

Pendekatan Penghasilan Membran Polimer dengan Penggunaan Semula Sisa Plastik Polistiren untuk Rawatan Air Sisa

(Polymer Membrane Production Approach with Reuse of Polystyrene Plastic Waste for Wastewater Treatment)

TEOW YEIT HAAN^{1,2,3*}, VISHNU I.SUREASH¹, NUR 'DAYANA BATRISYA ZAINAL¹,
THURGASHINY VEERAMANI¹ & MUHAMMAD ILHAM BACHO¹

¹*Department of Chemical and Process Engineering, Faculty of Engineering and Built Environment,
Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia*

²*Research Centre for Sustainable Process Technology (CESPRO), Universiti Kebangsaan Malaysia,
43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia*

³*Cleaner Production – UKM Research Group, Universiti Kebangsaan Malaysia,
43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia*

Diserahkan: 28 April 2024/Diterima: 24 Jun 2024

ABSTRAK

Penyelidikan ini bertujuan untuk mengkaji potensi penggunaan semula sisa plastik polistirena (PS) dalam sintesis membran polimer untuk aplikasi rawatan air sisa. Penyelidikan ini dipicu oleh kebimbangan global mengenai pencemaran plastik dan keperluan untuk mencari alternatif yang lebih mampan dalam pengelolaan sisa plastik. Dengan menggabungkan PS dengan nanozarah TiO₂, penyelidikan ini mengkaji pengaruh jenis pelarut (N-metil-2-pirrolidona (NMP) dan N,N-dimetilasetamida (DMAc)) serta kepekatan TiO₂ (0.025-0.100 g/L) terhadap sifat dan prestasi membran yang dihasilkan. Membran polimer PS disintesis melalui kaedah penyongsangan fasa. Sifat membran seperti sudut sentuhan, keliangan dan saiz liang dianalisis untuk pencirikan membran, manakala prestasi membran seperti fluks resapan, keupayaan penolakan terhadap asid humik diuji dengan menggunakan sistem penapisan membran buntu. Keputusan kajian menunjukkan bahawa jenis pelarut dan kepekatan TiO₂ mempengaruhi sifat membran yang dihasilkan. Membran yang disintesis menggunakan NMP sebagai pelarut menunjukkan fluks resapan yang lebih tinggi, manakala DMAc memberikan keupayaan penolakan yang lebih tinggi terhadap asid humik. Penambahan TiO₂ meningkatkan sifat hidrofilik membran yang mendorong kepada penembusan molekul air melalui matriks membran, tetapi juga berpotensi mengurangkan fluks resapan jika kepekatan TiO₂ terlalu tinggi. Kesimpulannya, kajian ini menunjukkan potensi besar dalam penggunaan semula sisa plastik PS untuk pembuatan membran polimer untuk aplikasi rawatan air sisa. Dengan pemahaman yang lebih mendalam tentang faktor yang mempengaruhi sifat membran, kita dapat memperbaiki reka bentuk membran untuk meningkatkan prestasi dalam aplikasi penapisan air. Ini memberikan sumbangan yang signifikan kepada usaha global dalam mengurangkan pencemaran plastik dan menyediakan sumber air yang bersih dan mampan.

Kata kunci: Membran polimer; penapisan air sisa; penggunaan semula sisa plastik; polistirena; rawatan air

ABSTRACT

This study aims to explore the potential reuse of polystyrene (PS) plastic waste in the synthesis of polymeric membrane for wastewater treatment applications. The research was prompted by global concerns regarding plastic pollution and the imperative to identify sustainable alternatives for managing plastic waste. Through the incorporation of TiO₂ nanoparticles into PS, this study investigated the influence of solvent type (N-methyl-2-pyrrolidone (NMP) and N,N-dimethylacetamide (DMAc)) and TiO₂ concentration (0.025-0.100 g/L) on the properties and performance of the produced membrane. PS polymer membranes were synthesized using the phase inversion method. Membrane properties such as contact angle, porosity, and pore size were analyzed for membrane's characterization. Membrane performance, including permeate flux and humic acid rejection, was tested using a dead-end membrane filtration system. The results of the study indicate that the type of solvent and the concentration of TiO₂ affect the properties of the produced membrane. Membranes synthesized using NMP as a solvent exhibited a higher permeate flux, while DMAc provided greater rejection ability against humic acid. The incorporation of TiO₂ enhanced the hydrophilicity of the membrane, facilitating the penetration of water molecules through the membrane matrix. However, excessive TiO₂ concentration may decrease permeate flux. In conclusion, this study demonstrates promising potential in the reuse of PS plastic

waste for the manufacture of polymeric membranes in wastewater treatment applications. Enhanced comprehension of the factors influencing membrane properties can facilitate the refinement of membrane design, thereby enhancing performance in its applications. This research contributes significantly to global efforts to mitigate plastic pollution and ensure the provision of clean and sustainable water sources.

Keywords: Polymeric membrane; polystyrene; reuse of waste plastic; wastewater filtration; water treatment

PENGENALAN

Pencemaran plastik adalah salah satu masalah alam sekitar yang paling serius pada zaman ini. Lebih daripada 300 juta tan plastik dihasilkan setiap tahun dengan kira-kira 19-23 juta tan sisa plastik mencemari ekosistem akuatik, tasik, sungai dan laut setiap tahun (UN Environment Programme 2024), menyebabkan pencemaran yang serius. Selain itu, berjuta-juta tan plastik berakhir di tapak pelupusan sampah atau tersebar di persekitaran.

Pencemaran plastik boleh menyebabkan perubahan habitat, mengurangkan keupayaan ekosistem untuk menyesuaikan diri dengan perubahan iklim dan secara langsung mempengaruhi kesejahteraan sosial. Tambahan pula, pencemaran plastik boleh menyebabkan pencemaran tanah dan air. Lebih buruk lagi, plastik adalah bahan yang sukar terurai dan boleh tinggal di alam sekitar selama bertahun-tahun. Bergantung kepada jenis plastik, ia boleh mengambil masa antara dua puluh hingga lima ratus tahun untuk terurai (Plastic Collective 2024).

Masalah sisa plastik telah berlaku selama bertahun-tahun, tetapi hanya baru-baru ini masyarakat mula mengiktirafnya sebagai isu alam sekitar utama yang perlu ditangani. Dalam konteks ini, polistirena (PS) adalah salah satu jenis bekas yang paling biasa digunakan untuk membungkus makanan kerana sifatnya yang ringan, ketegaran dan mempunyai sifat penebat yang baik (Ho, Roberts & Lucas 2017). Malangnya, kebanyakan produk PS berakhir di tapak pelupusan bandar, menyebabkan jumlah sisa plastik yang besar dan menjadi beban kepada alam sekitar. Sepanjang beberapa dekad yang lalu, PS menyumbang kira-kira 10% daripada keseluruhan berat sisa plastik, menjadikannya salah satu produk sisa pasca pengguna yang paling membimbangkan (Aljabri et al. 2017).

Cabaran alam sekitar yang timbul akibat penggunaan plastik sekali guna semakin mendapat perhatian politik dan undang-undang di Ecuador. Ini tercetusnya penghasilan Undang-undang Organik untuk Rasionalisasi, Penggunaan Semula dan Pengurangan Plastik Sekali Guna pada 21 Disember 2020. Undang-undang ini bertujuan untuk mengawal penjanaan sisa plastik, menggalakkan pengurangan progresif penggunaan plastik sekali guna melalui penggunaan yang bertanggungjawab, promosi penggunaan semula dan kitar semula sisa plastik, serta mempertimbangkan penggunaan pembungkusan dan produk yang diperbuat daripada bahan kitar semula atau

terbiodegradasi dengan jejak karbon yang lebih rendah berbanding produk konvensional, dengan matlamat untuk menyumbang kepada penjagaan kesihatan dan alam sekitar (Hidalgo-Crespo et al. 2022).

Dengan demikian, matlamat penyelidikan ini adalah untuk mengkaji kebolehan pengitaran semula sisa plastik polistirena (PS) demi penghasilan membran polimer PS yang digunakan untuk rawatan air sisa. Titanium dioksida (TiO_2), dengan sifat hidrofilik dan kebolehtelapan yang sangat baik, merupakan bahan tambahan yang ideal untuk penghasilan membran polimer PS (Ho, Raffi & Teow 2022). Faktor utama seperti jenis pelarut, kepekatan PS dan kepekatan TiO_2 telah dimanipulasi dalam usaha meneroka formula yang dapat meningkatkan sifat membran dan prestasinya. Fokus kajian ini terhadap kemampunan diharapkan dapat membantu dalam menangani masalah pencemaran plastik dengan berjaya, sambil mengembangkan alternatif kepada penggunaan plastik sekali guna. Usaha ini berpotensi memberikan manfaat yang besar kepada alam sekitar.

BAHAN DAN KAEDAH

BAHAN

Sisa plastik polistirena (PS) yang digunakan dalam kajian ini (Rajah 1) merupakan pembungkus makanan yang kerap digunakan di kedai makanan. N-metil-2-pirrolidona (NMP) diperoleh dari Merck Sdn. Bhd., Malaysia, manakala N,N-dimetilasetamida (DMAc) diperoleh dari R&M Chemicals, Malaysia. NMP dan DMAc digunakan sebagai pelarut untuk melarutkan sisa plastik. Titanium dioksida (TiO_2) dengan ketulenan $\geq 99\%$, dibekalkan oleh Sigma-Aldrich Co., Amerika Syarikat, digunakan sebagai bahan tambahan hidrofilik. Asid hialuronik (HA), yang diperoleh dari Sigma-Aldrich Co., Amerika Syarikat, digunakan untuk penyediaan air model sisa untuk menilai prestasi membran yang dihasilkan. Natrium hidroksida (NaOH), diperoleh dari Classic Chemicals Sdn. Bhd., Malaysia, digunakan untuk melarutkan HA semasa penyediaan air model sisa.

PRA-PENYEDIAAN POLISTIRENA (PS)

Sisa PS yang dikumpulkan pada permulaannya dibilas dengan air paip untuk menyingkirkan kotoran dari permukaannya. Kemudian, sisa PS dikeringkan pada suhu bilik. Selepas proses pengeringan, sisa PS dipotong menjadi kepingan kecil dengan anggaran saiz 5 mm \times 5 mm.

PENYEDIAAN LARUTAN POLIMER MEMBRAN

Kajian ini dilakukan dengan menggunakan dua jenis pelarut yang berbeza, iaitu NMP dan DMAc. Potongan kecil PS yang telah dipra-persediaan dicampurkan ke dalam pelarut mengikut nisbah polimer-pelarut, kemudian dikacau secara berterusan dengan kelajuan 250 rpm pada suhu 65 °C (Teow, Oo & Ahmad 2017). Selepas itu, TiO₂ ditimbang dan ditambahkan kepada larutan polimer membran sebagai bahan tambahan hidrofilik. Setelah larutan homogen terbentuk, larutan polimer membran diletakkan dalam desikator pada suhu bilik semalaman untuk menghapuskan sebarang gelembung udara yang terperangkap dalam larutan. Komposisi larutan polimer membran dijadualkan dalam Jadual 1.

PENGHASILAN MEMBRAN POLIMER

Larutan polimer membran dilemparkan secara seragam ke atas plat kaca yang rata dengan menggunakan pisau tuangan filem pada ketebalan nominal 150 µm. Plat kaca yang telah dilapisi dengan lapisan larutan polimer kemudian direndam secara langsung ke dalam tab mandi pembekuan yang mengandungi air suling. Plat kaca tersebut dibiarkan dalam tab mandi selama sehari untuk memastikan pemejalan yang sempurna dalam proses penyongsangan fasa (Teow et al. 2012). Selepas itu, membran polimer PS yang telah dihasilkan disimpan dalam air ultratulen sebelum menjalani proses pencirian dan penilaian prestasi.

PENCIRIAN MEMBRAN POLIMER

Keliangan membran ditentukan dengan menggunakan kaedah gravimetrik. Pada permulaannya, sampel membran dihiris menjadi kepingan kecil berukuran 1 cm × 1 cm. Sampel ini kemudian direndam dalam air suling semalaman. Sebelum mengukur berat basah, titisan berlebihan pada permukaan membran dilap dengan menggunakan kertas penapis. Selepas itu, sampel membran dikeringkan di dalam ketuhar pada suhu 50 °C selama sehari dan ditimbang semula. Ketebalan membran diukur dengan menggunakan alat pengukur ketebalan mikro, model Mitutoyo 7327 (Mitutoyo, Jepun). Keliangan membran dihitung menggunakan Persamaan (1):

$$\varepsilon = \frac{W_1 - W_2}{\frac{\rho_w}{W_1 - W_2} + \frac{W_2}{\rho_p}} \times 100\% \quad (1)$$

dengan ε ialah keliangan membran (%); W_1 ialah berat basah membran (g); W_2 ialah berat kering membran (g); ρ_w ialah ketumpatan air suling (0.998 g/mL); ρ_p ialah ketumpatan polimer (PS = 1.05 g/mL).

Purata saiz liang membran ditentukan dengan menggunakan persamaan Guerout-Elford-Ferry seperti berikut:

$$r_m = \sqrt{\frac{(2.9 - 1.75\varepsilon)8\eta l Q}{\varepsilon \times A \times \Delta P}} \quad (2)$$

dengan r_m ialah saiz purata liang membran (m); ε ialah keliangan membran (%); η ialah kelikatan air (8.9×10^{-4} Pa s); l ialah ketebalan membran (m); Q ialah isi padu meresap setiap unit masa (m^3/s); A ialah luas permukaan membran (m^2); dan ΔP ialah tekanan operasi (Pa).

Sudut sentuhan statik sampel membran ditentukan menggunakan teknik sessile drop dengan penganalisis sudut sentuhan manual SEO Phoenix 300 (Surface & Electro Optics Co., Korea). Sampel membran kering dilekatkan pada slaid kaca menggunakan pita bermuka dua, memastikan lapisan aktif menghadap ke atas. Kira-kira 13 µL air ultratulen disalurkan secara manual ke permukaan membran menggunakan picagari. Selepas itu, kamera yang disambungkan kepada penganalisis sudut sentuhan manual SEO Phoenix 300 telah dilaraskan untuk memfokus pada permukaan sampel membran. Analisis mikrograf dan anggaran nilai sudut sentuhan dilakukan dengan menggunakan perisian Surfaceware 8. Nilai sudut sentuhan yang dilaporkan merupakan purata tiga ukuran yang diambil pada titik berbeza di permukaan sampel membran untuk meminimumkan ralat analisis.

PENILAIAN PRESTASI MEMBRAN POLIMER

Sistem penapisan membran buntu yang digambarkan dalam Rajah 2 digunakan untuk menilai fluks resapan dan penolakan HA oleh membran polimer PS yang dihasilkan. Sistem ini terdiri daripada sel membran, Sterlitech HP4750 (Sterlitech Corp., AS), pengacau magnet, penimbang digital, tangki gas nitrogen, pengatur tekanan tinggi dan injap pelepas tekanan.

Membran polimer PS yang dihasilkan dipotong menjadi bentuk cakera dengan luas permukaan berkesan 10.75 cm² dan diletakkan pada dasar sel membran. Gelang-O getah digunakan untuk menetapkan membran. Sel membran kemudiannya diisi dengan 200 mL larutan HA pada kepekatan 20 mg/L digunakan sebagai suapan. Sistem penapisan membran buntu ini dikendalikan pada tekanan 3 bar dengan kelajuan kacau 400 rpm dan tekanan operasi dijana menggunakan gas nitrogen daripada tangki. Resapan yang terhasil daripada proses penapisan membran dikumpulkan dalam bikar yang diletakkan di atas penimbang digital. Jisim resapan akan diukur dan direkodkan oleh komputer.

Isi padu resapan yang dikumpul dalam tempoh tertentu diukur secara langsung untuk menentukan fluks resapan, yang dihitung menggunakan Persamaan (3):

$$J = \frac{V}{A t} \quad (3)$$

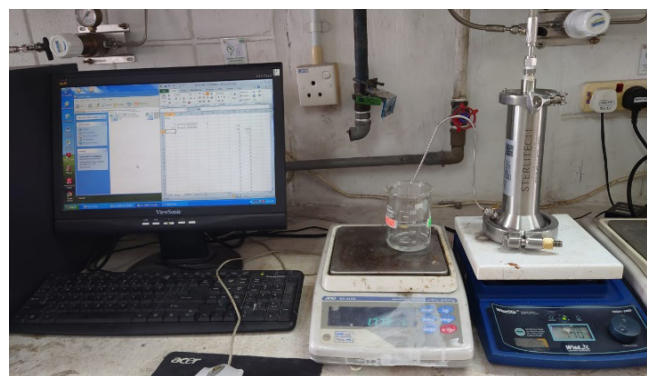
dengan J ialah fluks resapan ($L/m^2 h$); V ialah isi padu resapan (L); A ialah luas permukaan membran (m^2); dan t ialah masa resapan (h).



RAJAH 1. Sisa plastik polistirena (PS) yang digunakan dalam kajian ini

JADUAL 1. Komposisi larutan polimer membran dalam kajian ini

Membran	Jenis pelarut	Nisbah berat pelarut (wt%)	Nisbah berat PS (wt%)	Kepekatan TiO ₂ (g/L)
M1(a)	NMP	84	16	0.025
M1(b)	NMP	84	16	0.050
M1(c)	NMP	84	16	0.100
M2(a)	NMP	83	17	0.025
M2(b)	NMP	83	17	0.050
M2(c)	NMP	83	17	0.100
M3(a)	NMP	82	18	0.025
M3(b)	NMP	82	18	0.050
M3(c)	NMP	82	18	0.100
M4(a)	DMAc	84	16	0.025
M4(b)	DMAc	84	16	0.050
M4(c)	DMAc	84	16	0.100
M5(a)	DMAc	83	17	0.025
M5(b)	DMAc	83	17	0.050
M5(c)	DMAc	83	17	0.100
M6(a)	DMAc	82	18	0.025
M6(b)	DMAc	82	18	0.050
M6(c)	DMAc	82	18	0.100



RAJAH 2. Gambar rajah sistem penapisan membran buntu

Kepekatan kedua-dua larutan suapan HA dan resapan ditentukan dengan mengukur nilai penyerapan sampel air dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis DR 3900 (Hach, Malaysia), yang beroperasi pada panjang gelombang 254 nm (Teow 2016). Penolakan HA kemudiannya dihitung menggunakan Persamaan (4).

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100\% \quad (4)$$

dengan R ialah penolakan HA (%); C_p ialah kepekatan resapan (mg/mL); dan C_f ialah kepekatan larutan suapan HA (mg/mL).

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

PENCIRIAN MEMBRAN POLIMER PS

Jadual 2 meringkaskan sifat pencirian utama bagi membran polimer PS yang disintesis dalam kajian ini. Salah satu sifat penting yang dianalisis adalah sudut sentuhan, yang menunjukkan ciri hidrofilik atau hidrofobik permukaan membran. Permukaan yang hidrofilik adalah apabila sudut sentuhan air statiknya (θ) adalah kurang daripada 90° , sementara permukaan yang hidrofobik adalah apabila sudut sentuhan lebih besar daripada 90° (Rosnan, Teow & Mohammad 2018). Kesemua membran dalam kajian ini mempunyai sudut sentuhan kurang daripada 90° , menunjukkan sifat hidrofilik yang sesuai untuk aplikasi dalam rawatan air dan air sisa.

Pengenalan nanozarah TiO_2 ke dalam matriks membran sering dianggap dapat meningkatkan sifat hidrofilik membran tersebut. Ini disebabkan oleh sifat intrinsik hidrofilik TiO_2 (Jiang, Yu & Li 2023) yang berpotensi untuk memberikan peningkatan hidrofilik pada membran secara keseluruhan. Walau bagaimanapun, dalam kajian ini, hasil yang diperoleh menunjukkan keputusan yang bercanggah dengan kajian terdahulu. Seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 2, sudut sentuhan meningkat dengan penambahan nanozarah TiO_2 ke dalam matriks membran. Keputusan ini mungkin disebabkan oleh peningkatan kekasaran permukaan membran yang disebabkan oleh penggabungan nanozarah TiO_2 ke dalam matriks membran. Dengan struktur kekasaran hierarki pada permukaan membran dan pertaburan nanozarah TiO_2 yang seragam, terdapat pembentukan poket udara di antara air dengan permukaan membran. Ini mengurangkan kawasan kontak antara air dan permukaan membran, yang pada gilirannya mengurangkan histeresis sudut sentuhan, sudut kecondongan dan daya pelekatan (Teow et al. 2012). Akibatnya, sudut sentuhan membran meningkat, menunjukkan sifat hidrofilik yang lebih rendah.

Keliangan dan saiz liang membran meningkat dengan penambahan 0.025 g/L hingga 0.05 g/L nanozarah TiO_2 ke dalam matriks membran. Peningkatan keliangan dan saiz liang membran dengan penambahan nanozarah TiO_2 ke dalam matriks membran mungkin disebabkan oleh faktor yang berkaitan dengan proses pembentukan membran. Satu kemungkinan adalah peningkatan kadar pertukaran pelarut dan bukan pelarut semasa proses penyongsangan fasa dalam pembentukan membran. Semasa penyongsangan fasa, peningkatan sifat hidrofilik larutan polimer membran akibat penambahan nanozarah TiO_2 menggalakkan kontak antara pelarut (NMP atau DMAc) dan bukan pelarut (air di dalam tab mandi pembekuan). Ini menyebabkan percepatan dalam proses pembentukan membran, yang seterusnya menyebabkan peningkatan keliangan dan saiz liang membran untuk membran yang terbentuk (Geleta et al. 2023). Namun, kepekatan TiO_2 yang tinggi, iaitu 0.1 g/L dalam larutan polimer membran boleh mengakibatkan penyumbatan, yang akan menghalang pertukaran pelarut dan bukan pelarut semasa penyongsangan fasa. Penyumbatan ini akan mengurangkan keliangan dan saiz liang membran. Oleh itu, walaupun peningkatan keliangan dan saiz liang membran diamati dengan penambahan nanozarah TiO_2 pada tahap tertentu, kepekatan yang terlalu tinggi boleh menghasilkan keputusan yang bertentangan.

FLUKS RESAPAN MEMBRAN POLIMER PS

Rajah 3 memperlihatkan fluks resapan membran polimer PS yang disintesis dalam kajian ini. Secara umum, terdapat perbezaan dalam fluks resapan antara membran polimer PS yang disintesis menggunakan NMP sebagai pelarut berbanding dengan yang menggunakan DMAc. Membran polimer yang disintesis menggunakan NMP menunjukkan fluks resapan yang lebih tinggi berbanding dengan yang menggunakan DMAc dengan membran M1(a) pada nisbah polimer: pelarut 16:84 dan kepekatan TiO_2 0.025 g/L menunjukkan fluks resapan yang tertinggi ($355 \text{ L/m}^2 \text{ h}$). Ini disebabkan oleh saiz liang yang lebih besar pada membran yang disintesis menggunakan NMP, seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 2.

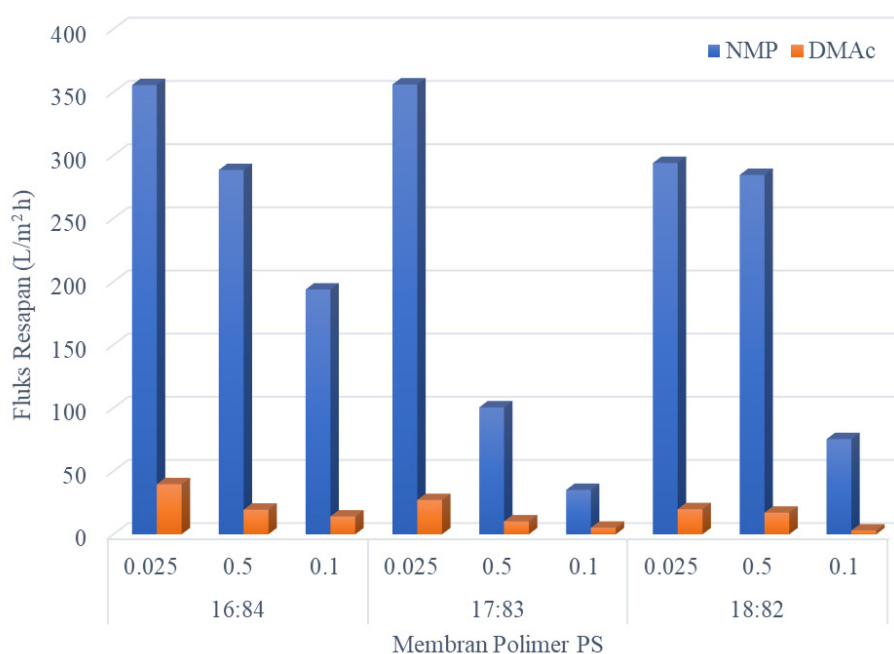
Saiz liang membran, ketebalan, keliangan dan tekanan operasi adalah faktor utama yang mempengaruhi fluks resapan membran. Kedua-dua jenis membran disintesis pada ketebalan yang sama dan beroperasi pada tekanan penapisan yang dikekalkan pada 3 bar, adalah jelas bahawa fluks resapan berkadar dengan diameter liang dan keliangan membran (Teow, Ghani & Mohammad 2018). Peningkatan saiz liang dan keliangan akan mendorong kepada peningkatan kadar penapisan kerana rintangan aliran yang lebih rendah. Ini membawa kepada peningkatan dalam fluks resapan kerana lebih banyak turasan dibenarkan untuk melepasi membran.

Walau bagaimanapun, fluks resapan berkurangan dengan peningkatan kepekatan TiO_2 dalam perumusan membran polimer PS, tanpa mengira jenis pelarut yang digunakan. Ini bercanggah dengan kebanyakan penemuan oleh penyelidik lain. TiO_2 secara amnya dapat meningkatkan hidrofilik dan rintangan kekotoran membran matriks campuran (Ahmad et al. 2022). Sebagai contoh, dalam kajian penapisan BSA, membran TiO_2 -PES menunjukkan sifat hidrofilik yang lebih tinggi dengan penambahan nanozarah TiO_2 , dengan membran TiO_2 -PES lebih mendorong molekul air berada pada permukaannya (Li et al. 2014). Pengurangan kebolehasahan permukaan membran dalam kajian ini disebabkan oleh sudut sentuhan yang tinggi, keliangan yang lebih rendah dan saiz liang yang lebih kecil akibat penyumbatan nanozarah TiO_2 pada kepekatan yang tinggi. Kebolehasahan permukaan membran yang rendah menyebabkan fluks resapan membran yang lebih rendah dengan penghalangan molekul air melalui membran tersebut.

PENYINGKIRAN ASID HUMIK

Di samping fluks resapan, prestasi membran polimer PS juga dinilai dari segi penolakan asid humik. Rajah 4 menggambarkan prestasi membran polimer PS yang disintesis dalam kajian ini dalam penolakan asid humik. Seperti yang ditunjukkan dalam rajah tersebut, adalah jelas bahawa keupayaan penolakan membran

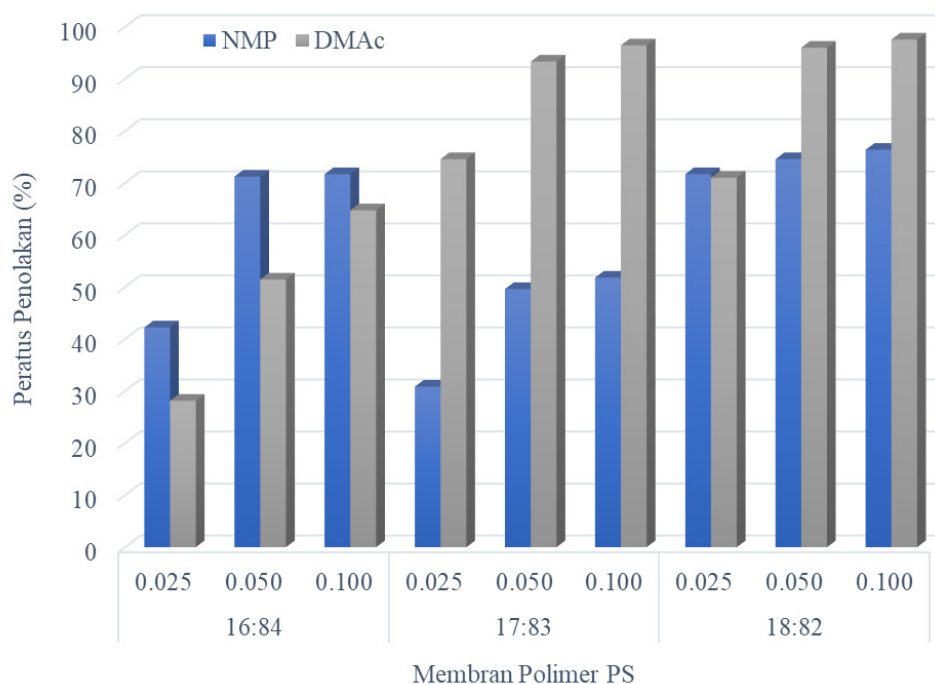
adalah berlawanan dengan fluks resapan membran. Ini bermakna, membran yang mempunyai fluks resapan yang lebih tinggi cenderung mempunyai keupayaan penolakan yang lebih rendah dan sebaliknya. Oleh itu, dapat dilihat bahawa membran yang disintesis menggunakan DMAc sebagai pelarut menunjukkan keupayaan penolakan yang lebih tinggi berbanding dengan yang menggunakan NMP sebagai pelarut. Selain itu, keupayaan penolakan membran juga meningkat dengan peningkatan kepekatan TiO_2 yang ditambahkan ke dalam larutan polimer membran. Membran M6(c) pada nisbah polimer: pelarut 18:82 dan kepekatan TiO_2 0.100 g/L menunjukkan keupayaan penolakan yang tertinggi. Hampir kesemua (97.56%) asid humik dalam larutan suapan yang disalurkan ke sistem penapisan membran telah disingkirkan dan berjaya menghasilkan air turasan yang bersih. Hal ini kerana membran yang disintesis menggunakan DMAc sebagai pelarut dan rumusan membran dengan kepekatan TiO_2 yang lebih tinggi cenderung menghasilkan membran polimer PS dengan saiz liang yang lebih kecil. Saiz liang yang lebih kecil ini menyebabkan asid humik dengan diameter zarahnya yang lebih besar daripada saiz liang tidak dapat melalui membran dengan sempurna, sehingga terhalang daripada menembusi matriks membran. Hanya molekul air dengan diameter zarahnya yang amat kecil sahaja dapat menembusi matriks membran untuk mencapai matlamat penyingkiran asid humik daripada air rawatan, yang pada akhirnya menghasilkan air turasan yang bersih.



RAJAH 3. Fluks resapan membran polimer PS

JADUAL 2. Pencirian membran polimer PS

Membran	Jenis pelarut	Nisbah berat pelarut (wt%)	Nisbah berat PS (wt%)	Kepekatan TiO ₂ (g/L)	Sudut sentuhan (°)	Keliangan (%)	Saiz liang (µm)
M1(a)	NMP	84	16	0.025	56.68 ± 3.871	64.35	7.04
M1(b)	NMP	84	16	0.050	66.77 ± 1.777	73.96	40.00
M1(c)	NMP	84	16	0.100	72.00 ± 6.000	23.11	26.00
M2(a)	NMP	83	17	0.025	63.93 ± 1.067	63.37	71.10
M2(b)	NMP	83	17	0.050	64.72 ± 4.498	40.61	73.10
M2(c)	NMP	83	17	0.100	69.95 ± 2.166	76.73	20.10
M3(a)	NMP	82	18	0.025	65.47 ± 1.160	22.67	66.00
M3(b)	NMP	82	18	0.050	68.69 ± 1.735	46.26	73.40
M3(c)	NMP	82	18	0.100	74.26 ± 7.508	57.06	66.30
M4(a)	DMAc	84	16	0.025	57.92 ± 3.802	38.96	16.50
M4(b)	DMAc	84	16	0.050	66.26 ± 1.399	50.45	14.80
M4(c)	DMAc	84	16	0.100	73.52 ± 1.627	61.54	23.70
M5(a)	DMAc	83	17	0.025	61.17 ± 0.241	62.93	9.54
M5(b)	DMAc	83	17	0.050	63.78 ± 0.521	10.58	41.20
M5(c)	DMAc	83	17	0.100	64.36 ± 1.858	71.06	6.08
M6(a)	DMAc	82	18	0.025	59.91 ± 1.889	43.24	6.28
M6(b)	DMAc	82	18	0.050	69.37 ± 0.833	60.39	98.50
M6(c)	DMAc	82	18	0.100	71.49 ± 2.127	63.26	14.40



RAJAH 4. Peratus penolakan membran polimer PS

KESIMPULAN

Penyelidikan ini mengkaji potensi penggunaan semula sisa plastik PS dalam sintesis membran polimer untuk rawatan air sisa. Dengan menggabungkan PS dengan nanozarah TiO_2 , membran hidrofilik yang berkesan dapat disintesis melalui kaedah penyongsangan fasa. Kajian ini menunjukkan bahawa penggunaan pelarut tertentu, seperti NMP atau DMAc, serta kepekatan TiO_2 , mempengaruhi sifat membran yang dihasilkan, termasuk fluks resapan dan keupayaan penolakan terhadap asid humik. Membran yang disintesis menggunakan NMP sebagai pelarut menunjukkan fluks resapan yang lebih tinggi, sementara DMAc memberikan keupayaan penolakan yang lebih tinggi terhadap asid humik. Penambahan TiO_2 meningkatkan sifat hidrofilik membran yang mendorong kepada penembusan molekul air melalui matriks membran, tetapi juga berpotensi mengurangkan fluks resapan jika kepekatan TiO_2 terlalu tinggi.

Secara keseluruhan, kajian ini menunjukkan potensi yang besar dalam penggunaan semula sisa plastik PS untuk pembuatan membran polimer untuk rawatan air sisa. Dengan pemahaman yang lebih mendalam tentang faktor yang mempengaruhi sifat membran, kita dapat memperbaiki reka bentuk membran untuk meningkatkan prestasi dalam aplikasi penapisan air. Ini memberikan sumbangan yang signifikan kepada usaha global dalam mengurangkan pencemaran plastik dan menyediakan sumber air yang bersih dan mampan. Dengan demikian, kajian ini memberi pandangan yang berharga kepada komuniti saintifik dan industri tentang potensi penggunaan semula sisa plastik untuk meningkatkan kelestarian alam sekitar dan penyediaan air bersih.

PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan penghargaan kepada Geran Universiti Penyelidikan (GUP-2023-032) dan Skim Geran Penyelidikan Fundamental (FRGS/1/2023/TK05/UKM/02/7) atas sokongan kewangan yang diberi untuk kajian ini.

RUJUKAN

- Ahmad, A.L., Che Lah, N.F., Norzli, N.A. & Pang, W.Y. 2022. A contrastive study of self-assembly and physical blending mechanism of TiO_2 blended polyethersulfone membranes for enhanced humic acid removal and alleviation of membrane fouling. *Membranes* 12(2): 162.
- Aljabri, N.M., Lai, Z., Hadjichristidis, N. & Huang, K.W. 2017. Renewable aromatics from the degradation of polystyrene under mild conditions. *Journal of Saudi Chemical Society* 21: 983-989.
- Geleta, T.A., Maggay, I.V., Chang, Y. & Venault, A. 2023. Recent advances on the fabrication of antifouling phase-inversion membranes by physical blending modification method. *Membranes* 13(1): 58.
- Hidalgo-Crespo, J., Coello-Pisco, S., Reyes-Venegas, H., Bermeo-Garay, M., Amaya, J.L., Soto, M. & Hidalgo-Crespo, A. 2022. Understanding citizens' environmental concern and their pro-environmental behaviours and attitudes and their influence on energy use. *Energy Reports* 8: 103-109.
- Ho, B.T., Roberts, T.K. & Lucas, S. 2017. An overview on biodegradation of polystyrene and modified polystyrene: The microbial approach. *Critical Reviews in Biotechnology* 38(2): 308-320.
- Ho, K.C., Raffi, S.M. & Teow, Y.H. 2022. Synthesis of MWCNTs/ TiO_2 photocatalytic nanocomposite membrane via *in-situ* colloidal precipitation method for methyl orange removal. *International Journal of Nanoelectronics & Materials* 15(3): 207-222.
- Jiang, P., Yu, Y. & Li, K. 2023. Hydrophilic TiO_2 @MWCNT/PVDF membrane for enhanced photodegradation of methyl orange in water. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures* 31(12): 1185-1191.
- Li, X., Fang, X., Pang, R., Li, J., Sun, X., Shen, J., Han, W. & Wang, L. 2014. Self-assembly of TiO_2 nanoparticles around the pores of PES ultrafiltration membrane for mitigating organic fouling. *Journal of Membrane Science* 467: 226-235.
- Plastic Collective 2024. <https://www.plasticcollective.co/the-plastic-waste-problem-and-its-solutions/#:~:text=Plastic%20waste%20is%20one%20of,the%20oceans%20around%20the%20world>
- Prabhakar, R.P., Sanket, S.S., Rauphunnisa, F.I. & Rahul, B.P. 2016. Impacts of thermocol waste on marine life: A review. *International Multidisciplinary Research Journal* 3(1): 60-68.
- Rosnan, N.A., Teow, Y.H. & Mohammad, A.W. 2018. The effect of ZnO loading for the enhancement of PSF/ZnO-GO mixed matrix membrane performance. *Sains Malaysiana* 47(9): 2035-2045.
- Teow, Y.H. 2016. Characterization and performance evaluation of ultrafiltration membrane for humic acid removal. *Indian Journal of Science and Technology* 9(22): 1-8.
- Teow, Y.H., Ghani, M.S.H. & Mohammad, A.W. 2018. Physical and chemical cleaning for nanofiltration/reverse osmosis (NF/RO) membranes in treatment of tertiary palm oil mill effluent (POME) for water reclamation. *Jurnal Kejuruteraan* 1(4): 51-58.
- Teow, Y.H., Ooi, B.S. & Ahmad, A.L. 2017. Study on PVDF- TiO_2 mixed-matrix membrane behaviour towards humic acid adsorption. *Journal of Water Process Engineering* 15: 99-106.
- Teow, Y.H., Ooi, B.S., Ahmad, A.L. & Lim, J.K. 2012. Mixed-matrix membrane for humic acid removal: Influence of different types of TiO_2 on membrane morphology and performance. *International Journal of Chemical Engineering and Applications* 3(6): 374-379.
- UN Environment Programme 2024. <https://www.unep.org/plastic-pollution>.

*Corresponding author; email: yh_teow@ukm.edu.my