungan ini berlaku untuk setiap kitaran pengotoran selepas rawatan pembersihan. Pengotoran pertama (F1) mempunyai fluks yang lebih besar daripada fluks pengotoran setelah melalui kitaran pembersihan (F2 dan F3), menunjukkan bahawa walaupun J_w awal boleh dipulihkan melalui pembersihan, kadar kehilangan fluks selepas pembersihan berulang

adalah lebih ketara, seperti yang dilihat oleh cerun penurunan yang lebih curam untuk F2 dan F3. Malah penurunan awal J_w dalam F2 dan F3 amat menonjol, dengan penurunan nyata berlaku dalam tempoh yang lebih singkat daripada F1, iaitu dalam tempoh 70 minit pertama. Memandangkan kepekatan awal LP yang sama telah digunakan untuk setiap larian pengotoran, boleh diandaikan bahawa daya penggerak yang berkurangan yang disebabkan oleh pencairan LP tidak berkaitan dengan kadar penurunan fluks antara F1, F2 dan F3. Kadar penurunan J_w mungkin disebabkan oleh beberapa kotoran yang tertinggal pada permukaan membran hasil daripada kitaran pengotoran-pembersihan, telah meningkatkan penghalang bagi penghijrahan air merentasi membran. Fluks akhir untuk setiap kitaran juga menunjukkan gaya menurun, dengan J_w akhir untuk $F1 > F2 > F3$, menunjukkan bahawa prestasi membran FO merosot selepas setiap penurasan walaupun proses pembersihan telah dijalankan.

Menurut Ansari et al. (2018), keberkesanan pembilasan hidraulik dengan CFV yang tinggi bergantung kepada kekerapan ia digunakan untuk pembersihan, dan kitaran berulang mungkin tidak mencukupi untuk mengeluarkan zarah pepejal dari permukaan membran. Pemerhatian ini juga disokong oleh kejatuhan fluks yang dipaparkan dalam Rajah 4, di mana penurunan fluks untuk F2 dan F3 adalah lebih besar daripada F1.



RAJAH 3. Pola fluks untuk mod kitaran pembersihan kotoran: (i) pembersihan hidraulik-hidraulik (PHH) dan (ii) pembersihan hidraulik-osmotik (PHO).

Penemuan eksperimen kitaran pembersihan kotoran dirangkumkan dalam Jadual 2. Purata air yang dipulihkan daripada AnPOME selepas setiap pembersihan untuk PHH dan PHO masing-masing ialah 22.8% dan 23.6%. Kaedah pembersihan menggabungkan PH dan PBO terbukti lebih

berkesan daripada dua kali pembersihan dengan PH, yang mana PHO memulihkan 3.5% lebih banyak air daripada PHH. Walaupun dalam kitaran PHO, PBO menunjukkan prestasi yang lebih baik daripada PH, dengan pemulihan air yang lebih tinggi sebanyak 24.0% berbanding 23.2%.

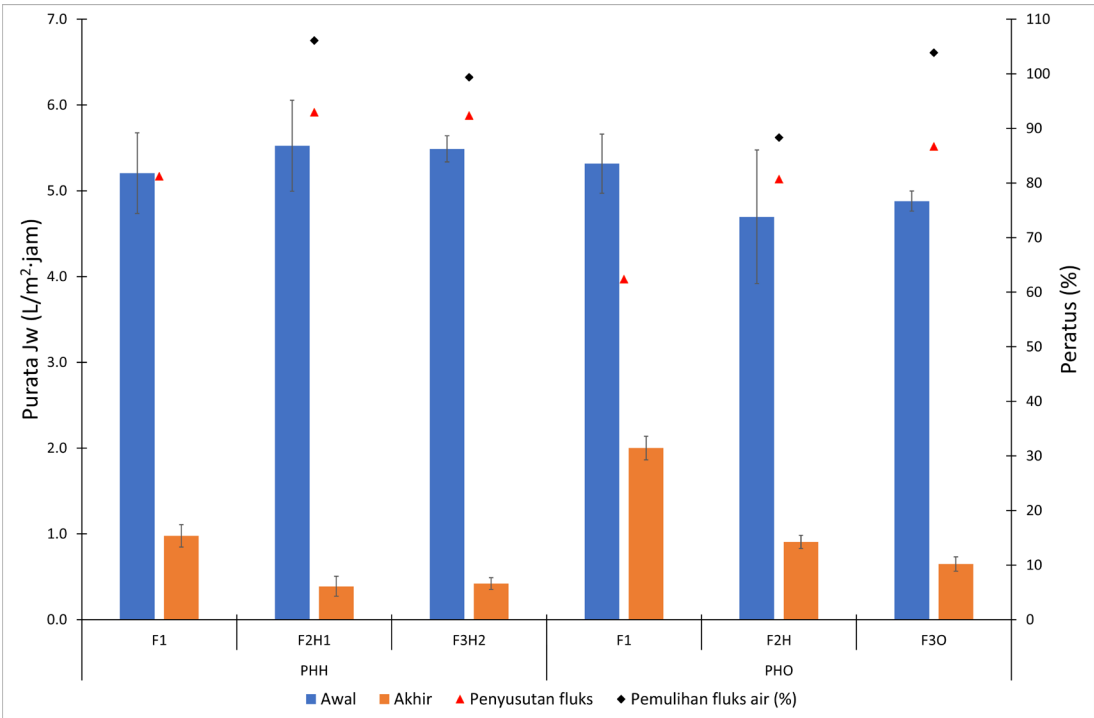
Kajian oleh Khraisheh et al. (2020) mendapati bahawa selepas pembersihan, peratusan pemulihan air daripada air sisa sintetik mengikut corak yang sama seperti fluks air, yang mana pada mulanya, 22.2% air dipulihkan, kemudian peratusan pemulihan berkurangan sedikit selepas pembersihan fizikal. Pembersihan cucian balikan adalah lebih berkesan, memulihkan 8% air daripada LS, yang lebih tinggi daripada jumlah yang dipulihkan dengan pembersihan hadapan.

PERBANDINGAN KITARAN PENGOTORAN-
PEMBERSIHAN BAGI PEMBERSIHAN
HIDRAULIK-HIDRAULIK (PHH) DAN
PEMBERSIHAN HIDRAULIK-OSMOTIK (PHO)

Pengukuran penurunan fluks untuk kitaran pengotoran-pembersihan bagi dua mod gabungan pembersihan, PHH dan PHO, ditunjukkan dalam Rajah 5. Pengukuran fluks dinormalkan kepada fluks awal (J_w/J_0). Di bawah rawatan PHH (Rajah 5a), menunjukkan proses pembersihan berjaya memulihkan J_w pada mulanya; walau bagaimanapun, selepas 300 minit, fluks untuk F2 dan F3 mula menurun secara berterusan pada kadar yang lebih tinggi daripada F1, yang digambarkan oleh kecerunan yang lebih curam. F2 dan F3 menunjukkan tingkah laku pengotoran yang serupa dengan pola J_w yang menurun, menunjukkan bahawa PH dapat membersihkan membran dengan

secukupnya. Daripada Jadual 2, pemulihan fluks air selepas pembersihan pertama (H1) dan pembersihan kedua (H2) masing-masing ialah 106.1% dan 99.3%. CFV yang lebih tinggi, dua kali ganda CFV garis dasar, yang dikenakan di bawah PH dalam aliran berlawanan berjaya mengeluarkan kotoran pada permukaan membran. Ansari et al. (2018) mendapati bahawa pembilasan hidraulik pada CFV lima kali ganda eksperimen asas boleh mencapai pemulihan air penuh. Walau bagaimanapun, kajian ke atas FO-MBR (bioreaktor membran) yang dikotori dengan enap cemar teraktif mendapati bahawa peningkatan CFV pembersihan hidraulik tidak berkesan dalam memulihkan fluks apabila lapisan kek telah terbentuk akibat pengotoran jangka panjang (Yu et al. 2017).

Pilihan LP juga memberi kesan kepada keberkesanan pembilasan hidraulik, kerana LP dengan tekanan osmotik yang lebih tinggi akan lebih berkesan dalam mengeluarkan lapisan kotoran secara fizikal (Devaere & Papangelakis 2023). Tambahan pula, dengan air DI diletakkan pada kedua-dua belah membran, penyerapan air merentasi membran terhalang, yang seterusnya menyumbang kepada keberkesanan pembersihan hidraulik. Penurunan fluks untuk F1, F2 dan F3 (Rajah 4) masing-masing ialah 81.2%, 93.0% dan 92.3%. Ini menunjukkan bahawa prestasi membran FO mula merosot selepas setiap proses pembersihan dijalankan.



RAJAH 4. Purata fluks air pada peringkat awal (2 jam pertama operasi), peringkat akhir (2 jam terakhir operasi), penyusutan fluks dan pemulihan fluks air selepas pembersihan.

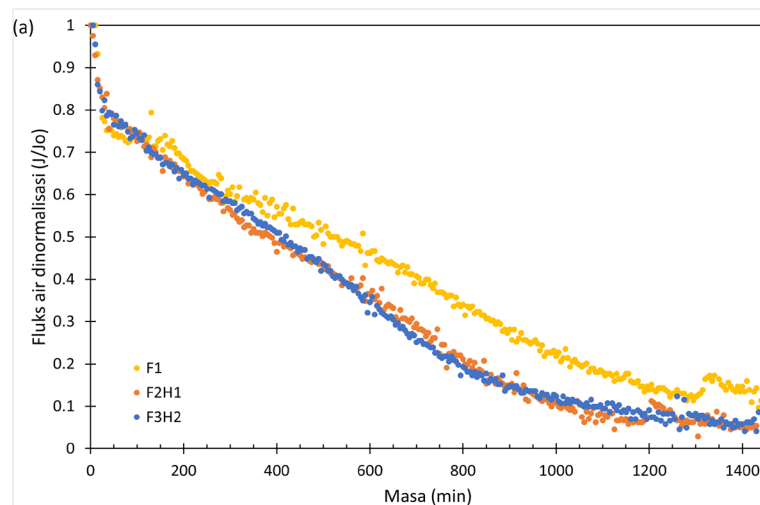
JADUAL 2. Keputusan untuk eksperimen kitaran pengotoran-pembersihan.

Kitaran	Larian	Purata Fluks Air J_w (L/m ² .jam)		Penyusutan fluks (%)	Pemulihan fluks air (%)	Pemulihan air (%)
		Awal	Akhir			
PHH	F1	5.21	0.98	81.2	-	27.3
	F2H1	5.52	0.39	93.0	106.1	22.7
	F3H2	5.49	0.42	92.3	99.3	22.8
PHO	F1	5.32	2.00	62.4	-	35.3
	F2H	4.70	0.91	80.7	88.3	23.2
	F3O	4.88	0.65	86.7	103.9	24.0

Rajah 5b menunjukkan fluks yang dinormalisasi untuk rawatan PHO, di mana kedua-dua jenis kaedah pembersihan berjaya mengeluarkan kotoran, walaupun pemulihan sepenuhnya fluks air tidak dicapai. Pembersihan pertama oleh PH memberikan pemulihan fluks 88.3%, dan pembersihan kedua oleh PBO memberikan pemulihan fluks 103.9%; ini menunjukkan bahawa PBO mampu memulihkan fluks dan memperbaiki keadaan membran, seperti yang dapat diperhatikan di mana J_w bagi F3 sentiasa berada di atas F2 hampir sepanjang 24 jam tempoh operasi. Rajah 4 juga menunjukkan corak penurunan fluks mengikut susunan $F3 < F2 < F1$, di mana nilai masing-masing ialah 86.7%, 80.7% dan 62.4%. Kajian terdahulu juga menunjukkan bahawa PBO berfungsi lebih baik daripada PH kerana ia mampu menghilangkan kotoran di dalam lapisan sokongan. Perubahan dalam arah aliran air disebabkan oleh penukaran LP yang mempunyai tekanan osmotik yang lebih rendah (air DI) daripada LS (1M NaCl) memacu penyingkiran kotoran daripada permukaan membran dengan lebih berkesan. Kajian mengenai PBO ke atas membran FO yang dikotori alginat oleh Motsa et al. (2017) mendapati bahawa kadar telapan air pembersihan dan daya ricih yang disebabkan oleh halaju aliran silang yang menyapu permukaan membran memainkan peranan

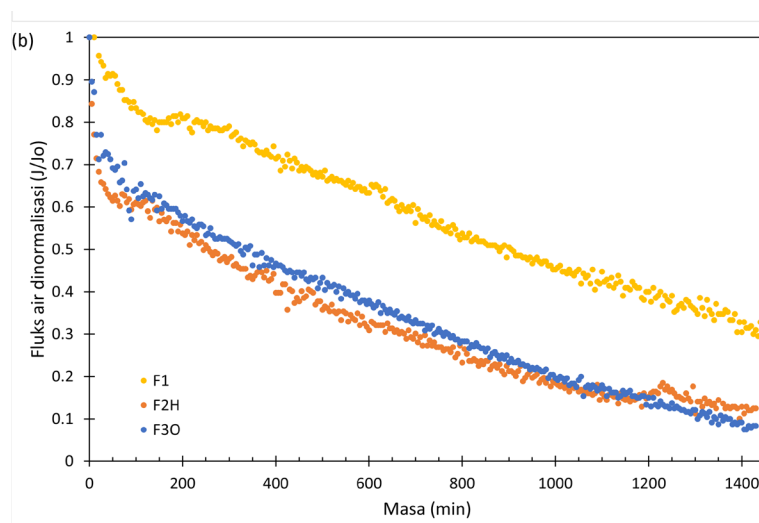
dalam penyingkiran lapisan pengotoran (lapisan gel).

Rajah 5 juga menunjukkan bahawa kaedah pembersihan fizikal yang digunakan ke atas membran kurang berkesan dalam memulihkan prestasi jangka panjang membran tersebut. Dapat dilihat bahawa fluks yang dinormalisasi untuk F2 dan F3 bagi kedua-dua PHH dan PHO berada di bawah F1. Proses pembersihan tidak dapat memulihkan fluks hampir kepada pengotoran pertama, iaitu F1. Selain daripada kekotoran yang masih tertinggal pada permukaan membran, kemerosotan prestasi proses FO mungkin disebabkan oleh penggunaan membran yang berulang kali. Pola yang diperhatikan ketika membran diguna semula boleh dikaitkan dengan polarisasi kepekatan dalaman (*internal concentration polarization*, ICP). Keputusan menunjukkan bahawa prosedur pembersihan fizikal yang digunakan dalam kajian ini adalah lebih berkesan untuk membersihkan permukaan luar membran tetapi kurang berkesan untuk membersihkan lapisan sokongan dalam membran. Oleh itu, dihipotesiskan bahawa kesan ICP daripada pengotoran sebelumnya masih kekal apabila membran digunakan semula kerana proses pembersihan tidak dapat menembusi lapisan sokongan dengan berkesan. Akibatnya, polarisasi kepekatan dalaman cair (DICP) akan kekal dalam membran (Lambrechts & Sheldon 2019).



bersambung ...

... sambungan

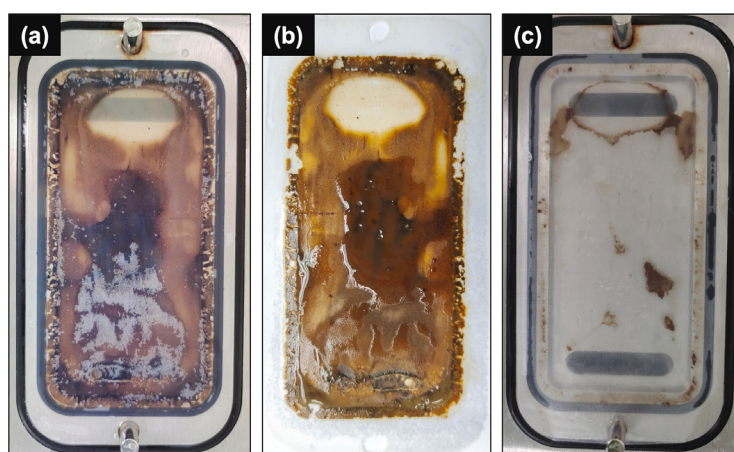


RAJAH 5. Pola penyusutan fluks untuk mod kitaran pengotoran-pembersihan:
(a) pembersihan hidraulik-hidraulik (PHH) dan (b) pembersihan hidraulik-osmotik (PHO).

GAMBARAN PENGOTORAN DAN PEMBERSIHAN MEMBRAN FO

Pemahaman yang lebih jelas mengenai pengotoran dan pembersihan membran boleh diperolehi melalui imej visual membran yang kotor dan yang telah dibersihkan, serta dipertingkatkan lagi kejelasannya melalui imej FESEM. Rajah 6a dan 6b menunjukkan bagaimana kotoran mendap pada bahagian AL permukaan membran. Jelas kelihatan bahawa kotoran meliputi seluruh kawasan aktif membran, dengan variasi dalam tahap endapan kotoran, di mana kawasan yang paling sedikit tercemar dikenal pasti dengan warna coklat muda. Kawasan ini adalah di mana aliran masuk LS memasuki sel membran. Kekotoran lebih tertumpu di bahagian tengah kawasan aktif membran, seperti yang dapat dilihat melalui mendapan yang lebih gelap.

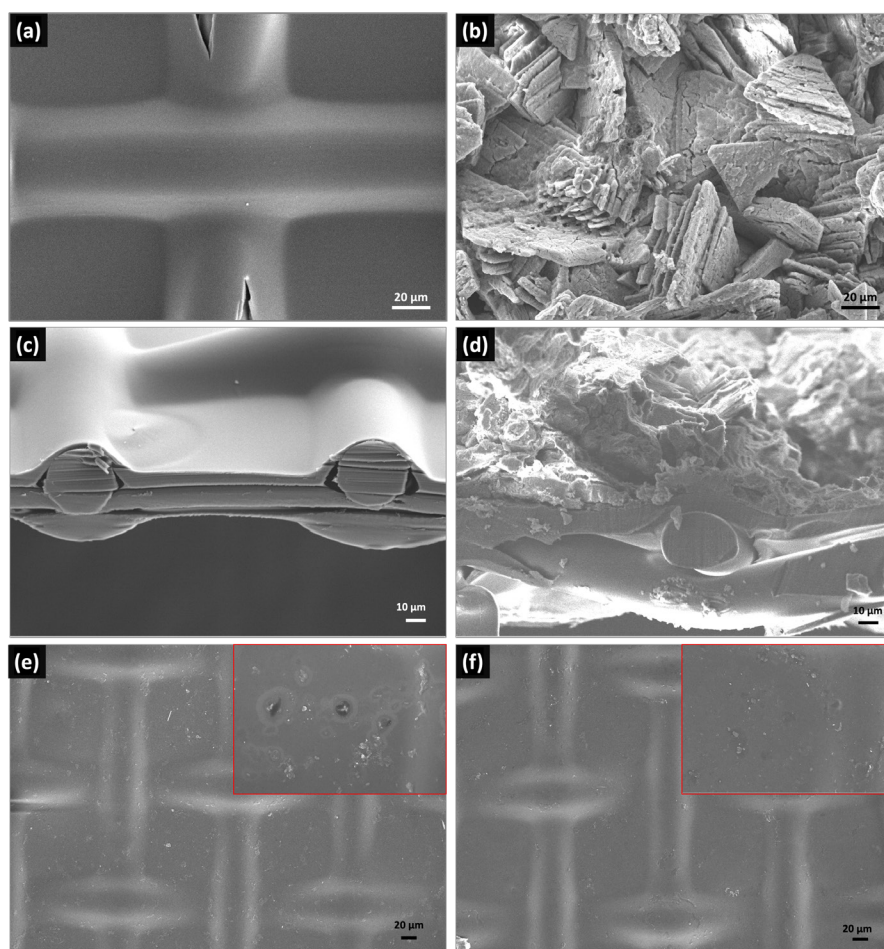
Rajah 6c ialah imej membran yang telah menjalani PH. Kelihatan bahawa deposit kotoran masih tertinggal pada permukaan AL membran, ini menyokong pola penurunan fluks yang dibincangkan sebelum ini. Kemungkinan CFV yang digunakan tidak mencukupi untuk menyingkirkan kotoran dengan sempurna. Pemerhatian oleh Zhan et al. (2020) mendapati bahawa lapisan kotoran pada permukaan membran menunjukkan kebolehbalian tertentu, di mana kebanyakan bahan kotoran terikat secara longgar dan boleh disingkirkan dengan berkesan semasa kitaran pembersihan awal menggunakan daya ricih yang tinggi. Walau bagaimanapun, sebahagian kotoran melekat kuat pada membran dan kekal di permukaannya walau telah cuba untuk dibersihkan menggunakan kaedah pembersihan fizikal.



RAJAH 6. Imej kupon membran: (a) membran kotor dalam sel membran (AL menghadap ke bawah); (b) membran kotor (AL menghadap ke atas); dan (c) membran yang dibersihkan dalam sel membran (AL menghadap ke bawah).

Imej FESEM juga boleh memberikan gambaran yang lebih jelas tentang fenomena pengotoran. Rajah 7 menunjukkan FESEM membran yang bersih, kotor dan yang telah dibersihkan. Membran CTA yang bersih mempunyai permukaan licin, seperti yang dilihat dalam Rajah 7a dan 7c, dan selepas pengotoran dengan AnPOME, permukaan membran dilitupi sepenuhnya dengan kotoran organik (Rajah 7b). Kotoran kelihatan kasar dan berbentuk kepingan halus, dan mendapan kotoran tidak membentuk lapisan kek padat pada AL (Rajah 7d). Keadaan ini menjelaskan mengapa PH dan PBO dapat menghasilkan pembersihan yang agak berkesan dan mencapai peratusan pemulihan fluks yang lebih tinggi. Daya ricihan pada lapisan kotoran yang terhasil daripada CFV yang tinggi oleh PH membolehkan kotoran dilepaskan dengan mudah daripada permukaan membran. Liputan longgar kotoran pada permukaan membran juga membolehkan tekanan osmotik yang mencukupi untuk memacu pergerakan air melalui membran dan melepaskan kotoran daripada permukaan membran.

Rajah 7e dan 7f memaparkan AL permukaan membran selepas pembersihan fizikal dilakukan. Adalah jelas bahawa kotoran telah berjaya dibersihkan, dengan hanya terdapat beberapa sedikit kesan kotoran yang tertinggal pada AL. Tompok atau kesan kotoran dapat dilihat dengan jelas pada permukaan membran yang dibersihkan dengan PH (Rajah 7e). Beberapa tompok atau kesan kotoran juga kelihatan pada permukaan membran yang dibersihkan dengan PBO (Rajah 7f); namun, ia tidak begitu ketara seperti dalam Rajah 7e. Ini menunjukkan bahawa permukaan membran FO boleh dibersihkan secara fizikal atau mendapan kotoran boleh dikurangkan daripada permukaannya, seperti yang disorotkan oleh kajian-kajian lain (Khraisheh et al. 2020; Suwaileh et al. 2019). Permukaan membran dalam Rajah 7f kelihatan lebih licin berbanding dalam Rajah 7e. Paparan pembesaran imej dalam Rajah 7e juga menunjukkan deposit yang lebih kasar tertinggal pada permukaan membran berbanding dalam Rajah 7f. Ini mengesahkan dapatan terdahulu bahawa keberkesanan pembersihan PBO melebihi PH.



RAJAH 7. Imej Mikroskop Elektron Pengimbasan Pelepasan Medan (FESEM) membran selulosa triasetat (CTA): (a) lapisan aktif membran bersih, (b) lapisan aktif membran yang kotor, (c) keratan rentas membran bersih, (d) keratan rentas membran yang kotor, (e) lapisan aktif membran selepas pembilasan hidrolik, (f) lapisan aktif membran selepas cucian balik osmotik.

KESIMPULAN

Kajian ini menilai kecenderungan pengotoran membran osmosis hadapan (FO) dalam merawat effluen kilang sawit yang dirawat secara anaerobik (AnPOME). Dapatan kajian menunjukkan bahawa kaedah pembilasan hidraulik dan pencucian balik osmotik dapat mengembalikan prestasi membran secara separa, walaupun kedua-dua kaedah ini tidak sepenuhnya berkesan dalam menghilangkan semua kotoran. Pembilasan hidraulik (PH) menunjukkan pemulihan fluks yang ketara, namun masih terdapat kotoran yang melekat pada membran, yang menunjukkan bahawa halaju aliran silang (CFV) tidak mencukupi untuk menyingkir kotoran dengan sempurna. Pencucian balik osmotik (PBO) menunjukkan kecekapan yang lebih tinggi dalam mengeluarkan kotoran longgar disebabkan oleh daya penggerak osmotik, tetapi ia juga tidak dapat menghapuskan semua bahan kotoran.

Imej FESEM mendedahkan bahawa sebahagian besar lapisan kotoran adalah terdiri daripada mendapan longgar kotoran organik pada permukaan membran. Ciri ini membolehkan kebolehbalian separa pengotoran dicapai melalui kaedah pembersihan fizikal. Walau bagaimanapun, kajian ini hanya menggunakan teknik FESEM yang hanya memberikan gambaran perbandingan permukaan membran berdasarkan imej sahaja bagi menilai keberkesanan proses pembersihan. Teknik analitik lain seperti Spektroskopi Penyebaran Sinar-X (EDX) dan Spektroskopi Inframerah Transformasi Fourier (FTIR) boleh digunakan untuk memberikan penjelasan lanjut yang lebih kuantitatif berdasarkan elemen atau sebatian kimia yang dapat dikesan di atas permukaan membran dengan menggunakan teknik-teknik tersebut. Hasil kajian mencadangkan bahawa gabungan teknik pembersihan mungkin diperlukan untuk mencapai prestasi membran yang optimum dan ketahanan jangka panjang. Ringkasnya, walaupun kaedah pembersihan hidraulik dan osmotik dapat mengurangkan kesan pengotoran, pengoptimuman lanjut dan gabungan kaedah pembersihan diperlukan untuk meningkatkan kecekapan pembersihan dan mengekalkan prestasi operasi membran dari semasa ke semasa.

PENGHARGAAN

Penyelidikan ini dibiayai oleh Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia melalui *Malaysian Research University Network* (MRUN) di bawah kod geran KK-2019-001 di Universiti Kebangsaan Malaysia dan *Royal Society International Collaboration Award* (IC160133) (diiktiraf di bawah kod geran KK-2017-006 di Universiti Kebangsaan Malaysia).

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Ahmad, A.L., Chong, M.F. & Bhatia, S. 2009. A comparative study on the membrane based palm oil mill effluent (POME) treatment plant. *Journal of Hazardous Materials* 171(1–3): 166–174.
- Ahmad, A.L.L., Idris, I., Chan, C.Y.Y. & Ismail, S. 2015. Reclamation from palm oil mill effluent using an integrated zero discharge membrane-based process. *Polish Journal of Chemical Technology* 17(4): 49–55.
- Al Bazed, G., Soliman, N. & Sewilam, H. 2022. Novel organic draw solution in forward osmosis process for fertigation: performance evaluation and flux prediction. *Environmental Science and Pollution Research* 29(45): 68881–68891.
- Ang, W.L., Balakrishnan, T., Veeraiya, T., Haiqal, M., Elham, M., Sharafii, M., Adlee, F. & Fujioka, T. 2020. Performance Evaluation of Tubular Ceramic Membrane for Palm Oil Mill Effluent Treatment. *Jurnal Kejuruteraan* 32(3): 513–521.
- Ansari, A.J., Hai, F.I., He, T., Price, W.E. & Nghiem, L.D. 2018. Physical cleaning techniques to control fouling during the pre-concentration of high suspended-solid content solutions for resource recovery by forward osmosis. *Desalination* 429: 134–141.
- Cekli, L., Kim, J.E., El Saliby, I., Kim, Y., Phuntsho, S., Li, S., Ghaffour, N., Leiknes, T.O. & Kyong Shon, H. 2017. Fertilizer drawn forward osmosis process for sustainable water reuse to grow hydroponic lettuce using commercial nutrient solution. *Separation and Purification Technology* 181(March): 18–28.
- Chin, M.J., Poh, P.E., Tey, B.T., Chan, E.S. & Chin, K.L. 2013. Biogas from palm oil mill effluent (POME): Opportunities and challenges from Malaysia's perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26: 717–726.
- Devaere, N. & Papangelakis, V. 2023. Forward Osmosis for Metal Processing Effluents under Similar Osmotic Pressure Gradients. *Membranes* 13(5): 501.
- Dominic, D. & Baidurah, S. 2022. Recent Developments in Biological Processing Technology for Palm Oil Mill Effluent Treatment—A Review. *Biology* 2022, Vol. 11, Page 525 11(4): 525.
- Emadzadeh, D., Lau, W.J., Rahbari-Sisakht, M., Ilbeygi, H., Rana, D., Matsuura, T. & Ismail, A.F. 2015. Synthesis, modification and optimization of titanate nanotubes-polyamide thin film nanocomposite (TFN) membrane for forward osmosis (FO) application. *Chemical Engineering Journal* 281: 243–251.

- Go, G.-W., Im, S.-J., Lee, S.-H. & Jang, A. 2016. Evaluation of forward osmosis membrane performance by using wastewater treatment plant effluents as feed solution. *Desalination and Water Treatment* 57(55): 26657–26669.
- Guizani, M., Ito, R. & Matsuda, T. 2022. Forward Osmosis (FO) Membrane Fouling Mitigation during the Concentration of Cows' Urine. *Membranes* 2022, Vol. 12, Page 234 12(2): 234.
- Gulied, M., Al Momani, F., Khraisheh, M., Bhosale, R. & AlNouss, A. 2019. Influence of draw solution type and properties on the performance of forward osmosis process: Energy consumption and sustainable water reuse. *Chemosphere* 233: 234–244.
- Jung, J., Ryu, J., Yu, Y. & Kweon, J. 2020. Characteristics of organic fouling, reversibility by physical cleaning and concentrates in forward osmosis membrane processes for wastewater reclamation. *Chemosphere* 245: 125787.
- Kamarudin, K.F., Tao, D.G., Yaakob, Z., Takriff, M.S., Rahaman, M.S.A. & Salihon, J. 2015. A review on wastewater treatment and microalgal by-product production with a prospect of palm oil mill effluent (POME) utilization for algae. *Der Pharma Chemica*.
- Khraisheh, M., Gulied, M. & AlMomani, F. 2020. Effect of Membrane Fouling on Fertilizer-Drawn Forward Osmosis Desalination Performance. *Membranes* 10(9): 243.
- Kim, Y., Li, S., Chekli, L., Woo, Y.C., Wei, C.-H., Phuntsho, S., Ghaffour, N., Leiknes, T. & Shon, H.K. 2017. Assessing the removal of organic micropollutants from anaerobic membrane bioreactor effluent by fertilizer-drawn forward osmosis. *Journal of Membrane Science* 533(September 2016): 84–95.
- Lambrechts, R. & Sheldon, M.S. 2019. Performance and energy consumption evaluation of a fertiliser drawn forward osmosis (FDFO) system for water recovery from brackish water. *Desalination* 456(January): 64–73.
- Loh, S.K., Ngatiman, M., Lim, W.S. & Choo, Y.M. 2014. A Zero Discharge Treatment System Of Palm Oil Mill Effluent. *Malaysian Palm Oil Board Information Series* 657(DEC): 6–9.
- Lotfi, F., Samali, B. & Hagare, D. 2018. Cleaning efficiency of the fouled forward osmosis membranes under different experimental conditions. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 6(4): 4555–4563.
- Mohammad, S., Baidurah, S., Kobayashi, T., Ismail, N. & Leh, C.P. 2021. Palm oil mill effluent treatment processes—A review. *Processes* 9(5): 1–22.
- Motsa, M.M., Mamba, B.B., Thwala, J.M. & Verliefde, A.R.D. 2017. Osmotic backwash of fouled FO membranes: Cleaning mechanisms and membrane surface properties after cleaning. *Desalination* 402: 62–71.
- Naidu, L., Moorthy, R. & Mohd Huda, M.I. 2024. the Environmental and Health Sustainability Challenges of Malaysian Palm Oil in the European Union. *Journal of Oil Palm Research* 36(1): 1–15.
- Nasution, M.A., Wibawa, D.S., Ahamed, T. & Noguchi, R. 2018. Comparative environmental impact evaluation of palm oil mill effluent treatment using a life cycle assessment approach: A case study based on composting and a combination for biogas technologies in North Sumatera of Indonesia. *Journal of Cleaner Production* 184: 1028–1040.
- Ndiaye, I., Chaoui, I., Vaudreuil, S. & Bounahmidi, T. 2021. Selection of substrate manufacturing techniques of polyamine-based thin-film composite membranes for forward osmosis process. *Polymer Engineering & Science* 61(7): 1912–1930.
- Ruysschaert, D. & Salles, D. 2014. Towards global voluntary standards: Questioning the effectiveness in attaining conservation goals. The case of the Roundtable on Sustainable Palm Oil (RSPO). *Ecological Economics* 107: 438–446.
- Schneider, C., Rajmohan, R.S., Zarebska, A., Tsapekos, P. & Hélix-Nielsen, C. 2019. Treating anaerobic effluents using forward osmosis for combined water purification and biogas production. *Science of the Total Environment* 647: 1021–1030.
- Suwaileh, W., Johnson, D. & Hilal, N. 2019. Brackish water desalination for agriculture: Assessing the performance of inorganic fertilizer draw solutions. *Desalination* 456(January): 53–63.
- Syuhada, W.N., At, W., Lun, W. & Wahab Mohammad, A. 2019. Role of graphene oxide in support layer modification of Thin Film Composite (TFC) membrane for forward osmosis application. *Jurnal Kejuruteraan* 31(2): 327–334.
- Tan, K.A., Wan Maznah, W.O., Morad, N., Lalung, J., Ismail, N., Talebi, A. & Oyekanmi, A.A. 2021. Advances in POME treatment methods: potentials of phycoremediation, with a focus on Southeast Asia. *International Journal of Environmental Science and Technology* 2021 19:8 19(8): 8113–8130.
- Wahid, R.A., Ang, W.L., Mohammad, A.W., Johnson, D.J. & Hilal, N. 2021. Evaluating fertilizer-drawn forward osmosis performance in treating anaerobic palm oil mill effluent. *Membranes* 11(8): 1–22.
- Xie, M., Shon, H.K., Gray, S.R. & Elimelech, M. 2016. Membrane-based processes for wastewater nutrient recovery: Technology, challenges, and future direction. *Water Research* 89: 210–221.
- Yu, Y., Lee, S. & Maeng, S.K. 2017. Forward osmosis membrane fouling and cleaning for wastewater reuse. *Journal of Water Reuse and Desalination* 7(2): 111–120.

- Zhan, M., Gwak, G., Kim, D.I., Park, K. & Hong, S. 2020. Quantitative analysis of the irreversible membrane fouling of forward osmosis during wastewater reclamation: Correlation with the modified fouling index. *Journal of Membrane Science* 597(November 2019): 117757.
- Zhu, L., Ding, C., Zhu, T. & Wang, Y. 2022. A review on the forward osmosis applications and fouling control strategies for wastewater treatment. *Frontiers of Chemical Science and Engineering* 16(5): 661–680.
- Zulkefli, N.F., Alias, N.H., Jamaluddin, N.S., Abdullah, N., Manaf, S.F.A., Othman, N.H., Marpani, F., Mat-Shayuti, M.S. & Kusworo, T.D. 2021. Recent mitigation strategies on membrane fouling for oily wastewater treatment. *Membranes* 12(1): 26.

