

RESEARCH ARTICLE

Synthesis of Nanofiltration Membrane with Silica Variation for Waste Water Reduction

(Sintesis Membran Nanofiltrasi dengan Variasi Kitosan-Silika untuk Aplikasi Pengurangan Limbah Cair)

Fadly Abdul Malik, Muhammad Fahmi Hakim^{*}, Teguh Pambudi

*Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang,
Jl. HS. Ronggowaluyo, Telukjambe Timur, Karawang 41363, Jawa Barat, Indonesia*

ABSTRACT

Rapid industrial development in Indonesia is accompanied by an increase in liquid waste, especially those containing heavy metals such as Lead (Pb), becoming a serious problem for the environment. Based on PermenLHK regulation No. 5 of 2014, TDS and pH levels of industrial waste must meet certain standards. To overcome this, this research aims to develop chitosan-silica-based nanofiltration membranes modified with Polyvinyl Alcohol (PVA) and Polyethylene Glycol (PEG) to efficiently reduce Pb ion content. Chitosan was chosen due to its environmentally friendly nature and adsorption ability, while the addition of silica aims to improve membrane stability. The membrane synthesis method involves sol-gel process with Tetraethyl Orthosilicate (TEOS) precursor, mixing of chitosan, PVA, and PEG, as well as membrane printing and drying. Characterization was performed using FTIR for functional group analysis, BET to measure surface area and porosity, and swelling test to evaluate water absorption capacity. The results showed that the chitosan-silica membrane was successfully formed with a porous structure according to nanofiltration characteristics (pore size 0.0005-0.005 μm). The results showed that in the FTIR test, the 3261-3289 cm^{-1} region formed a silanol group (Si-OH) so that it could bind to metal ions. In the 1415-1416 cm^{-1} region is the absorption of C-H. In the 1241-1252 cm^{-1} region is the absorption of Si-O symmetry of Si-O-Si. FTIR analysis confirmed the presence of silanol (Si-OH) and siloxane (Si-O-Si) groups that play a role in metal ion adsorption. BET tests revealed that the membrane had a specific surface area and micro pores, while swelling tests showed an increase in hydrophilicity with the addition of siloxane.

Perkembangan industri yang pesat di Indonesia diiringi dengan peningkatan limbah cair, terutama yang mengandung logam berat seperti Timbal (Pb), menjadi masalah serius bagi lingkungan. Berdasarkan peraturan PermenLHK No. 5 tahun 2014, kadar TDS dan pH limbah industri harus memenuhi standar tertentu. Untuk mengatasi hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan membran nanofiltrasi berbasis kitosan-silika yang dimodifikasi dengan Polivinil Alkohol (PVA) dan Polietilen Glikol (PEG) untuk menurunkan kandungan ion Pb secara efisien. Kitosan dipilih karena sifatnya yang ramah lingkungan dan kemampuan adsorpsinya, sedangkan penambahan silika bertujuan untuk meningkatkan stabilitas membran. Metode sintesis membran melibatkan proses sol-gel dengan prekursor Tetraetil Ortosilikat (TEOS), pencampuran kitosan, PVA, dan PEG, serta pencetakan dan pengeringan membran. Karakterisasi dilakukan dengan menggunakan FTIR untuk analisis gugus fungsi, BET untuk mengukur luas permukaan dan porositas, serta uji swelling untuk mengevaluasi kapasitas penyerapan air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa membran kitosan-silika berhasil dibentuk dengan struktur berpori sesuai dengan karakteristik nanofiltrasi (ukuran pori 0,0005-0,005 μm). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada uji FTIR, pada daerah 3261-3289 cm^{-1} terbentuk gugus silanol (Si-OH) sehingga dapat mengikat ion logam. Pada daerah 1415-1416 cm^{-1} merupakan serapan C-H. Pada daerah 1241-1252 cm^{-1} merupakan serapan Si-O simetri Si-O-Si. Analisis FTIR mengkonfirmasi adanya gugus silanol (Si-OH) dan siloksan (Si-O-Si) yang berperan dalam adsorpsi ion logam. Uji BET menunjukkan bahwa membran memiliki luas permukaan spesifik dan pori-pori mikro, sementara uji swelling menunjukkan peningkatan hidrofilisitas dengan penambahan siloksan.

Keywords: Chitosan, Silica, Nanofiltration Membrane, Polyvinyl Alcohol, Polyethylene, Glycol.

^{*}Corresponding author:
Muhammad Fahmi Hakim
E-mail: muhammad.fahmi@ft.unsika.ac.id

PENDAHULUAN

Perkembangan industri di Indonesia terus mengalami peningkatan yang cukup pesat hal ini didasari oleh pertumbuhan populasi yang berkembang signifikan setiap tahunnya, sehingga industri di Indonesia terus dikembangkan untuk meningkatkan ekonomi dan menyejahterakan masyarakat. Namun, dibalik peningkatan jumlah industri dapat menimbulkan pencemaran lingkungan apabila limbah dari industri yang tidak ditangani dengan benar. Pencemaran limbah merupakan pencemaran yang dapat merusak lingkungan yang cukup serius dan perlu diperhatikan.

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia (PermenLHK) No. 5 Tahun 2014 tentang Persyaratan Mutu Air Limbah Industri, kadar maksimum parameter TDS untuk limbah industri adalah 2000 mg/L, sedangkan kadar maksimum TDS untuk air minum adalah 500 mg/L. Selain peraturan Permen LHK No. 68 Tahun 2016, air dengan pH 6 sampai 9 dapat digunakan untuk limbah cair. Air minum yang aman untuk diminum harus memiliki ambang batas pH 6,5 sampai 8,5 yang bersifat netral. Ambang batas suhu untuk limbah industri rumah tangga adalah 2,5 sampai 3,2 °C. [1].

Salah satu contoh limbah yang termasuk mencemari lingkungan terutama dalam limbah cair merupakan limbah cair yang mengandung ion Timbal (Pb). Ion Timbal (Pb) bersifat toksik dan apabila masuk ke dalam tubuh makhluk hidup akan sulit untuk didegradasi, sehingga dapat mengganggu kerja sistem saraf, ginjal, reproduksi, dan peredaran darah. Berdasarkan bahaya yang ditimbulkan oleh akumulasi Pb tersebut, maka diperlukan upaya untuk mengurangi pencemaran ion Pb (II) di lingkungan, khususnya di lingkungan perairan [2].

Oleh karena itu, diperlukan teknik yang alternatif untuk mengurangi komponen logam secara efisien. Salah satu teknik untuk menurunkan kadar timbal (Pb) dalam air adalah fitrasi [3]. Menggunakan proses filtrasi adalah salah satu metode yang alternatif. Dalam pengolahan limbah cair logam dengan proses filtrasi terdapat beberapa contoh seperti filtrasi membran, adsorpsi, proses oksidasi, dan koagulasi-flokulasi. Perbandingan filtrasi menggunakan koagulasi-flokulasi dengan membran merupakan menghasilkan lumpur kimia yang perlu diolah lebih lanjut dan kurang efektif untuk polutan terlarut [4]. Dalam kelebihan

terhadap penggunaan membran yaitu proses pengoperasian sederhana, ramah lingkungan, mudah dibersihkan dan dapat digunakan kembali (*recovery*) [2].

Polimer alami (biopolimer) yang dapat mengikat limbah logam berat dengan membentuk molekul kompleks telah menjadi subjek penelitian dalam beberapa tahun terakhir. Oleh karena itu, pada konsentrasi yang sangat rendah, biopolimer dapat bertindak sebagai adsorben untuk menghilangkan logam berat dari air. Hasil penelitian yang dilakukan pada tahun 2021 oleh Wahyusi dkk. tentang “Sintesis Membran Kitosan Untuk Pemisahan Ion Pb Pada Limbah Cair” menunjukkan bahwa meskipun sintesis membran dapat menurunkan kadar ion Pb dari 12239,7 mg/L menjadi 7520,4 mg/L, namun membran masih mengandung pori-pori yang lebih besar daripada ukuran jari-jari ion Pb [2].

Kitosan adalah bahan yang digunakan dalam pengembangan membran dalam penelitian membran polimer yang dikembangkan secara luas saat ini. Kitosan sering kali digunakan sebagai komponen organik untuk pengolahan air karena tingginya jumlah gugus amino dan hidroksil, yang sangat penting untuk proses penyerapan [5]. Selain itu, kitosan memiliki sifat-sifat seperti ramah lingkungan, daya rekat yang tinggi pada permukaan, dan rentang stabilitas pH yang luas [6].

Namun pada efektivitas pemisahan membran kitosan memiliki stabilitas yang relatif tinggi namun lebih rendah. Maka dari itu, penambahan silika pada pembuatan membran kitosan bertujuan untuk meningkatkan stabilitas membran kitosan. Pembuatan membran kitosan-silika dapat dilakukan dengan proses sol-gel. Dalam proses sol-gel dapat digambarkan sebagai pembentukan jaringan oksida berkelanjutan melalui reaksi polikondensasi suatu prekursor dalam media cair, atau sebagai proses pembentukan material melalui sol menjadi gel, dan terakhir proses penguapan pelarut. Prekursor silika dalam penelitian ini adalah tetraetil ortosilikat (TEOS) [7]. Penelitian terdahulu tersebut telah memberikan informasi tentang pembuatan membran kitosan dalam pemisahan ion Pb. Namun, perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk meningkatkan efektivitas dalam pembuatan membran kitosan dengan menggunakan variasi silika dengan penambahan PVA dan PEG.

Pembuatan membran kitosan sering terkendala akan sifat fisiknya yang memiliki elastisitas yang rendah. Maka dari itu, mencampurkan silika, PVA, dan

PEG dalam membran untuk meningkatkan elastisitas, meningkat stabilitas, dan mempertahankan bentuk pada membran kitosan [7], [8], dan [9]. Dengan demikian dapat memberikan wawasan tentang pembuatan membran yang baru terkait dengan membran nanofiltrasi. Maka dari itu, tujuan penelitian untuk mengetahui karakteristik membran nanofiltrasi kitosan-silika dengan memodifikasi menggunakan campuran Polivinil Alkohol (PVA) dan Polietilen Glikol (PEG).

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Asam asetat 1% (Merck, Germany), NaOH 1% (Merck, Germany), Polyvinyl alcohol/PVA (Sigma-Aldrich, USA), Polietilena glikol/PEG (Sigma-Aldrich, USA), HCl (Merck, Germany), Kitosan (Merck, Germany), TEOS (Sigma-Aldrich, USA), Aquadest, HNO₃ (Merck, Germany), dan Etanol (Merck, Germany). Alat yang digunakan yaitu Magnetic Stirrer dengan heater (IKA RW 20, Germany), Gelas beaker 250 mL (Pyrex, USA), Gelas beaker 500 mL (Pyrex, USA), Termometer, Petridis (Onemed, Indonesia), Botol reagen 500 ml dan 1 L (Pyrex, USA), Neraca digital (Kern EMB, Germany), Oven (Mommert UN30, Germany), Spektrofotometer FTIR (Shimadzu IRTracer-100, Japan), dan Brunauer-Emmett-Teller/BET (NOVA touch 4LX).

Prosedur

Pembuatan Sol Silika dengan TEOS

Dalam hal ini siapkan labu ukur 100 ml masukkan TEOS sebanyak 40 ml ke dalam labu ukur. Setelah itu masukkan aquadest ke dalam labu ukur hingga tanda tera. Kemudian dikocok hingga homogen selama 10 menit. Jika sudah selesai homogen, masukkan larutan ke dalam botol reagen dan beri label. Selanjutnya pada gelas beaker 250 ml, 3,34 ml TEOS 0,004 M. Lalu ditambahkan 15 ml etanol lalu diaduk hingga homogen. Pada gelas beaker yang lain 10 ml etanol ditambahkan dengan 25 ml HCl 0,03 M. Kemudian ditambahkan pada larutan diatas secara perlahan-lahan distirer selama 24 jam (sol silika).

Tahap Pencampuran Bahan

Pada proses ini, 2% CH₃COOH pada ukuran 100 ml dan 2 gram kitosan kemudian dimasukkan ke dalam gelas beaker 250 ml. Selanjutnya setelah terhomogen

selama 1 jam, kemudian menambahkan TEOS yang terdiri 3 variasi yaitu 2 ml, 4 ml, dan 6 ml. Lalu aduk hingga homogen selama 1 jam. Setelah itu, pada suhu 60°C melakukan pengadukan dengan *magnetic stirrer*. Tambahkan 30 ml PVA dan 4 ml PEG, dengan pengadukan selama 2 jam hingga homogen.

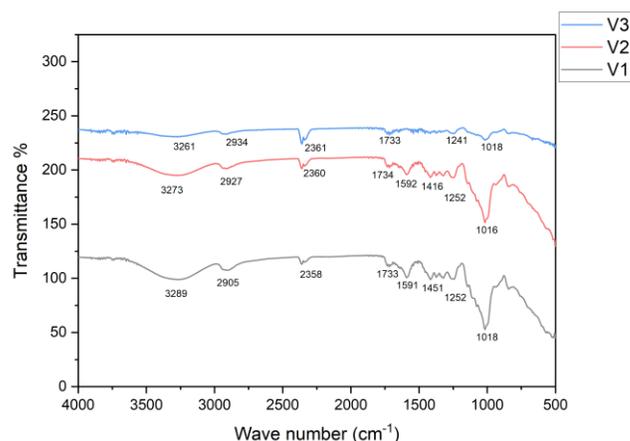
Tahap Pencetakan dan Pengeringan dengan Pengovenan

Tahap ini selanjutnya akan mencetak membran dengan menggunakan *petridish*. Dari tahap sebelumnya larutan sebanyak 35 ml yang sudah homogen kemudian dituang dan dicetak di *petridish*. Kemudian membran yang sudah di cetak di Oven dengan suhu 60°C selama 12 jam. Lalu jika sudah mengering membran tersebut didiamkan terlebih dahulu. Lalu jika sudah dingin kemudian kita ambil menggunakan spatula.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisa FTIR

Dalam hasil analisa FTIR pada membran kitosan-silika dengan menggunakan PVA dan PEG. Tujuan dilakukannya analisa FTIR yaitu untuk mengetahui membran tersebut memiliki gugus fungsi. Spektra FTIR dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Hasil Analisa FTIR

Dari Gambar 1 dapat dilihat terdapat beberapa perbedaan pada variasi 1, variasi 2, dan variasi 3. Pada Tabel 1 dapat dilihat interaksi silika dalam membran kitosan dapat dilihat pada daerah 3261-3289 cm⁻¹ yang berubah-ubah dan terkadang suka melebar. Hal ini menyebabkan pada daerah tersebut membentuk gugus silanol (Si-OH). Dengan demikian gugus silanol

yang dimiliki pada membran kitosan-silika mampu berikatan dengan ion logam. Dalam daerah puncak pada 2905-2934 cm^{-1} masing-masing terkait dengan vibrasi yang dihasilkan oleh peregangan C-N dan C-H. Sedangkan daerah 1733-1734 cm^{-1} merupakan serapan C=O dan pada daerah 1591-1592 cm^{-1} merupakan daerah CONH. Dalam daerah 1415-1416 cm^{-1} merupakan serapan C-H. Pada daerah 1241-1252 cm^{-1} merupakan serapan dari vibrasi ulur simetri Si-O dari Si-O-Si. Pada daerah 1016-1018 cm^{-1} merupakan angka serapan yang mewakili gugus siloxane (Si-O-Si).

Tabel 1. Jenis-jenis ikatan pada membran

Bilangan gelombang (cm^{-1})	Ikatan	Intensitas
3261-3289 cm^{-1}	Si-OH	Berubah-ubah dan terkadang suka melebar
2905-2934 cm^{-1}	C-N dan C-H	Kuat
1733-1734 cm^{-1}	C=O	Kuat
1591-1592 cm^{-1}	CONH	Sedang
1415-1416 cm^{-1}	C-H	Kuat
1241-1252 cm^{-1}	Si-O	Berubah

Maka dari itu, hasil analisa FTIR pada membran kitosan-silika menunjukkan keberadaan silika dalam membran kitosan tidak hanya memodifikasi struktur membran tetapi juga memberikan sifat untuk menyerap dengan ion logam. Dengan demikian pada silika dengan mewakili gugus siloxane (Si-O-Si) dan gugus silanol (Si-OH) memiliki keunggulan pori - pori luas, berbagai ukuran partikel, dan area permukaan khusus [10].

Pada gugus amida (1591-1592 cm^{-1}) kitosan terjadi pergeseran bilangan gelombang lebih rendah (meskipun tidak signifikan). Hasil ini sesuai dengan penelitian Mahatmanti dkk [7] yang menyatakan bahwa tidak terjadi reaksi kimia antara kitosan dengan PEG, meskipun ada kemungkinan terbentuknya ikatan hidrogen antara kitosan dengan PEG.

Hasil Analisa BET

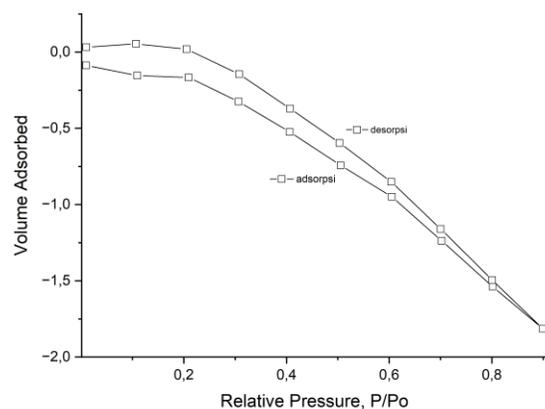
Metodologi sederhana untuk menentukan luas permukaan spesifik bahan berpori, seperti padatan dan serbuk, adalah metode *Brunauer-Emmett-Teller* (BET). Luas permukaan merupakan hal yang penting, terutama pada bahan yang memiliki struktur berpori. Dalam hasil uji BET pada membran kitosan-silika dengan menggunakan PVA dan PEG dapat dilihat pada Tabel 2.

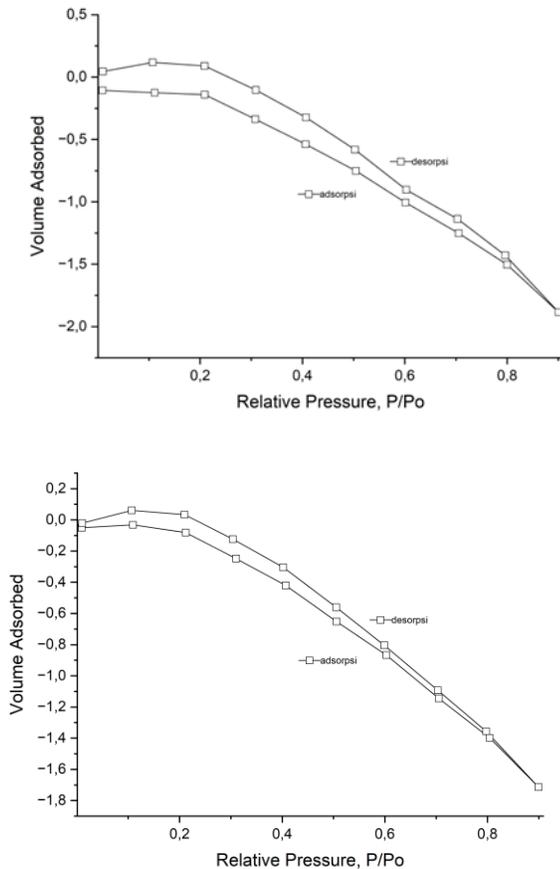
Mikropori diklasifikasikan oleh IUPAC sebagai memiliki diameter kurang dari 2 nm, mesopori memiliki diameter antara 2 dan 50 nm, dan makropori memiliki diameter lebih tinggi dari 50 nm [6]. Berdasarkan hasil analisis pada tabel diatas ukuran pori dikategorikan sebagai mikropori. Pada mikropori dihasilkan luas permukaan sebesar -0,401798 nm, sebesar -3,53429 nm dan -6,14822 nm pada material SiO₂ dengan sebanyak 2 ml dengan kitosan 2 g, pada material SiO₂ dengan sebanyak 4 ml dengan kitosan 2 g serta SiO₂ dengan sebanyak 6 ml dengan kitosan 2 g.

Tabel 2. Hasil uji BET

Material	Luas permukaan (m^2/g)	Volume pori (cc/g)	Jari jari pori (nm)
SiO ₂ (2 ml)-Kitosan(2 g)	14,0008	-0,00281274	-0,401798
SiO ₂ (4 ml)-Kitosan(2 g)	1,65396	-0,00292279	-3,53429
SiO ₂ (6 ml)-Kitosan(2 g)	0,864579	-0,00265781	-6,14822

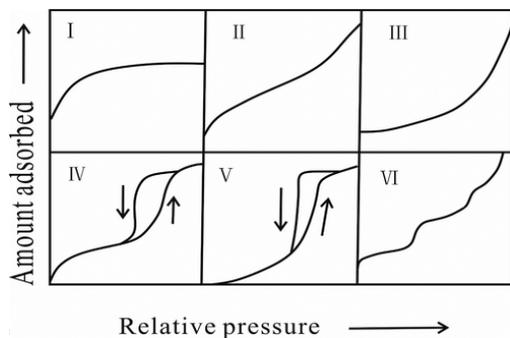
Selain itu pada jenis membran yang berdasarkan fungsinya, membran dibedakan menjadi enam jenis, yaitu membran mikrofiltrasi, membran ultrafiltrasi, membran nanofiltrasi, membran osmosis balik, membran dialisis, dan membran elektrodialisis (Mulder, 1996). Maka jika dilihat pada tabel diatas bahwa membran tersebut termasuk dalam proses pemisahan membran nanofiltrasi. Hal ini disebabkan membran ini merupakan kelompok intermediet yang berada di antara membran ultrafiltrasi dan *reverse* osmosis yang memisahkan partikel berukuran 0,0005-0,005 μm .





Gambar 2. Hasil plot isotherm BET

Pada klasifikasi isotherm *fisisorpsi* ini melihat pada Gambar 2 yang dihasilkan dari plot isotherm BET. Tujuan dilakukannya data mengenai jumlah maksimum adsorbat yang dapat diserap oleh adsorben tertentu pada tekanan tertentu. Hasilnya, Gambar 3 di bawah ini menampilkan dari penelitian yang dilakukan pada membran kitosan-silika yang telah dibuat.

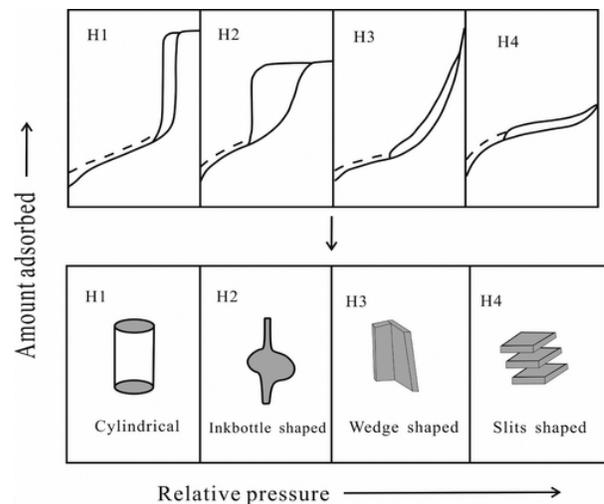


Gambar 3. Klasifikasi berdasarkan IUPAC

Gambar 3 menyajikan isotherm adsorpsi/desorpsi nitrogen yang diukur pada suhu 77 K untuk komposit kitosan-silika. Jika melihat klasifikasi dari *International*

Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) merupakan tipe I. Tipe isotherm ini umumnya diamati pada material mikropori, yang mana peningkatan tajam jumlah yang diadsorpsi pada tekanan relatif rendah mengindikasikan bahwa volume mikropori yang tersedia telah terisi [6].

Selain itu untuk klasifikasi pada kurva adsorpsi dan desorpsi loop histeresis pada Gambar 4 dan bentuk pori yang sesuai yaitu tipe H1. Hasilnya menunjukkan bahwa kurva adsorpsi dan desorpsi loop histeresis H1 sangat curam, dan tekanan relatif kondensasi kapiler berada di tengah, yang umumnya sesuai dengan lubang silinder dengan dua ujung terbuka. Selain itu, memiliki volume adsorpsi N₂ yang lebih kecil dengan loop histeresis yang sempit, di mana kurva adsorpsi mereka hampir sepenuhnya bertepatan dengan kurva desorpsi dan meningkat dengan cepat dan serempak pada P/P₀ = 0,9 mendekati 1,0. Maka dari itu jenis loop ini biasanya sesuai dengan kombinasi pori-pori silinder terlihat pada Tabel 3 [12], [13].



Gambar 4. Kurva adsorpsi dan desorpsi loop histeresis

Tabel 3. Hasil dari kurva

Bahan	Fisisorpsi Isotherm	Loop Histeresis	Referensi
Silika - Kitosan	Tipe I	Tipe H1	[6], [12], [13].

Uji Swelling

Mengetahui ukuran zat yang dapat berdifusi ke dalam membran ini adalah tujuan dari uji *swelling*. Selain itu, *swelling* adalah tanda bahwa polimer memiliki celah di antara ikatannya. [14]. Membran kitosan-silika diiris dengan ukuran 2x2 cm² untuk pengujian, dan

berat awal (wi/gr) kemudian ditentukan. Setelah itu, 5 mL akuades digunakan untuk merendam membran kitosan-silika selama satu hari penuh. Setelah perendaman, tisu kertas digunakan untuk mengeringkan permukaan membran kitosan-silika sebelum berat akhir (wf/gr) ditentukan. Hasil pengujian kapasitas penyerapan air oleh membran kitosan-silika dijelaskan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil uji swelling

Rasio membran kitosan-silika	Indeks swelling (%)
1:1	91,25
1:2	-52
1:3	-16,9574

Karena bahan hibrida akan mengalami *swelling* ketika konsentrasi larutan natrium silika sebagai sumber silika meningkat, membran kitosan-silika dalam hal ini memiliki kemampuan penyerapan air yang lebih besar. Jika dilihat pada data yang didapatkan pada uji *swelling* maka karena silika mengandung gugus silanol yang dapat meningkatkan hidrofilisitas membran, semakin sedikit silika yang ditambahkan, semakin tinggi konsentrasi kitosan dalam membran, sehingga menghasilkan persentase *swelling* yang baik. [7].

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan mengembangkan membran nanofiltrasi berbasis kitosan-silika yang dimodifikasi dengan PVA (Polyvinyl Alcohol) dan PEG (Polyethylene Glycol) untuk menurunkan kadar ion Timbal (Pb) dalam limbah industri. Hal ini didorong oleh permasalahan pencemaran logam berat di Indonesia, khususnya Pb, yang berbahaya bagi kesehatan dan lingkungan, serta tuntutan regulasi (PermenLHK No. 5/2014) tentang standar kualitas limbah cair. Membran dibuat melalui proses sol-gel dengan prekursor TEOS (Tetraethyl Orthosilicate), pencampuran kitosan, PVA, dan PEG, serta pencetakan dan pengeringan membran. Kitosan dipilih karena sifatnya yang ramah lingkungan dan kemampuan adsorpsi, sementara silika ditambahkan untuk meningkatkan stabilitas membran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa membran ini memiliki struktur berpori sesuai dengan karakteristik nanofiltrasi, dengan hasil analisis FTIR dan BET yang

menunjukkan kemampuan adsorpsi dan interaksi kimia yang baik antara kitosan, silika, PVA, dan PEG. Membran dengan variasi silika yang optimal juga menunjukkan kapasitas penyerapan air (*swelling*) yang tinggi, yang penting untuk efektivitas proses filtrasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. M. Purba *et al.*, "Sistem Pendeteksian Air Limbah Cair Industri," *J. Darma Agung*, vol. 32, no. 1 pp. 483-493, 2024.
- [2] N. Hamsiah, Nurlina, and T. A. Zaharah, "Laju pemisahan ion timbal (Pb^{2+}) pada membran kitosan-zeolit," *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, vol. 6, no. 3, pp. 34-43, 2017.
- [3] K. N. Wahyusi, S. Nikmah, and G. R. Anggraini, "Chitosan membrane synthesis for pb ion separation in wastewater," *Tek. Kim.*, vol. 16, no. 1, pp. 10-15, 2021.
- [4] S. Martini, E. Yuliwati, and D. Kharismadewi, "Pembuatan teknologi pengolahan limbah cair industri," *J. Distilasi*, vol. 5, no. 2, p. 26, 2020, doi: 10.32502/jd.v5i2.3030.
- [5] Y. Gao, Y. Ru, L. Zhou, X. Wang, and J. Wang, "Preparation and characterization of chitosan-zeolite molecular sieve composite for ammonia and nitrate removal," *Adv. Compos. Lett.*, vol. 27, no. 5, 2018, doi: 10.1177/096369351802700502.
- [6] T. M. Budnyak, I. V. Pylypchuk, V. A. Tertykh, E. S. Yanovska, and D. Kolodynska, "Synthesis and adsorption properties of chitosan-silica nanocomposite prepared by sol-gel method," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 10, no. 1, pp. 1-10, 2015, doi: 10.1186/s11671-014-0722-1.
- [7] A. Rapierna and F. W. Mahatmanti, "Sintesis dan pemanfaatan membran kitosan-silika sebagai membran pemisah ion logam Fe^{2+} ," vol. 1, no. 2252, 2012.
- [8] T. Kharisma, N. Ariesta, P. S. Kimia, U. Nusa, and B. Bogor, "Karakteristik membran komposit berbasis kitosan/PVA termodifikasi lempung dari Babakan Madang Bogor," *J. Sains Nat. Univ. Nusa Bangsa*, vol. 10, 2020.
- [9] A. M. Nurratri, Khabibi, R. A. Lusiana, A. Haris, and R. Nuryanto, "Pembuatan dan karakterisasi membran paduan kitosan- polietilenglikol6000," *J. GEEJ*, vol. 7, no. 2, pp. 3261-3270, 2020.
- [10] F. S. Setiowati, B. Oktavia, H. Sanjaya, and A. Putra, "Pengaruh pH dan waktu kontak terhadap penyerapan ion Cu^{2+} (II) menggunakan silika gel-GPTMS termodifikasi sulfonat," vol. 10, no. 1, pp. 1-4, 2023.

- [11] M. Mulder, "Basic principles of membrane technology." 1991. doi: 10.1524/zpch.1998.203.part_1_2.263.
- [12] Z. Wang, X. Jiang, M. Pan, and Y. Shi, "Nano-scale pore structure and its multi-fractal characteristics of tight sandstone by n₂ adsorption/desorption analyses: A case study of shihezi formation from the sulige gas field, ordos basin, china," *Minerals*, vol. 10, no. 4, 2020, doi: 10.3390/min10040377.
- [13] Y. Yang, J. Zhang, L. Xu, P. Li, Y. Liu, and W. Dang, "Pore structure and fractal characteristics of deep shale: A case study from permian shanxi formation shale, from the ordos basin," *ACS Omega*, vol. 7, no. 11, pp. 9229-9243, 2022, doi: 10.1021/acsomega.1c05779.
- [14] S. Muljani, K. A. Kusuma, L. Nofitasari, A. R. Amalia, and N. Hapsari, "Sintesis membran kitosan silika dari geothermal sludge," *J. Tek. Kim.*, vol. 13, no. 1, pp. 22-26, 2018, doi: 10.33005/tekkim.v13i1.1150.