

Membran Bersalut Lignin/CaCO₃ Bersepadu dengan Penyahaktifan UV untuk Penapisan Air dan Penyingkiran Patogen (Lignin/CaCO₃ Coated Membrane Integrated with UV Deactivation for Water Filtration and Pathogen Removal)

Sin Ling Chiam^a, A.J.K. Budiman^a, Chia-Huey Hong^a, C.P. Leo^{a*}, Kok Hwa Yu^b, Kin Sam Yen^b, Swee-Yong Pung^c, Chun Kiat Chang^d, Mou Leong Tan^e & Jiashen Teh^f

^aPusat Pengajian Kejuruteraan Kimia, Kampus Kejuruteraan,
 Universiti Sains Malaysia, 14300, Nibong Tebal, Penang, Malaysia.

^bPusat Pengajian Kejuruteraan Mekanikal, Kampus Kejuruteraan,
 Universiti Sains Malaysia, 14300, Nibong Tebal, Penang, Malaysia.

^cPusat Pengajian Kejuruteraan Bahan dan Sumber Mineral, Kampus Kejuruteraan,
 Universiti Sains Malaysia, 14300, Nibong Tebal, Penang, Malaysia.

^dPusat Penyelidikan Kejuruteraan Sungai dan Saliran Bandar (REDAC), Kampus Kejuruteraan,
 Universiti Sains Malaysia, 14300, Nibong Tebal, Penang, Malaysia.

^eGeoinformatic Unit, Geography Section, Pusat Pengajian Ilmu Kemanusiaan,
 Universiti Sains Malaysia, 11800 USM, Pulau Pinang, Malaysia.

^fPusat Pengajian Kejuruteraan Elektrik dan Elektronik, Kampus Kejuruteraan,
 Universiti Sains Malaysia, 14300, Nibong Tebal, Penang, Malaysia.

*Corresponding author: chcpleo@usm.my

Received 14 August 2024 ,Received in revised form 3 May 2025
 Accepted 3 June 2025, Available online 30 August 2025

ABSTRACT

The integration of lignin-coated membranes and ultraviolet (UV) inactivation provides an effective approach for enhanced water filtration and pathogen removal. In this study, a hydrophobic polyvinylidene fluoride (PVDF) hollow fiber membrane was coated with lignin and calcium carbonate nanoparticles to improve hydrophilicity and anti-fouling properties. The modified membrane demonstrated significantly enhanced performance, achieving an oil emulsion rejection rate of 95.97% and a flux of 63.87 L·m⁻²·h⁻¹, which was approximately twice that of the unmodified PVDF membrane. Additionally, calcium carbonate nanoparticles further improved the oil removal efficiency. To complement membrane filtration, UV treatment was employed for pathogen deactivation, targeting the nucleic acids of waterborne pathogens to inhibit their replication. The UV-treated water was evaluated in term of bacterial regrowth, revealing distinct differences between bacterial species. *Escherichia coli* exhibited higher photoreactivation rates (10.66%) under fluorescent light compared to dark conditions, whereas total coliforms showed even greater photoreactivation susceptibility (21%) under the same UV dosage (237 mJ/cm²). The integrated membrane-UV filtration system effectively eliminated up to 95% of *E. coli* from river water and significantly reduced turbidity. These findings highlight the potential of calcium carbonate-enhanced lignin coatings for membrane modification and underline the importance of understanding bacterial responses to UV disinfection in integrated water treatment systems.

Keywords: Membrane; lignin; disinfection; UV

*Integrasi membran bersalut lignin dengan rawatan penyahaktifan ultraviolet (UV) menyediakan pendekatan berkesan untuk penapisan air dan penyingkiran patogen. Dalam kajian ini, membran gentian berongga polivinilidena fluorida (PVDF) yang bersifat hidrofobik telah disalut dengan lignin dan nanopartikel kalsium karbonat yang bagi meningkatkan hidrofilisiti dan sifat anti-fouling. Membran terubah suai ini menunjukkan prestasi yang jauh lebih baik, dengan kadar penolakan emulsi minyak sebanyak 95.97% dan fluks sebanyak $63.87 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, iaitu kira-kira dua kali ganda berbanding membran PVDF yang tidak diubah suai. Tambahan nanopartikel kalsium karbonat juga meningkatkan lagi kecekapan membran dalam penyingkiran minyak. Bagi melengkapkan proses penapisan membran, rawatan UV digunakan untuk penyahaktifan patogen dengan menyasarkan asid nukleik patogen bawaan air untuk menghalang pembiakannya. Air yang dirawat UV diuji semula untuk pertumbuhan bakteria, dan keputusan menunjukkan perbezaan ketara antara spesies bakteria. *Escherichia coli* menunjukkan kadar pengaktifan semula yang lebih tinggi (10.66%) di bawah cahaya pendarfluor berbanding keadaan gelap, manakala koliform menunjukkan kadar pengaktifan semula lebih tinggi lagi (21%) pada dos UV yang sama (237 mJ/cm^2). Sistem bersepadu membran-UV ini berjaya menyingkirkan sehingga 95% *E. coli* dalam air sungai selain mengurangkan kekeruhan air secara signifikan. Penemuan ini menonjolkan potensi salutan lignin dengan tambahan kalsium karbonat bagi pengubahsuaian membran, serta menekankan kepentingan memahami tindak balas bakteria terhadap rawatan UV dalam sistem rawatan air bersepadu.*

Kata kunci: Membran; lignin; penyahjangkitan; UV

PENGENALAN

Dalam beberapa tahun kebelakangan ini, teknologi pemisahan membran telah menyaksikan kemajuan yang ketara, menawarkan kecekapan dan selektiviti pemisahan yang tinggi, menjadikannya bernilai untuk pelbagai aplikasi termasuk pemisahan gas (Bolonga & Saadb 2022; Liugè & Paliulis 2023). Polivinilidena fluorida (PVDF) menonjol sebagai polimer yang digunakan secara meluas untuk pembuatan serat berongga, disebabkan sifat separa kristalnya yang memberikan kestabilan terma dan fleksibiliti. Selain itu, PVDF menunjukkan ketahanan yang sangat baik terhadap pelbagai bahan kimia korosif dan sebatian organik, menjadikannya ideal untuk aplikasi dalam penyerapan gas dan pemisahan minyak-air menggunakan teknik berasaskan membrane (Feng et al. 2013; Low et al. 2010).

Seterusnya, loji rawatan air memberi keutamaan kepada pembasmian mikroorganisma dalam air untuk menghalang penyebaran penyakit berjangkit. Patogen yang muncul dari pelbagai sumber seperti kumbahan pertanian, industri, dan domestik membawa risiko kesihatan yang ketara. Kaedah penyahaktifan yang berkesan seperti klorinasi dan sinaran UV adalah penting dalam melindungi kualiti air dan kesihatan awam. Klorin biasanya digunakan untuk membunuh bakteria berbahaya, tetapi ia boleh menghasilkan produk sampingan yang toksik (Lee et al. 2015). Untuk menyelesaikan isu ini, penyelidik sedang mencari kaedah alternatif yang lebih selamat dan mampan bagi rawatan air tercemar.

Penyahaktifan UV telah muncul sebagai kaedah yang sangat berkesan untuk menginaktifkan mikroorganisma tanpa menghasilkan produk sampingan yang berbahaya

(Forés et al. 2023). Dengan mengganggu proses replikasi mikroorganisma melalui tindak balas fotokimia, sinaran UV merosakkan asid nukleik mikroorganisma, memastikan keselamatan air. Kajian terdahulu menunjukkan bahawa sistem rawatan air UV boleh mencapai kadar penyahaktifan melebihi 99.99% bagi bakteria seperti *E. coli* dalam air permukaan (Eurowater 2025). Dengan nilai pasaran global yang dijangka mencecah \$5.7 bilion menjelang 2027, sistem penyahaktifan UV diiktiraf kerana kecekapannya dalam sistem berskala besar (Ibrahim et al. 2021). Disebabkan tindakannya yang cepat dan kesan minima pada rasa serta bau air, penyahaktifan UV semakin digemari untuk aplikasi rawatan air.

Walau bagaimanapun, sinaran UV sahaja tidak mencukupi untuk membuang zarah terampai dan bahan cemar yang lebih kecil dalam air. Oleh itu, penyepaduan antara membran PVDF dan rawatan UV telah mendapat perhatian yang semakin meningkat dalam penyelidikan rawatan air (Arkema, 2025). Beberapa kaedah penyepaduan yang melibatkan membran dan pemangkin foto telah dilaporkan, termasuk pengadunann pemangkin foto seperti TiO_2 semasa membran sintesis untuk meningkatkan degradasi bahan pencemar organik di bawah sinaran UV (Rosaman et al. 2022). Selain itu, sistem UV-membran penurasan ultra telah menunjukkan keberkesanan dalam pengurangan mikroorganisma dan bahan pencemar kompleks dalam air sisa industri (Branch et al. 2024). Kajian telah menunjukkan bahawa membran PVDF yang diubah suai dengan bahan tambahan seperti lignin dan kalsium karbonat (CaCO_3) dapat meningkatkan sifat hidrofilik dan kecekapan penapisan (Szwast, Polak et al. 2022). Lignin, sebagai polimer semula jadi, mempunyai kumpulan hidroksil yang dapat meningkatkan interaksi dengan air dan mengurangkan pengotoran pada membran.

Manakala, CaCO_3 boleh bertindak sebagai agen pembentukan liang untuk meningkatkan kebolehtelapan air dalam sistem membran.

Objektif utama kajian ini adalah untuk menyiasat kesan lignin dan CaCO_3 terhadap kebolehtelapan dan sifat hidrofilik membran PVDF serat berongga. Kajian ini menganalisis pengaruh bahan-bahan ini terhadap prestasi membran dari segi aliran air dan interaksi kelembapan. Selain itu, penyelidikan ini menumpu kepada mekanisme inaktivasi *E. coli* dalam air, khususnya memeriksa proses pengaktifan dalam gelap dan foto. Selanjutnya, nilai praktikal membran PVDF yang diubah suai dan rawatan UV ditunjukkan dengan integrasi ke dalam sistem rawatan air. Penemuan kajian ini diharapkan dapat memberikan pandangan berharga untuk meningkatkan kaedah rawatan air demi mempromosikan kesihatan awam dan kelestarian alam sekitar.

METODOLOGI

BAHAN

Bahan yang digunakan dalam kajian ini termasuk membran gentian berongga PVDF (Dreame-SD-1010) yang diperoleh daripada Dreame Environmental Group Co. Ltd (USA) untuk penyediaan membran. Etanol (Merck, Darmstadt, Jerman) digunakan sebagai mandian koagulasi, manakala kalsium karbonat (diperoleh dari Merck) dimasukkan untuk meningkatkan saiz liang membran. Natrium hidroksida, yang juga diperoleh dari Merck, digunakan dalam penyediaan lignin yang kemudiannya diubah suai untuk aplikasi membran. Serbuk lignin diperoleh daripada Sigma Aldrich, dan memainkan peranan penting dalam pengubahsuaian membran. Selain itu, minyak masak jagung (ACH Food Companies, Inc) digunakan untuk penyediaan emulsi minyak, manakala Tween 80 (Merck, Darmstadt, Jerman) ditambah untuk memastikan kestabilan emulsi minyak sepanjang eksperimen.

PENGUBAHSUAIAN MEMBRAN

Sebanyak 23 batang membran serat berongga PVDF telah disusun dan diikat bersama sebelum direndam dalam larutan etanol selama 30 min. Membran selanjutnya diubah suai melalui kaedah salutan permukaan. Larutan lignin 0.75 g/L digunakan untuk memberikan prestasi pemisahan yang baik. Salutan yang stabil boleh dibentuk selepas merendam membran ke dalam larutan lignin dan membilasnya dengan air. Larutan lignin disediakan dengan melarutkan lignin ke dalam larutan NaOH (0.5%).

Sebanyak 3% zarah nano CaCO_3 ditambah, dan campuran dikacau dengan kelajuan 400 rpm untuk memastikan larutan lengkap. Membran PVDF diubah suai dengan merendam sepenuhnya ke dalam larutan lignin selama 1 hari. Membran PVDF yang diubah suai lignin dibilas dengan air dan dikeringkan selama 24 jam sebelum disimpan untuk pencirian dan penapisan. Sampel ini ditetapkan sebagai Lig-CC-3.0.

KAJIAN PRESTASI PEMISAHAN DAN KEBOLEHTELAPAN

Campuran minyak-air disediakan pada nisbah isipadu 1:100 dengan menggunakan minyak masak dan air suling. Sebanyak 0.5 mg/L Tween 80 ditambah untuk membentuk emulsi stabil melalui rawatan ultrasonik selama 15 min untuk menghasilkan emulsi minyak homogen. Penyingkiranminyak, R kemudian dikira menggunakan:

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

di mana C_p dan C_f ialah kepekatan minyak dalam larutan penapis dan suapan (g/L), masing-masing. Kepekatan minyak dalam sampel penapis ditentukan menggunakan spektrofotometer UV-nampak (Genesys 20, Thermo Fisher Scientific) pada 225 nm. Fluks tapisan membran ditentukan dengan menyediakan modul membran yang mempunyai penutupan atas satu hujung membran serat berongga. Setiap membran diuji dalam julat tekanan 1 bar dan berat tapisan direkodkan setiap 5 min selama 1.3 jam. Fluks penapis, J ($\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) dikira menggunakan formula:

$$J = \left(\frac{V}{A \times t}\right) \quad (2)$$

di mana V ialah isipadu penapis, A ialah kawasan efektif membran, dan t ialah masa penapisan.

PENGUMPULAN AIR SUNGAI

Sampel air sungai dikumpulkan dari Sungai Kerian dalam bekas plastik steril 1L dengan menahannya di bawah permukaan air sebelum menanggalkan penutup untuk mengelakkan pengumpulan skum permukaan. Sekurang-kurangnya 2.5 cm ruang udara dibiarkan dan bekas dilabel menggunakan penanda kalis air untuk analisis segera.

SISTEM PENYAHAKTIFAN UV

Sistem ini terdiri daripada lampu UV kuman wap merkuri tekanan rendah 13-W (VIPSUN UV-KT, China) yang berukuran 24×1.9 cm, dan memancarkan sinaran UV monokromatik pada 254 nm. Untuk memperolehi sinaran UV yang berkesan, perumahan untuk lampu UV dibina menggunakan kotak kadbod dengan tiub sepanjang 72 cm yang memanjang dari lubang yang dipotong di tengah panjang lengkungan lampu dan dijalankan pada suhu bilik ($27 \pm ^\circ\text{C}$). Kemudian, 30 ml sampel air dirawat pada jarak 10 cm dari sumber UV dengan masa pendedahan penyinaran 0, 30, 60, 90, 120, dan 180 s. Selepas penyinaran, bikar ditutup untuk mengelakkan penembusan cahaya lanjut. Kadar fluens diukur dengan radiometer dan dos UV yang diperoleh dikira menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Dos UV} = \text{Kadar fluens} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) \text{Masa dedahan (s)} \quad (3)$$

PENGAKTIFAN DALAM CAHAYA DAN GELAP

Selepas penyinaran UV, sampel digunakan untuk pengaktifan dalam cahaya dan gelap. Untuk proses pengaktifan semula foto, 7 ml sampel diletakkan di bawah satu lampu pendarfluor (lampu pendarfluor cahaya putih, 20 W) selepas penyinaran UV. Keamatan cahaya lampu pendarfluor diukur sebagai 450 Lux (meter cahaya digital Kyoritsu, model 5202, Taiwan). Bagi penyelidikan pengaktifan gelap, 7 ml sampel yang sama diletakkan dan dibalutkan. Pengumpulan sampel dilakukan setiap 1 jam untuk pengaktifan cahaya dan gelap selama 4 jam. Semua sampel dikacau secara magnetik sepanjang eksperimen pada suhu bilik. Untuk menilai kesan pengaktifan semula foto, peratusan pengaktifan foto dikira menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Peratusan pengaktifan foto} = \left(\frac{N_p - N}{N_0 - N} \right) \times 100\% \quad (4)$$

di mana N_p adalah bilangan sel sampel yang diaktifkan semula (CFU/mL), N adalah kelangsungan hidup segera selepas penyahjangkitan UV (CFU/mL) dan N_0 adalah bilangan sel sebelum penyahjangkitan UV (CFU/mL).

PENGIRAAN BAKTERIA

Selepas penyinaran oleh sistem UV-LED, setiap sampel sebanyak 1 mL diukur menggunakan pipet dan dititis terus ke atas permukaan Plat 3M Petrifilm. Sampel disebar secara merata sebelum gel terbentuk. Kultur diinkubasi selama 24 jam pada 37°C dengan penutup hadapan menghadap ke atas. Jumlah koliform akan muncul sebagai koloni merah dengan gas dan *E. coli* (koloni biru dengan gas) dikira. Inaktivasi mikroorganisma biasanya dijelaskan oleh log inaktivasi N , CFU/mL menggunakan persamaan berikut.

$$\log \text{ inaktivasi } N = \log \left(\frac{N_0}{N} \right) \quad (5)$$

di mana N_0 dan N adalah kepekatan mikrob sebelum dan selepas masa kontak, t , masing-masing. Dalam menentukan kadar inaktivasi malar, k (cm^2/mJ) bagi *E. coli*, regresi linear digunakan untuk menyesuaikan bahagian linear lengkung inaktivasi log menggunakan persamaan berikut.

$$\frac{N}{N_0} = 10^{-kF_N} \quad (6)$$

di mana F_N adalah fluens yang diperlukan untuk menyebabkan inaktivasi log- N .

SISTEM PENAPISAN DAN PENYAHJANGKITAN AIR BERSEPADU

Sampel air dari Sungai Kerian kemudian diuji dalam masa penyahaktifan UV yang berbeza, T1 (1 jam), T2 (3 jam) dan T3 (5 jam). Lampu LP (tekanan rendah) Vipsun UV 13 watt dipasang dalam system bersepadu membran-UV. Sistem bersepadu ini mengandungi 3 kotak terbuka berukuran $25 \times 10 \times 10$ cm yang dipasang dengan membran and lampu UV. Membran dipasang dalam kotak kedua, selepas kotak suapan. Lampu UV germisidal yang dipasang pada penutup atas kotak terbawah, berjarak 5 cm dari paras air. Air sungai ditapiskan melalui membran PVDF serat berongga sebelum terdedah kepada sinaran UV untuk penyahaktifan mikroorganisma. Rajah 1 menunjukkan reka bentuk sistem bersepadu membran-UV. Sebanyak 8 L air sungai ditapis menggunakan sistem ini dan dikumpulkan di saluran keluar selepas rawatan UV. Untuk pencirian air, pH, kekeruhan, *E. coli* dan jumlah koliform diperiksa sebelum dan selepas penyahaktifan dan hasilnya dibandingkan dengan piawaian air minuman.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

PENCIRIAN MEMBRANE

Spektrum FTIR bagi membran PVDF, PVDF-Lig dan PVDF-Lig-CC-3.0 dikumpulkan dalam Rajah 2. Semua sampel membran PVDF menunjukkan jalur berkaitan dengan getaran wagging CH_2 dalam julat $1560\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ serta regangan C-F dalam julat $1170\text{--}1185\text{ cm}^{-1}$. Salutan lignin tidak menyebabkan perubahan ketara dalam spektrum FTIR bagi membran PVDF yang disalut dengan lignin pada kepekatan 7.5 g/L dalam larutan NaOH yang berpekatan 5 g/L . Walau bagaimanapun, perubahan kecil dalam intensiti transmittan diperhatikan dengan penambahan CaCO_3 . Dengan penambahan CaCO_3 , puncak karbonat yang khas sekitar $\sim 1430\text{ cm}^{-1}$ (regangan asimetri CO_3^{2-}) menjadi lebih jelas. Puncak ini mengesahkan bahawa CaCO_3 dalam lignin telah berjaya melekat pada permukaan membran (Santos, Leong et al. 2024). Selain meresap ke dalam liang membran PVDF, lignin dengan kumpulan hidroksil ($-\text{OH}$) yang banyak dapat membentuk ikatan hidrogen dengan atom fluorin ($-\text{F}$) dalam PVDF.

PRESTASI PEMISAHAN DAN KEBOLEHTELAPAN

Kebolehtelapan air bagi membran PVDF yang diubah suai lignin telah ditentukan. Membran PVDF tulen perlu digabungkan dengan enam lapisan penapisan untuk merawat air saliran dalam kajian sebelumnya (Ho et al. 2024). Seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 1, PVDF-Lig menolak 77.06% emulsi minyak. Rajah 3 menggambarkan perubahan dalam sampel minyak air daripada suapan berwarna susu (a) kepada tapisan lebih jernih (b). Selepas memasukkan CaCO_3 , PVDF Lig-CC-3.0 mencapai penolakan emulsi minyak sebanyak 95.97% ; seperti yang digambarkan dalam Rajah 1 di mana suapan berwarna susu (a) berubah menjadi jernih (c). Dalam kajian ini, pengubahsuaian membran PVDF dengan lignin dan CaCO_3 telah meningkatkan kecekapan penapisan dengan ketara, membolehkan penolakan emulsi minyak sehingga 95.97% . Emulsi minyak tidak dapat dikurangkan tanpa pengubahsuaian. Dalam Rajah 4, PVDF-Lignin-CC-3.0 menunjukkan kebolehtelapan air yang lebih menjanjikan berbanding PVDF Lignin, dengan fluks sebanyak $63.87\text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Kestabilan dicapai selepas 45 min melalui penapisan secara graviti. Sifat hidrofilik lignin dan CaCO_3 menyumbang kepada peningkatan penyerapan air. Penambahan lignin dan CaCO_3 meningkatkan prestasi membran dengan ketara. Lignin meningkatkan hidrofilisiti melalui kumpulan fungsi hidroksil ($-\text{OH}$) dan karboksil ($-\text{COOH}$), sekali gus mengurangkan pengotoran minyak pada membran. Selain itu, CaCO_3 bertindak sebagai agen

pembentukan liang yang dapat mengoptimumkan saiz liang, meningkatkan fluks air, dan memperbaiki kecekapan penolakan minyak. Gabungan lignin dan CaCO_3 menghasilkan prestasi pemisahan minyak/air yang lebih baik, selari dengan kajian terdahulu (Choi, Dalton et al. 2024; Zhang, Miao et al. 2024). Hou et al. (2014) memerhatikan trend yang serupa, dengan peningkatan fluks penapis dengan penambahan CaCO_3 , walaupun CaCO_3 yang berlebihan boleh mengurangkan fluks (Hou et al. 2014). Saki dan Uzal (2018) mengesahkan bahawa penambahan CaCO_3 juga meningkatkan kadar penolakan minyak (Saki & Uzal, 2018).

PENYAHAKTIFAN UV DAN PENGAKTIFAN SEMULA

Lengkung penyahaktifan untuk *E. coli* dan jumlah koliform oleh lampu LP telah ditentukan untuk tiga sampel air sungai. Keupayaan penyahaktifan dan dos UV menunjukkan trend yang serupa untuk kedua-dua *E. coli* dan jumlah koliform. Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5, dos UV meningkat dari 1 hingga 9 mJ/cm^2 , nilai log penyahaktifan meningkat secara linear. Bagi *E. coli*, keupayaan penyahaktifan UV bertambah baik dengan peningkatan intensiti dan masa penyinaran, mencapai maksimum 1.5 log penyahaktifan pada 8.41 mJ/cm^2 .

Rajah 6 dan 7 membandingkan pengurangan log *E. coli* dan jumlah koliform selepas rawatan UV dengan tahap pengaktifan dalam cahaya dan gelap sehingga 240 min. Jumlah koliform lebih sukar untuk dinyahaktifkan tetapi lebih mudah untuk diaktifkan semula, dengan 10.66% pengaktifan semula untuk *E. coli* dan 21% untuk jumlah koliform pada 237 mJ/cm^2 . Sementara itu, pengaktifan gelap menunjukkan pemulihan minima bagi kedua-dua bakteria. Pengurangan log inaktivasi hanya meningkat dari 0.31 hingga 1.26 log_{10} , menunjukkan kerosakan yang tidak boleh dipulihkan. Kerosakan kepada enzim pembaikan dipengaruhi oleh penyerapan UV pada panjang gelombang di bawah 230 nm , dengan keadaan gelap menghalang pengaktifan. Keputusan ini adalah serupa dan sebanding dengan hasil kajian yang dijalankan oleh Zimmer dan Slawson, (2002) di mana setiap sampel menunjukkan peningkatan dalam pengaktifan selepas pendedahan kepada cahaya pengaktifan semula manakala sampel yang diinkubasi dalam gelap menunjukkan pengaktifan terhad atau tiada (Zimmer & Slawson, 2002). Zimmer dan Slawson, (2002) juga melaporkan bahawa lebih banyak enzim diperlukan untuk membaiki DNA yang rosak dalam keadaan gelap, kerana tiada cahaya diserap untuk memproses prosedur pembaikan. Oleh itu, hanya sedikit bakteria yang boleh diperbaiki untuk hidup selepas pembaikan gelap (Zimmer & Slawson 2002). Nelson et al.

(2018) turut mencapai kesimpulan yang serupa dan mengukuhkan keputusan kajian ini bahawa mekanisme pengaktifan semula bakteria selepas rawatan UV dipengaruhi oleh kehadiran cahaya, manakala keadaan gelap menghadkan proses pemulihan mikroorganisma.

SISTEM PENAPISAN DAN PENYAHJANGKITAN AIR BERSEPADU

Sistem rawatan terdiri daripada penapisan menggunakan membran PVDF yang diubah suai dan rawatan UV. Sampel sungai dialirkan melalui PVDF Lig-CC-3.0 dan didedahkan kepada rawatan UV dalam masa yang berbeza untuk mencapai penulenan air yang komprehensif.

Nilai pH adalah parameter kualiti yang penting adalah mencerminkan keasidan dan kealkalian air. Kebanyakan hidupan akuatik dalam sungai berhidup dalam julat pH yang kecil (6-9). Sebelum rawatan, pH air sungai adalah pH 6.58. Selepas melalui sistem penapisan dan penyahjangkitan air, pH meningkat kepada kira-kira pH 7.49 dalam efluen seperti dalam Jadual 2. Membran boleh mengeluarkan CO_2 terlarut, membentuk ion karbonat dan bikarbonat, yang menyumbang kepada kealkalian (Kusworo, Ismail et al. 2017). Rawatan UV juga memecahkan asid organik, mengalihkan pH ke arah kealkalian (Avisar, Lester et al. 2010). Penapisan dan rawatan UV yang digabungkan memberi tumpuan kepada penyingkiran kekotoran dan pembasmian kuman tetapi mungkin secara tidak langsung mengalihkan pH ke julat neutral yang diinginkan, memenuhi piawaian kualiti air.

Kekeruhan adalah parameter kritikal dalam rawatan air, menunjukkan sejauh mana cahaya tersebar atau diserap oleh zarah dalam air. Kekeruhan tinggi menandakan kehadiran zarah yang digantung, yang mungkin mengandungi mikroorganisma atau bahan kimia berbahaya. Jadual 1 menunjukkan kekeruhan sebelum rawatan ialah 42.02 NTU. Pengurangan ketara dalam kekeruhan diperhatikan selepas rawatan, jatuh kepada 4.92 NTU.

Dos UV meningkat, mengurangkan kekeruhan dengan mengeluarkan sedimen dan kekotoran. Peratusan penyingkiran kekeruhan adalah 88.29%. Penapisan, menggunakan membran PVDF berongga, seterusnya mengeluarkan zarah pepejal, meningkatkan kejelasan air. Jordan et al. (2008) menggunakan penapisan dan penyahjangkitan UV yang serupa untuk rawatan air hujan, mencapai pengurangan kekeruhan kepada 5.0 NTU, di bawah piawaian air minuman (Jordan et al. 2008). Rawatan UV secara tidak langsung mengurangkan kekeruhan dengan menasaskan dan menyahaktifkan mikroorganisma yang dikaitkan dengan zarah yang digantung. Sinaran UV memecahkan sebatian organik dan mikroorganisma,

mengurangkan bahan organik dan kekeruhan. Rawatan UV secara berkesan menyahjangkitkan air dengan menyahaktifkan mikroorganisma, termasuk bakteria, virus, dan parasit, mengurangkan zarah biologi dan kekeruhan. Keputusan ini seiring dengan literatur semasa, menunjukkan pengurangan kekeruhan yang berkesan dalam air yang dirawat, lebih rendah daripada yang biasanya dilaporkan untuk air minuman di Malaysia.

Penyingkiran *E. coli* adalah penting untuk memastikan keselamatan dan kebolehtelapan air. Dalam kajian ini, *E. coli* dikira menggunakan plat Petri film untuk menentukan CFU/mL dalam sampel air sungai. Dalam Rajah 8 nilai log penyahaktifan meningkat secara linear dengan dos UV daripada 87 hingga 262 mJ/cm^2 . Berbanding dengan jumlah koliform, rawatan UV lebih berkesan terhadap *E. coli*. Peratusan penyingkiran sebanyak 94.55% untuk *E. coli* dan 52.78% untuk jumlah koliform diperolehi. Membran PVDF yang telah diubahsuai dengan ketara menyingkirkan bakteria, termasuk *E. coli* dan jumlah koliform, dengan menahan bakteria dengan saiz liang yang kecil dan mengganggu penumbuhan bakteria dengan permukaan lignin yang mempunyai ciri-ciri antibakteria. Sementara itu, rawatan UV mengganggu proses replikasi mikroorganisma melalui degradasi asid nukleik. Kajian ini menunjukkan bahawa penyepaduan membran PVDF bersalut Lignin/ CaCO_3 dengan rawatan UV meningkatkan keberkesanan penapisan air dan penyingkiran patogen. Perbandingan dengan kajian terdahulu oleh Ghobadi dan Hemmati (2023) dan Wu et al. (2013) menunjukkan bahawa gabungan teknologi membran dan UV secara umumnya memberikan prestasi yang lebih baik berbanding rawatan UV atau membran secara berasingan. Kajian oleh Armin and Alireza (2023) menilai penggunaan membran PVDF yang diubah suai dengan GO dalam rawatan air sisa dan mendapati bahawa sinaran UV dapat meningkatkan sifat hidrofilik serta daya tahan membran terhadap pengotoran. Walaupun kajian ini menggunakan Lignin/ CaCO_3 berbanding GO, kedua-dua pendekatan menunjukkan bahawa kombinasi UV dan membran berpotensi untuk meningkatkan kualiti air terawat dengan lebih berkesan.

KESIMPULAN

Kehadiran CaCO_3 dalam salutan lignin pada permukaan membran PVDF meningkatkan porositi dan kebolehtelapan disebabkan oleh saiz liang yang diperbesarkan dan sifat hidrofilik, menyebabkan peningkatan penyerapan dan penyerapan air. Membran yang diubah suai menunjukkan penyingkiran minyak yang sangat baik sebanyak 95.97%, menghasilkan air jernih daripada suapan berwarna susu.

Keberkesanan penyahaktifan UV meningkat dengan intensiti dan masa penyinaran, mencapai 1.5-log10 penyahaktifan *E. coli* pada 8.41 mJ/cm². *E. coli* menunjukkan kepekaan UV yang lebih tinggi berbanding jumlah koliform (TC), dengan kadar penyahaktifan yang lebih tinggi dan tahap pengaktifan semula foto yang lebih rendah. Sementara keadaan gelap tidak memberikan bantuan yang signifikan kepada pemulihan mikroba. Apabila digabungkan ke dalam sistem penapisan dan penyahaktifan air, 94.6% daripada *E. coli* dapat dikurangkan dengan nilai 261 mJ/cm² dicapai. Nilai pH selepas rawatan kekal dalam julat piawai, tidak melebihi 8.0. Kekeruhan menurun dengan ketara dari 42 hingga 4 NTU selepas 3 jam pendedahan UV, menunjukkan penyingkiran zarah terampai yang berkesan. Kerja ini menonjolkan gabungan membran PVDF/lignin/CaCO₃ dan rawatan UV untuk penulenan air yang berkesan, menangani parameter kritikal seperti porositi, kebolehtelapan, penyahaktifan kuman untuk peningkatan kualiti air.

PENGHARGAAN

Kajian ini juga merupakan hasil daripada ASEAN IVO (http://www.nict.go.jp/en/asean_ivo/index.html) projek, Sistem IoT untuk Penggunaan Semula Air di Bandar Membangun, dan disokong kewangan oleh NICT (<http://www.nict.go.jp/en/index.html>).

PENGISYTIHARAN MINAT BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Arkema. Drinking water: An efficient membrane filtration. *Arkema Webzine*. Dicapai Februari 28, 2025. <https://www.arkema.com/usa/en/webzine/post/drinking-water-an-efficient-membrane-filtration/>
- Avisar, D., Lester, Y., & Mamane, H. 2010. pH induced polychromatic UV treatment for the removal of a mixture of SMX, OTC and CIP from water. *Journal of Hazardous Materials* 175(1-3): 1068-1074.
- Branch, A., Sail, H., Whynman, D., & Hugaboom, D. 2024. Precision in practice: Water quality optimization for ultrafiltration plant efficiency. *Proceedings of the Water Environment Federation Technical Exhibition and Conference (WEFTEC)*. New Orleans, LA.
- Bolonga, N., & Saadb, I. 2022. Optimizing Fabrication of electrospinning nanofiber membranes for water filtration using response surface methodology. *Jurnal Kejuruteraan*, 34(5), 975-982.
- Choi, H., et al. 2024. The impacts of CaCO₃ deposition in natural wood on its viscoelastic properties. *Composites Part B: Engineering* 275: 111324.
- Eurowater. UV Water Disinfection. Dicapai Februari 28, 2025. <https://www.eurowater.com/en/water-treatment-plants/uv-disinfection>.
- Feng, C., Khulbe, K., Matsuura, T., & Ismail, A. 2013. Recent progresses in polymeric hollow fiber membrane preparation, characterization and applications. *Separation and Purification Technology* 111:43-71.
- Forés, E., Mejías-Molina, C., Ramos, A., Itarte, M., Hundesa, A., Rusiñol, M., Martínez-Puchol, S., Esteve-Bricullé, P., Espejo-Valverde, A., & Sirés, I. 2023. Evaluation of pathogen disinfection efficiency of electrochemical advanced oxidation to become a sustainable technology for water reuse. *Chemosphere* 313: 137393.
- Ghobadi Moghadam, A., & Hemmati, A. 2023. Improved water purification by PVDF ultrafiltration membrane modified with GO-PVA-NaAlg hydrogel. *Scientific Reports* 13(1): 8076.
- Ho, N.A.D., Leo, C.P., Ta, A.T., & Nguyen, T.Q. 2024. From drainage to resource: a practice approach to reuse greywater for household irrigation purposes, *Water Practice and Technology*, 19(2): 311-323.
- Hou, D., Dai, G., Fan, H., Wang, J., Zhao, C., & Huang, H. 2014. Effects of calcium carbonate nano-particles on the properties of PVDF/nonwoven fabric flat-sheet composite membranes for direct contact membrane distillation. *Desalination* 347: 25-33.
- Ibrahim, Y., Ouda, M., Kadadou, D., Banat, F., Naddeo, V., Alsafar, H., Yousef, A. F., Barceló, D., & Hasan, S. W. 2021. Detection and removal of waterborne enteric viruses from wastewater: a comprehensive review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4): 105613.
- Jordan, F., Seaman, R., Riley, J., & Yoklic, M. 2008. Effective removal of microbial contamination from harvested rainwater using a simple point of use filtration and UV-disinfection device. *Urban Water Journal* 5(3): 209-218.
- Kusworo, T. D., Ahmad Fauzi, I., Nita, A., Widayat, Qudratun, Dani Puji, U. 2017. Enhanced anti-fouling behavior and performances of nano hybrid PES-SiO₂ and PES-ZnO membranes for produced water treatment. *Jurnal Teknologi* 79(6): 129-140.
- Lee, O.-M., Kim, H. Y., Park, W., Kim, T.-H., & Yu, S. 2015. A comparative study of disinfection efficiency and regrowth control of microorganism in secondary wastewater effluent using UV, ozone, and ionizing irradiation process. *Journal of hazardous Materials* 295: 201-208.

- Liugè, M., & Paliulis, D. 2023. Experimental studies on the removal of textile dye of Naphthol green B from artificially contaminated water using Purolite MB400 ion exchange resin. *Jurnal Kejuruteraan*, 35(2): 523-527.
- Low, B. T., Widjojo, N., & Chung, T. S. 2010. Polyimide/polyethersulfone dual-layer hollow fiber membranes for hydrogen enrichment. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 49(18): 8778-8786.
- Nelson, K. L., Boehm, A.B., Davies-Colley, R.J., Dodd, M.C., Kohn, T., Linden, K. G., Liu, Y., Maraccini, P.A., McNeill, K., Mitch, W.A., Nguyen, T.H., & Parker, K.M. 2018. Sunlight-mediated inactivation of health-relevant microorganisms in water: A review of mechanisms and modeling approaches. *Environmental Science: Processes & Impacts* 20(8): 1089-1122.
- Rosman, N., Salleh, W. N. W., Jaafar, J., Harun, Z., Ismail, A. F., Ismail, N. H., Ahmad, S.Z.N., Mohd Razali, N.A., & Awang, N. A. 2022. Photocatalytic PVDF ultrafiltration membrane incorporated with visible-light driven ternary heterojunction: Pure water flux behavior. *AIP Conference Proceedings* 2610(1): 040004.
- Saki, S., & Uzal, N. 2018. Preparation and characterization of PSF/PEI/CaCO₃ nanocomposite membranes for oil/water separation. *Environmental Science and Pollution Research* 25: 25315-25326.
- Santos, G. M., Leong, C.A., Grootes, P.M., Seiler, M., Svarva, H., & Nadeau, M.J. 2024. Radiocarbon step-combustion oxidation method and FTIR analysis of trondheim CaCO₃ precipitates of atmospheric CO₂ samples: Further investigations and insights. *Radiocarbon* 66(5): 1289-1301.
- Szwast, M., Polak, D., Arciszewska, W., & Zielińska, I. 2022. Novel PVDF-PEG-CaCO₃ membranes to achieve the objectives of the water circular economy by removing pharmaceuticals from the aquatic environment. *Membranes* 13(1): 44.
- Wu, H., Mansouri, J., & Chen, V. 2013. Silica nanoparticles as carriers of antifouling ligands for PVDF ultrafiltration membranes. *Journal of Membrane Science* 433: 135-151.
- Zhang, Y., Miao, Y., Han, W., Cai, Y., Wang, E., Huang, J., & Zhang, W. 2024. Construction of lignin/CaCO₃/CS superhydrophobic coating with excellent heat resistance, abrasion resistance, UV resistance and oil-water separation. *Progress in Organic Coatings* 188: 108256.
- Zimmer, J., & Slawson, R. 2002. Potential repair of *Escherichia coli* DNA following exposure to UV radiation from both medium-and low-pressure UV sources used in drinking water treatment. *Applied and Environmental Microbiology* 68(7): 3293-3299.