



Uji Stabilitas Polymer Inclusion Membrane dari Polimer Pendukung PVC, Ekstraktan D2EHPA, dan *Plasticizer* Asam Oleat pada Kondisi Asam

(*Stability Test of Polymer Inclusion Membrane Fabricated Using PVC as Base Polymer, D2EHPA as Extractant and Oleic Acid as Plasticizer Under Acidic Condition*)

William Antoni Rensini¹, Luther Kadang², Titus Lapailaka³, Johnson Nune Naat⁴, Redi Kristian Pingak⁵, Origenes Boy Kapitan⁶, Fidelis Nitti^{7*}

^{1,2,3,7}Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adisucipto Penfui, Kupang, Nusa Tenggara Timur 85001, Indonesia

⁴Program Studi Pendidikan Kimia, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adisucipto Penfui, Kupang, Nusa Tenggara Timur 85001, Indonesia

⁵Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adisucipto Penfui, Kupang, Nusa Tenggara Timur 85001, Indonesia

⁶Politeknik Pertanian Negeri Kupang, Jl. Prof. Dr. Herman Yohanes, Lasiana, Kec. Kelapa Lima, Kota Kupang, Nusa Tenggara Timur 85001, Indonesia

*e-mail korespondensi: fnitti@staf.undana.ac.id

Info Artikel:

Dikirim:

25 Maret 2024

Revisi:

6 April 2024

Diterima:

8 April 2024

Kata Kunci:

Polymer inclusion membrane, uji stabilitas, 2,5 M HCl, D2EHPA, asam oleat

Keywords:

Polymer inclusion membrane, stability test, 2,5 M HCl, D2EHPA, oleic acid

Lisensi:



Attribution-Share Alike 4.0 International (CC-BY-SA 4.0)



Abstrak-Polymer Inclusion Membrane (PIM) merupakan membran cair generasi terbaru untuk pemisahan berbagai jenis komponen kimia organik dan anorganik. Stabilitas PIM merupakan faktor yang sangat penting untuk efektivitas pemisahan yang berkelanjutan. Penelitian ini dilakukan untuk menyelidiki kestabilan PIM yang dibuat dari PVC sebagai polimer pendukung, D2EHPA sebagai ekstraktan, dan asam oleat (AO) sebagai *plasticizer* dalam HCl 2,5 M. Hasil penelitian menunjukkan komposisi PIM optimum adalah 50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO yang menunjukkan karakteristik fisik yang ideal seperti tipis, transparan, fleksibel dengan permukaan yang tidak berminyak. Hasil penelitian menunjukkan penurunan berat PIM yang direndam dalam HCl 2,5 M lebih kecil dibandingkan dengan penurunan berat PIM yang direndam dalam air selama 7 hari. Hasil ini menunjukkan bahwa PIM lebih stabil dalam kondisi asam dibandingkan dalam air (netral). Perbandingan karakteristik kimia PIM sebelum dan setelah uji stabilitas menunjukkan PIM yang direndam dalam air mengalami kehilangan fase cair selama proses uji stabilitas. Perbedaan ini terkonfirmasi melalui perbedaan karakteristik fisika PIM sebelum dan sesudah uji stabilitas. Secara keseluruhan, PIM dengan komposisi optimum 50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO disarankan untuk digunakan dalam pemisahan pada kondisi asam untuk mempertahankan stabilitas dan efisiensi pemisahannya.

Abstract-Polymer Inclusion Membrane (PIM) is the latest generation of liquid membranes used to separate various chemical components. PIM stability is a crucial factor for the effectiveness of sustainable separation. This research was conducted to investigate the stability of PIM fabricated using PVC as the supporting polymer, D2EHPA as the extractant, and oleic acid (AO) as the plasticizer in 2.5 M HCl. The results indicated that the optimum PIM composition was 50% PVC, 40% D2EHPA, and 10% AO, exhibiting ideal physical characteristics such as thin, transparent, flexible, and non-oily surface. The findings showed that the weight loss of PIM immersed in 2.5 M HCl is smaller compared to the weight loss of PIM immersed in water for 7 days. These results indicate that PIM is more stable in acidic conditions compared to water (neutral). A comparison of the chemical characteristics of PIM before and after stability testing indicates that PIM immersed in water experiences a loss of liquid phase during the stability testing. This difference is confirmed through the change in physical characteristics of PIM before and after stability testing. Overall, PIM with the optimum composition is recommended for use in separation under acidic conditions to maintain stability and separation efficiency.

PENDAHULUAN

Membran cair akhir-akhir ini mengalami perkembangan yang sangat signifikan karena merupakan pengembangan lanjutan dan merupakan alternatif teknik pemisahan yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan ekstraksi pelarut. Membran cair dinilai lebih baik dari ekstraksi pelarut karena kelebihanannya pada beberapa aspek utama yaitu ramah lingkungan, efisiensi energi, pemisahan yang efektif, fleksibilitas, proses simultan, dan penggunaan luas, yang menjadikannya alternatif unggul dibandingkan ekstraksi pelarut dalam pemisahan berbagai jenis komponen kimia [1, 2]. Secara umum, membran cair didefinisikan sebagai jenis membran yang memanfaatkan komponen kimia ekstraktan dan *plasticizer* dalam fasa cair. Jenis membran ini telah berhasil digunakan dalam berbagai proses pemisahan yang melibatkan ekstraksi atau transport komponen kimia target dari satu fase cair ke fase cair lainnya seperti pemisahan komponen organik [3], dan ekstraksi berbagai jenis ion logam dan pemurnian larutan [4, 5]. Hingga saat ini, terdapat berbagai jenis membran cair, salah satu yang mendapat perhatian peneliti akhir-akhir ini adalah *Polymer Inclusion Membrane* (PIM) [6, 7].

PIM terdiri dari dua komponen utama yaitu polimer pendukung dan fasa cair yang meliputi ekstraktan dan *plasticizer*. Berbeda dengan jenis membran cair lainnya, PIM melibatkan pemerangkapan ekstraktan dan *plasticizer* tidak hanya pada pori-pori membran tetapi pada rantai polimer pendukung penyusun membran [8]. Teknik ini menghasilkan membran yang jauh lebih stabil karena ekstraktannya lebih kuat tertahan pada membran dan tidak mudah terlepas ke larutan selama proses pemisahan menggunakan PIM [9, 10]. Keuntungan penggunaan PIM terletak pada selektivitasnya yang tinggi, kemudahan fabrikasinya dan ketahanan penggunaan dalam jangka waktu pemakaian yang lama, serta kemudahan regenerasi dan penggunaan kembali dalam beberapa siklus pemisahan berulang [11]. Seperti proses pemisahan menggunakan membran cair lainnya, pemisahan menggunakan PIM dapat dilakukan secara individu melibatkan ekstraksi dan ekstraksi kembali pada larutan yang berbeda atau secara simultan pada dua sisi membran yang berbeda. Proses yang kedua dikenal dengan nama *facilitated transport* atau transport analit dari fasa umpan ke fasa penerima yang difasilitasi oleh ekstraktan yang terdapat dalam PIM [12, 13].

Setiap komponen penyusun PIM berperan penting dalam proses pembuatannya serta pengaplikasiannya baik pada skala laboratorium maupun skala industri. Polimer pendukung berfungsi untuk memberikan sifat mekanis pada PIM dan menahan fase cair (ekstraktan dan *plasticizer*) pada membran. Polimer pendukung yang baik harus memiliki ketahanan fisik, kimia dan termal yang baik, terutama jika membran digunakan dalam pemisahan pada kondisi asam, basa, garam dan larutan yang mengandung alkohol serta lemak [14]. Salah satu jenis polimer pendukung yang umum digunakan dalam pembuatan PIM adalah polivinil klorida (PVC) karena memiliki kriteria-kriteria yang disebutkan sebelumnya [15]. Ekstraktan yang digunakan pada PIM umumnya merupakan komponen kimia penukar ion (kation atau anion) atau pengompleks yang berfungsi sebagai pengikat analit target dan mentransfer analit dari fase umpan ke fase penerima. Salah satu ekstraktan yang paling umum digunakan pada pembuatan PIM adalah *di(2-ethylhexyl) phosphoric acid* (D2EHPA), karena kompatibilitasnya dengan komponen PIM lainnya [16].

Selain kedua komponen penyusun PIM di atas, sering dibutuhkan penambahan *plasticizer* pada PIM untuk memberikan sifat plastisitas dan fleksibilitas pada membran dan memudahkan difusi analit ke dalam fase membran. *Plasticizer* umumnya merupakan komponen kimia organik yang memiliki rantai alkil yang bersifat hidrofobik dan satu atau beberapa gugus polar yang bersifat hidrofilik. Rantai hidrofobik dari *plasticizer* berperan mengatur kompatibilitasnya dengan rantai polimer pendukung membran, sedangkan gugus polarnya akan berinteraksi dengan gugus polar dari polimer pendukung [17]. Hal ini memungkinkan semakin melebarnya jarak antara rantai polimer pendukung dan dengan demikian menurunkan gaya intermolekular antara rantai molekul polimer pendukung. Beberapa *plasticizer* telah digunakan dalam penelitian sebelumnya pada PIM berbasis PVC yaitu 2-Nitrophenyl octyl ether (2-NPOE), Tris(2-ethylhexyl) Phosphate (TEHP) dan Tributyl Phosphate (TBP) untuk transportasi ion logam Bi(III) [18]. Meskipun

plasticizer-plasticizer tersebut memiliki kualitas yang baik dan telah berhasil diaplikasikan dalam pembuatan PIM, penggunaannya dalam skala besar dan berkelanjutan tidak sejalan dengan konsep *green chemistry* karena termasuk golongan *plasticizer* sintetik yang mahal serta berdampak buruk bagi lingkungan dan kesehatan manusia.

Akhir-akhir ini, pengembangan PIM difokuskan pada penggunaan bahan-bahan penyusun PIM yang lebih ramah lingkungan, salah satunya adalah penggunaan *plasticizer* yang bersumber dari bahan alam. Hal ini karena *plasticizer* alami dinilai lebih ramah lingkungan, murah dan mudah didapat. Salah satu jenis *plasticizer* yang telah digunakan pada pembuatan PIM adalah asam oleat (AO) yang merupakan jenis komponen kimia organik yang bersumber dari berbagai jenis minyak seperti minyak biji kelor yang keberadaannya sangat melimpah di daerah Nusa Tenggara Timur [19]. Penggunaan AO sebagai *plasticizer* pada PIM ini didasarkan pada fakta bahwa asam oleat memiliki rantai alkil hidrofobik dan gugus karboksilat yang bersifat polar sehingga sesuai dengan kriteria *plasticizer* pada PIM [20].

Salah satu faktor yang berperan penting dalam proses pemisahan menggunakan PIM adalah kestabilan PIM. Hal ini berkaitan dengan ketahanan fase cair PIM (ekstraktan dan *plasticizer*) untuk tetap berada rantai polimer dan tidak terlepas ke larutan selama proses pemisahan. PIM yang baik seharusnya dapat digunakan dalam beberapa siklus pemisahan dengan efisiensi pemisahan yang stabil. Proses pemisahan menggunakan PIM umumnya dilakukan pada kondisi asam atau basa tergantung pada jenis ekstraktan dan mekanisme pemisahan analit. Kestabilan PIM dalam proses pemisahan sangat ditentukan oleh kelarutan komponen PIM (fasa cair) pada larutan yang mengalami kontak langsung dengan PIM. Semakin besar kelarutan fasa cair dalam larutan yang mengalami kontak dengan PIM, semakin mudah komponen fasa cair untuk terlepas ke larutan yang mengalami kontak dengan PIM. Oleh karena itu, penting untuk diuji kestabilan PIM dalam berbagai kondisi sebelum digunakan pada proses pemisahan. Berbagai literatur telah melaporkan tentang penggunaan PIM untuk pemisahan dalam kondisi asam dan basa. Argiropoulos *et al.*, (1998) menguji kestabilan PIM berbasis PVC dan Aliquat 336 untuk ekstraksi emas dan menemukan kehilangan berat PIM sebesar 24-33% ketika PIM direndam selama 10 hari dalam air deionisasi dan hanya 2-7% dalam 2,5 mol L⁻¹ HCl [21]. Kiswandono *et al.*, (2013) menggunakan PIM berbasis PVC yang mengandung kopoli(eugenol-divinilbenzena) sebagai ekstraktan untuk transpor fenol. Peneliti menemukan bahwa masa pakai PIM untuk transpor fenol adalah selama 7 hari [22]. Meskipun telah banyak digunakan untuk pemisahan dalam berbagai kondisi, diketahui bahwa penelitian-penelitian tersebut belum menjelaskan secara spesifik kestabilan PIM dalam jangka panjang dalam kondisi asam yang terbuat dari polimer pendukung PVC, ekstraktan D2EHPA dan *plasticizer* AO. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kestabilan jangka panjang PIM dari polimer pendukung PVC, ekstraktan D2EHPA dan *plasticizer* AO dalam kondisi asam.

METODE PENELITIAN

Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari cawan petri (diameter internal 9 cm), mikropipet (1000-5000 µL), pengaduk magnetik, timbangan digital, botol laboratorium Duran 25 mL, smartphone (Samsung A13), oven, gelas kimia 250 mL, mikroskop. Beberapa instrumen analisis digunakan untuk mengkarakterisasi PIM termasuk Fourier Transform Infrared (FTIR, Nicolet Avatar 360 IR), Scanning Electron Microscopy (SEM, Hitachi TM-3000), mesin uji tarik (Brookfield CT3).

Bahan

Semua bahan kimia yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kualitas analitik dan digunakan sesuai dengan yang diterima tanpa pemurnian lebih lanjut. Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain PVC (Sigma-Aldrich, Netherlands), Asam Oleat (AO) (JIC89, Indonesia), D2EHPA (Sigma-Aldrich, Amerika Serikat), Tetrahidrofuran (THF) (EMD

Millipore Corporation, Germany), asam klorida (HCl), (Sigma-Aldrich, USA), akuades, dan aluminium foil.

Optimasi Komposisi PIM

PIM dengan berat total 320 mg dibuat dengan komposisi 60% (w/w) PVC dan 40% (w/w) D2EHPA (Tabel 1 perlakuan P1). Secara singkat, sebanyak 128 mg D2EHPA dilarutkan dalam 5 mL pelarut THF pada botol lab duran 25 mL. Selanjutnya, sebanyak 192 mg PVC ditambahkan secara perlahan ke dalam campuran sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer*. Proses *stirrer* dilakukan selama \pm 8 jam pada suhu ruang hingga campuran larut dengan sempurna yang ditandai dengan terbentuknya larutan yang tampak transparan. Larutan tersebut kemudian dipipet dan dituangkan ke dalam cawan petri berdiameter 9 cm dan disebar secara merata. Cawan petri kemudian ditutup dengan tisu, penutup cawan petri dan *aluminium tray* untuk menghindari kontak secara langsung dengan udara luar. Selanjutnya, pelarut THF dibiarkan menguap selama \pm 24 jam, dan membran yang diperoleh kemudian dikupas dari cawan petri. Hasilnya berupa membran tipis yang fleksibel, transparan, homogen, tidak berminyak dipermukaan dan memiliki kekuatan tarik yang baik. Pada optimasi komposisi PIM ini dilakukan prosedur yang sama untuk perlakuan P2 sampai P5 dengan penambahan *plasticizer* AO dengan beberapa variasi konsentrasi seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi Optimasi Komposisi PIM

PIM	PVC		AO		D2EHPA	
	konsentrasi (%w/w)	massa (mg)	konsentrasi (%w/w)	massa (mg)	konsentrasi (%w/w)	massa (mg)
P1	60	192	0	-		
P2	55	176	5	16		
P3	50	160	10	32	40	128
P4	45	144	15	48		
P5	40	128	20	64		

Uji Stabilitas PIM

PIM dengan komposisi optimum (50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO) yang diperoleh dari tahapan sebelumnya kemudian diuji stabilitasnya di dalam larutan HCl dengan konsentrasi sebesar 2,5 M. Pertama, PIM dengan bentuk lingkaran dengan diameter 80 mm dipotong dari bagian tengah PIM yang telah yang diproduksi. Masing-masing PIM kemudian ditimbang terlebih dahulu untuk mengetahui berat awalnya. Setelah itu, masing-masing PIM dimasukkan ke dalam gelas beker 100 mL yang sudah berisi 100 mL larutan HCl 2,5 M dan kemudian ditutup menggunakan *aluminium foil* dan dibiarkan selama \pm 24 jam. Setelah 24 jam, PIM selanjutnya dikeluarkan dari dalam larutan dan dikeringkan permukaannya menggunakan kertas tisu. PIM dibiarkan pada udara terbuka selama beberapa jam untuk memastikan semua PIM tersebut bebas dari molekul air yang terperangkap pada permukaan dan selanjutnya ditimbang kembali untuk memperoleh berat PIM tersebut setelah perendaman selama 24 jam. Selanjutnya, PIM dimasukkan kembali ke dalam larutan 2,5 M HCl yang sama dan prosedur lanjutan yang sama dilakukan untuk uji stabilitas PIM pada hari ke 2 – 7. Presentasi kehilangan berat PIM setelah perendaman dalam larutan 2,5 M HCl setiap harinya dapat dihitung menggunakan persamaan 1. Sebagai perbandingan, uji stabilitas PIM juga dilakukan dengan dua cara berbeda. Pertama, PIM direndam dalam 100 mL air. Kedua, PIM dibiarkan dalam gelas kimia tanpa larutan dan dibiarkan terekspos pada udara terbuka. Untuk kedua perlakuan ini, berat PIM ditentukan dengan cara ditimbang untuk menentukan berat PIM setiap 24 jam selama uji stabilitas PIM.

$$\text{Kehilangan Massa (\%)} = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

Di mana W_0 adalah berat PIM mula-mula, W_t adalah berat PIM setelah pengujian hari tertentu.

Karakterisasi PIM Sebelum dan Sesudah Uji Stabilitas

Sebelum dan sesudah uji stabilitas, PIM dikarakterisasi untuk mengetahui sifat fisika dan kimianya. Karakterisasi sifat fisika PIM yang dilakukan meliputi *water contact angle*, *water uptake*, *tensile strength* dan *%elongation*. Karakterisasi sifat kimia PIM dilakukan dengan menggunakan dua alat instrumen utama yaitu SEM dan FTIR.

Pengukuran *Water Contact Angle*, *Water Uptake*, *Tensile Strength* dan *%Elongation*.

Sudut kontak air (*water contact angle*)

Water contact angle dilakukan untuk mengetahui sifat hidrofobik dan hidrofilik dari membran. Uji *water contact angle* dilakukan dengan cara meneteskan air bervolume 5 μL ke atas permukaan membran yang diletakkan pada sebuah permukaan datar. Tetesan air yang mengenai permukaan membran difoto dengan menggunakan kamera *smartphone* yang dilengkapi dengan peralatan *microlens*. Foto tersebut kemudian dianalisis dan diukur sudut kontak airnya menggunakan *software Image J*.

Serapan air (*water uptake*)

PIM yang diuji *water uptake* ditimbang terlebih dahulu berat awalnya, kemudian direndam dengan air 100 mL selama ± 24 jam pada suhu ruang. Setelah perendaman, permukaan membran yang basah dikeringkan dengan tisu lalu ditimbang kembali dan dicatat beratnya, lalu dimasukkan ke dalam oven pada suhu 60°C untuk memperoleh berat PIM yang konstan. Berat awal dan berat setelah perendaman digunakan untuk menentukan persen serapan air dari membran. *Water uptake* selanjutnya dihitung dengan menggunakan persamaan 2 [23].

$$\text{Water Uptake (U) \%} = \frac{W_{\text{wet}} - W_{\text{dry}}}{W_{\text{dry}}} \times 100\% \quad (2)$$

Di mana W_{wet} adalah berat PIM setelah direndam dalam air dan W_{dry} adalah berat mula-mula PIM.

Kekuatan tarik (*tensile strength*)

Pengukuran *tensile strength* pada membran dilakukan untuk mengetahui kekuatan dan elastisitas membran apabila diberikan beban tertentu. PIM dipotong berbentuk lingkaran dengan diameter 80 mm kemudian diukur menggunakan alat *tensile tester* dengan cara potongan PIM ditarik secara perlahan sampai putus dan hasilnya akan tercatat secara otomatis pada *load cell*. *Tensile strength* ditentukan berdasarkan beban maksimum pada saat PIM putus. *Tensile Strength* dapat dihitung menggunakan Persamaan 3 [24].

$$\text{Tensile Strength}(\sigma) = \frac{F_{\text{maks}}}{A} \quad (3)$$

Di mana F_{maks} adalah gaya maksimum yang dikenakan pada PIM dan A adalah luas area.

Persentase Pemanjangan (*% elongation*)

Penentuan *% elongation* dilakukan setelah pengukuran *tensile strength* yaitu pada saat membran putus. Untuk mengukur panjangnya, digunakan alat ekstensometer. Pemanjangan PIM dapat dihitung dengan membagi pertambahan panjang potongan membran saat putus (Δl) dan panjang awal membran sebelum ditarik (l_0). Secara matematis pemanjangan dihitung menggunakan Persamaan 4.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\% \quad (4)$$

Karakterisasi PIM menggunakan FTIR dan SEM

Karakterisasi PIM dengan FTIR dan SEM akan dilakukan sebelum dan sesudah uji stabilitas PIM. Karakterisasi PIM menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi senyawa yang terkandung dalam PIM dan untuk mengidentifikasi jenis interaksi yang terjadi antara komponen penyusun PIM. Sementara itu,

karakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) bertujuan untuk mengetahui morfologi permukaan dan porositas dari PIM pada perbesaran 200x.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Optimasi Komposisi PIM

Komposisi PIM sangat menentukan sifat fisika dan kimia PIM. Oleh karena itu, perlu dilakukan optimasi komposisi PIM untuk mendapatkan komposisi optimum PIM yang menghasilkan PIM dengan kriteria yang ideal seperti transparan, tipis, tidak berminyak dan fleksibel untuk aplikasi selanjutnya dalam proses pemisahan kimia. Dalam penelitian ini PIM dibuat dengan variasi komposisi PVC 40-60%, D2EHPA 40 % dan AO 5-20%. Tabel 2 merangkum berbagai komposisi membran yang dibuat dalam penelitian ini serta hasil pengamatan kenampakan visual PIM yang dihasilkan dari masing-masing komposisi.

Tabel 2. Komposisi PIM dan hasil pengamatan kenampakan visual PIM

PIM	Komposisi	Transparan	Tipis	Tidak Berminyak	Fleksibel
P1	60% PVC dan 40% D2EHPA	✓	✓	✓	✗
P2	55% PVC, 40% D2EHPA, dan 5% AO	✓	✓	✓	✗
P3	50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO	✓	✓	✓	✓
P4	45% PVC, 40% D2EHPA, dan 15% AO	✓	✓	✗	✓
P5	40% PVC, 40% D2EHPA, dan 20% AO	✓	✓	✗	✓

Tabel 2 menunjukkan bahwa PIM yang dihasilkan dari komposisi P1 dan P2 bersifat transparan, tipis dan tidak berminyak. Namun demikian, kedua PIM tersebut bersifat sangat kaku dan tidak fleksibel yang menyebabkan PIM tersebut tidak memenuhi kriteria PIM yang ideal. Hal ini dikarenakan PIM dengan komposisi P1 tidak mengandung *plasticizer*, sedangkan P2 mengandung *plasticizer* dalam jumlah yang sangat kecil. Tujuan penggunaan *plasticizer* adalah untuk meningkatkan fleksibilitas membran. Dengan demikian semakin kecil kandungan *plasticizer* dalam PIM, akan semakin kaku PIM yang terbentuk. Hal ini sesuai dengan penelitian Sadiq *et al.*, (2023) yang menjelaskan bahwa membran tanpa penambahan *plasticizer* ataupun penambahan *plasticizer* dalam jumlah yang sangat kecil menghasilkan membran yang tidak fleksibel (kaku) [25]. Sebaliknya, dari hasil pengamatan PIM dengan komposisi 50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO membentuk membran yang memenuhi kriteria PIM yang ideal yaitu transparan, tipis, tidak berminyak dan fleksibel.

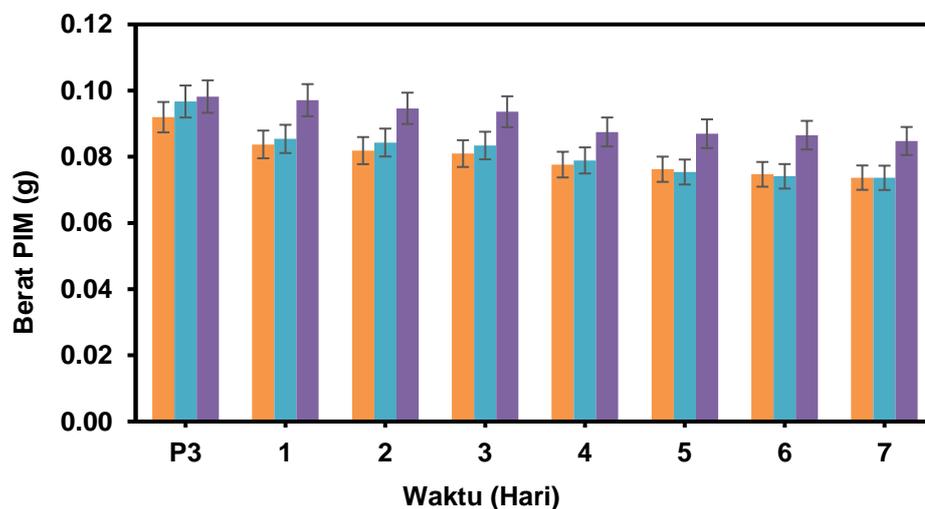
Hasil pengamatan terhadap PIM P4 dan P5 menunjukkan bahwa PIM dengan kedua komposisi tersebut tidak memenuhi kriteria PIM yang ideal karena membran yang dihasilkan memiliki permukaan yang berminyak. Hal ini disebabkan karena kandungan *plasticizer* yang berlebih yang menyebabkan terjadinya migrasi *plasticizer* dari dalam ke permukaan PIM. Hal ini bersesuaian dengan penelitian yang dilakukan oleh Wang *et al.*, (2016) sebelumnya yang menunjukkan bahwa PIM dengan kandungan *plasticizer* yang tinggi akan menyebabkan membran kehilangan stabilitas fisik dikarenakan *plasticizernya* cenderung untuk terlepas dan bermigrasi ke permukaan membran [26]. Oleh karena itu, PIM dengan komposisi P3 yaitu komposisi 50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO dipilih sebagai komposisi optimum dan PIM ini selanjutnya digunakan untuk uji parameter lain. PIM yang diproduksi dengan komposisi optimum P3 disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. PIM P3 yang diproduksi dengan komposisi optimum 50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO

Uji Stabilitas PIM

Salah satu faktor penting yang menentukan kemampuan dan masa pakai PIM dalam pemisahan analit adalah stabilitas membran. Dalam berbagai proses pemisahan kimia, PIM sering diaplikasikan untuk pemisahan dalam kondisi asam seperti HCl [27]. Oleh karena itu, penting untuk dilakukan uji stabilitas PIM yang dikembangkan dalam penelitian ini dengan komposisi 50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO dalam kondisi asam (2,5 M HCl) [23]. Uji stabilitas PIM dilakukan untuk mengevaluasi kinerja dan daya tahan jangka panjang PIM. Penurunan performa PIM dalam penggunaan jangka panjang berkaitan erat dengan dengan ketidakstabilan membran yang diakibatkan hilangnya fasa cair membran, terutama ekstraktan dan *plasticizer* ke larutan yang mengalami kontak langsung dengan PIM. Hal ini biasanya ditandai dengan penurunan berat membran setelah digunakan pada proses ekstraksi [28].



Gambar 2. Berat PIM pada uji stabilitas dalam HCl 2,5 M (■), dalam air (■), dan di udara terbuka (■) selama tujuh hari

Dalam penelitian ini, kestabilan PIM diuji selama 7 hari dengan merendam PIM dalam 100 mL 2,5 M HCl dan menimbang berat masing-masing PIM pada interval 1 hari (24 jam) perendaman. Sebagai pembandingan, PIM dengan komposisi yang sama juga diuji kestabilannya dalam dua kondisi berbeda: (1) direndam di dalam air dan (2) dibiarkan pada udara terbuka selama 7 hari. Persentase berat PIM rata-rata yang hilang selama 7 hari disajikan pada Gambar 2.

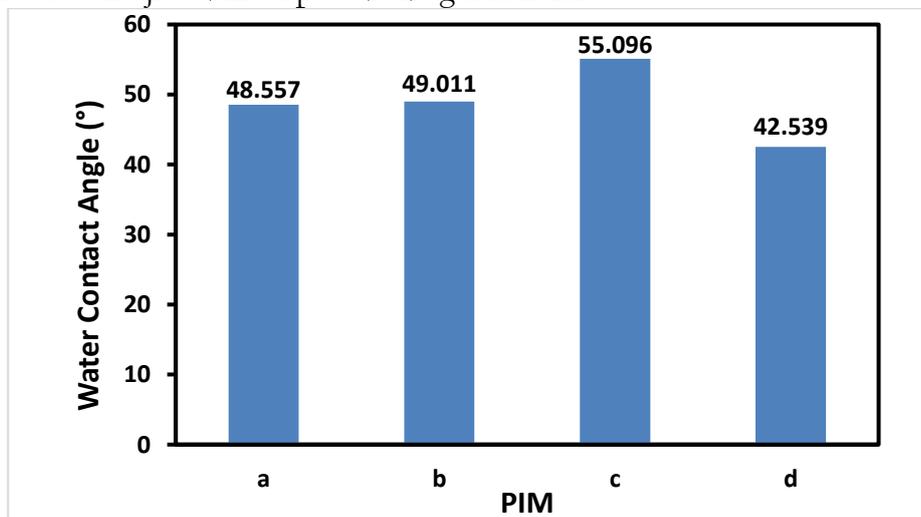
Gambar 2 menunjukkan bahwa PIM yang dibiarkan di udara terbuka (suhu ruang) cenderung lebih stabil dibandingkan dengan PIM yang diuji kestabilannya dalam kedua kondisi yang lain (HCl 2,5 M dan air). Gambar 2 juga menunjukkan bahwa berat PIM yang dibiarkan di udara terbuka menurun dari 0,0982 gram di hari pertama menjadi 0,0848 gram di hari ketujuh. Pengurangan berat PIM ini sebanding dengan penurunan berat PIM sebesar 13,69%. PIM yang direndam di dalam HCl 2,5 M mengalami penurunan berat dari 0,0920 gram di hari pertama menjadi 0,0737 gram di hari ketujuh. Sementara itu, PIM yang direndam di dalam air mengalami penurunan berat dari 0,0967 gram di hari pertama menjadi 0,0736 gram di hari ketujuh. Secara ringkas PIM yang direndam di dalam 2,5 M HCl dan air selama 7 hari berturut-turut mengalami penurunan masing-masing sebesar 19,89% dan 23,88%. Hal ini menunjukkan bahwa PIM yang direndam dalam HCl sedikit lebih stabil dibandingkan dengan PIM yang direndam di dalam air.

Hasil penelitian ini secara umum menunjukkan bahwa PIM dengan komposisi optimum 50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO lebih stabil di dalam pelarut yang bersifat asam dibandingkan dalam pelarut netral seperti air. Hal ini dikarenakan dalam suasana asam, D2EHPA akan cenderung berada dalam kondisi terprotonasi sehingga lebih stabil jika berada dalam larutan asam. Dalam suasana netral dan basa, D2EHPA akan cenderung terdeprotonasi dan memudahkannya untuk larut dalam air. Selain itu, penurunan berat PIM yang lebih besar dalam larutan berair yang netral dibandingkan dalam larutan asam berkaitan erat dengan kelarutan D2EHPA dalam kedua kondisi tersebut. Dalam larutan netral diketahui kelarutan D2EHPA lebih besar dibandingkan dengan kelarutannya dalam larutan yang bersifat asam. Hal ini sesuai dengan penelitian Zhang *et al.*, (2012) dan Kagaya *et al.*, (2012) yang menyatakan bahwa kelarutan D2EHPA dalam larutan netral adalah sebesar 35%, sedangkan dalam larutan asam adalah sebesar 7% [27, 29]. Kedua faktor tersebut menjadi faktor utama yang menentukan kestabilan PIM dengan komposisi 50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO dalam larutan 2,5 M HCl. Penurunan berat PIM selama uji stabilitas secara umum dikarenakan terlepasnya komponen fasa cair PIM yakni ekstraktan dan *plasticizer* ke larutan yang mengalami kontak langsung dengan PIM [21].

Karakterisasi PIM sebelum dan sesudah uji satbilitas

Sudut Kontak Air (*Water Contact Angle*)

Sudut kontak air merupakan salah satu sifat fisika PIM yang penting untuk memahami sifat hidrofobik dan hidrofilik dari membran yang dapat mempengaruhi kinerja membran. Sudut kontak air biasanya tergantung pada sifat rantai polimer pendukung dan fasa cair yang terdapat dalam membran. Semakin rendah sudut kontak ($< 90^\circ$) berarti semakin tinggi hidrofilitasnya, sebaliknya semakin tinggi nilai sudut kontak ($> 90^\circ$) berarti semakin tinggi hidrofobitasnya [30]. Gambar 3 menunjukkan hasil analisis sudut kontak air pada PIM dengan komposisi optimum P3 sebelum dan sesudah uji stabilitas pada berbagai kondisi.

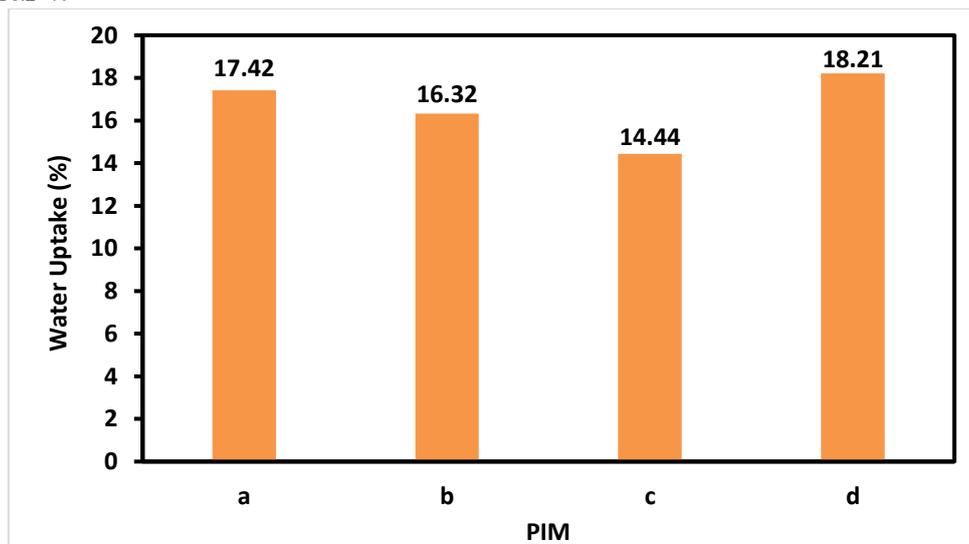


Gambar 3. Hasil pengukuran *Water Contact Angle* PIM P3 (a) sebelum uji stabilitas, setelah uji stabilitas dalam HCl 2,5 M (b), air (c) dan udara (d)

Gambar 3 menunjukkan nilai sudut kontak dari P3 dengan komposisi 50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO baik sebelum dan sesudah uji stabilitas untuk membandingkan perubahan sudut kontak dari PIM. Dari Gambar 3, terlihat bahwa nilai sudut kontak air P3 sebelum uji stabilitas adalah $48,557^\circ$, yang menunjukkan sifat hidrofilik dari PIM dengan komposisi 50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO. Hasil penelitian ini bersesuaian dengan penelitian Govindappa *et al.*, (2022) yang menemukan bahwa sudut kontak PIM dengan komposisi 50% PVC, 40% benzalkonium chloride (BAC), dan 10% dioctyl phtalate (DOP) bernilai $18,7^\circ$ [31]. Nilai sudut kontak yang lebih kecil dari 90° dikarenakan oleh adanya kandungan komponen ekstraktan dan plasticizer dalam PIM yaitu D2EHPA dan AO yang bersifat hidrofilik. Secara struktur, dikaitkan dengan interaksi yang kuat dari gugus fosfat pada D2EHPA dan gugus karboksilat pada AO dengan gugus klorin dari PVC [32]. Hasil pengukuran WCA menunjukkan bahwa untuk PIM pembanding yang dibiarkan selama 7 hari di udara terbuka memiliki nilai sudut kontak sebesar $42,539^\circ$. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sudut kontak PIM yang diuji tidak mengalami perubahan yang sangat signifikan yang ditunjukkan oleh penurunan berat PIM yang tidak signifikan.

Serapan Air (*Water Uptake*)

Water uptake atau serapan air merupakan salah satu karakteristik fisika PIM yang juga dapat digunakan untuk menentukan tingkat hidrofilitas dan hidrofobitas dari membran. Semakin hidrofilik, semakin besar kapasitas PIM untuk menyerap air. Sebaliknya, semakin hidrofobik, semakin kecil kapasitas PIM untuk menyerap air [33]. Hasil pengukuran *water uptake* dapat dilihat pada Gambar 4.



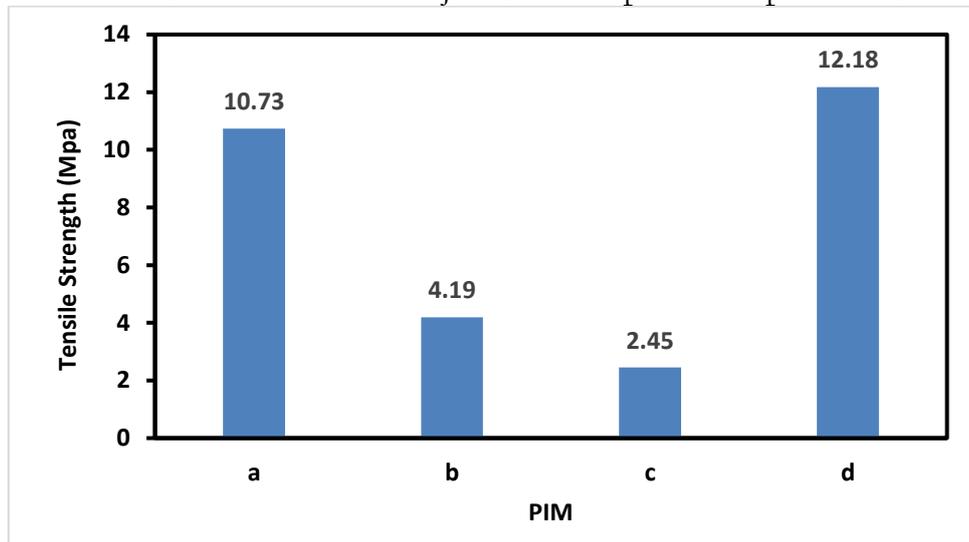
Gambar 4. Hasil pengukuran *water uptake* PIM P3 (a) sebelum uji stabilitas, setelah uji stabilitas dalam HCl 2,5 M (b), air (c) dan udara (d)

Gambar 4 menunjukkan hasil pengukuran serapan air pada P3 dengan komposisi 50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO baik sebelum maupun sesudah uji stabilitas. Persentase serapan air pada PIM sebelum uji stabilitas sebesar 17,42%. Hal ini menunjukkan bahwa PIM yang dihasilkan dari komposisi 50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO bersifat hidrofilik. Hasil penelitian ini bersesuaian dengan Husna *et al.*, (2022) yang menemukan bahwa PIM dengan komposisi 50% PVDF-co-HFP, 40% D2EHPA, dan 10% DOP memiliki kemampuan penyerapan air sebesar 10,25% [34]. Sementara itu, persentase serapan air untuk PIM sesudah uji stabilitas untuk kedua kondisi HCl 2,5 M dan air tidak berbeda secara signifikan dengan nilai serapan air untuk PIM sebelum uji stabilitas yakni sebesar 16,32% dan 14,44%. Selain itu, untuk PIM pembanding yang dibiarkan di udara terbuka memiliki nilai serapan air sebesar 18,21%. Penurunan nilai *water uptake* untuk PIM setelah uji stabilitas dalam HCl 2,5 M dan air berkaitan dengan terlepasnya komponen fasa cair membran yang bersifat hidrofilik pada saat direndam dalam 2,5 M HCl dan air [35].

Sementara itu, kenaikan nilai *water uptake* untuk PIM pembanding yang dibiarkan pada udara terbuka dikarenakan adanya kemungkinan terjadi kontak langsung antara PIM dengan udara luar yang menyebabkan terperangkapnya uap air ke dalam membran, yang menyebabkan nilai serapan airnya lebih besar dan membran bersifat lebih hidrofilik.

Kekuatan Tarik (*Tensile Strength*)

Pengujian kekuatan tarik PIM yang bertujuan untuk mengetahui kekuatan membran apabila diberikan gaya tarik dengan besaran tertentu. Hasil pengukuran kekuatan tarik PIM yang diperoleh untuk PIM sebelum dan sesudah uji stabilitas dapat dilihat pada Gambar 5.

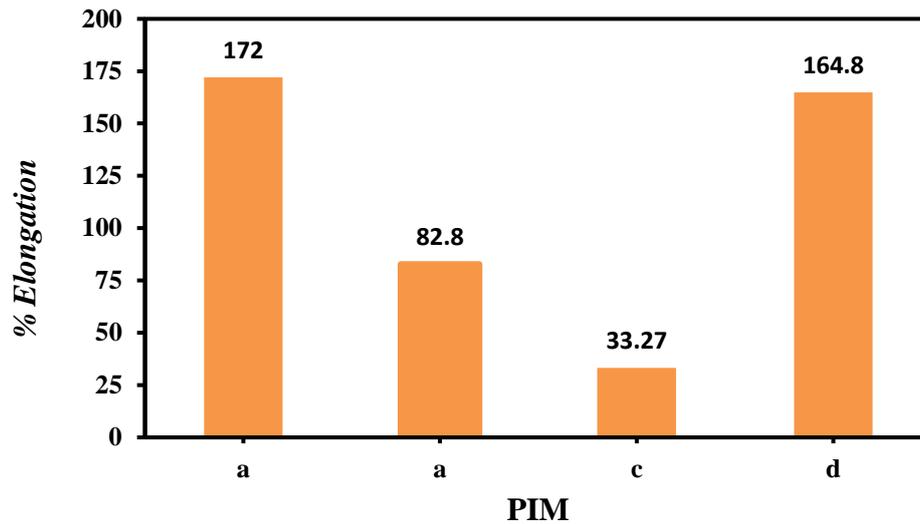


Gambar 5. Hasil pengukuran *tensile strength* PIM P3 (a) sebelum uji stabilitas, setelah uji stabilitas dalam HCl 2,5 M (b), air (c) dan udara (d)

Gambar 5 menunjukkan nilai kekuatan tarik dari P3 sebelum uji stabilitas adalah 10,73 MPa. Hal tersebut terjadi karena interaksi antara *plasticizer* AO dengan polimer pendukung dapat mengurangi gaya intermolekuler pada rantai polimer PVC sehingga meningkatkan fleksibilitas membran dan memperlebar jarak antarmolekul, serta mengurangi ikatan hidrogen pada rantai polimer PVC [36]. Sementara itu, nilai kekuatan tarik untuk PIM sesudah uji stabilitas untuk kedua kondisi uji stabilitas (HCl 2,5 M dan air) tidak berbeda secara signifikan yakni sebesar 4,19 MPa dan 2,45 MPa. Penurunan nilai kekuatan tarik dari PIM sebelum dan sesudah uji stabilitas pada kedua kondisi tersebut dapat dikarenakan hilangnya komponen fasa cair pada PIM sehingga menyebabkan kekuatan tarik yang dihasilkan menjadi lebih kecil. Selain itu, hasil pengukuran menunjukkan nilai kuat tarik untuk PIM pembanding yang dibiarkan di udara terbuka tidak berbeda nyata dengan nilai kuat tarik PIM sebelum uji stabilitas yakni sebesar 12,18 MPa.

Persentase Pemanjangan (*% Elongation*)

Sifat fisika lainnya yang penting pada PIM yaitu persentase pemanjangan atau *% elongation*. Pengujian ini dilakukan bersamaan dengan pengukuran kekuatan tarik membran. Persentase pemanjangan merupakan persen pertambahan panjang PIM maksimum pada saat memperoleh gaya tarik sampai membran putus dibandingkan dengan panjang awal [17]. Persentase pemanjangan PIM berbanding terbalik dengan kekuatan tarik, dimana semakin besar persentase pemanjangan, semakin kecil nilai kekuatan tarik pada PIM. *Elongation* bertujuan untuk mengetahui tingkat elastisitas membran saat membran terjadi perpanjangan putus. Hasil pengukuran pemanjangan PIM dapat dilihat pada Gambar 6.

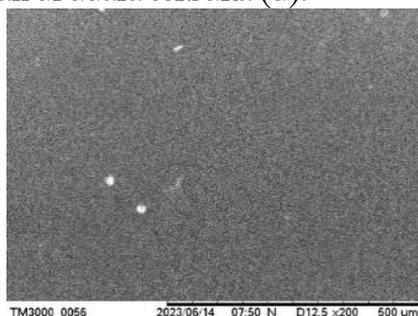


Gambar 6. Hasil pengukuran % elongation PIM P3 (a) sebelum uji stabilitas, setelah uji stabilitas dalam HCl 2,5 M (b), air (c) dan udara (d)

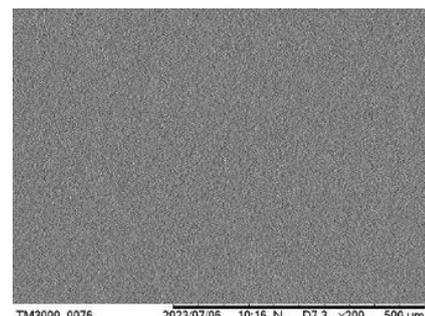
Gambar 6 menunjukkan pengaruh ekstrak D2EHPA dan *plasticizer* AO terhadap persen pemanjangan PIM yang dihasilkan. Gambar 6 menunjukkan bahwa nilai persen pemanjangan untuk PIM sebelum uji stabilitas sebesar 172%. Besarnya nilai persen pemanjangan terjadi karena terperangkapnya ekstrak D2EHPA dan *plasticizer* AO ke dalam polimer pendukung PVC yang mengakibatkan melemahnya gaya tarik intermolekul rantai polimer yang berdekatan sehingga meningkatkan fleksibilitas dari membran. Akibatnya nilai persen pemanjangan menjadi sangat besar [37]. Sementara itu, persen pemanjangan untuk PIM sesudah uji stabilitas untuk kedua kondisi uji stabilitas (HCl 2,5 M dan air) adalah sebesar 82,8% dan 33,27%. Pengurangan nilai persen pemanjangan ini dikarenakan terlepasnya fasa cair seperti ekstrak dan *plasticizer* yang terperangkap di dalam rantai polimer pendukung ke dalam larutan yang mengalami kontak langsung dengan PIM. Terlepasnya komponen fase cair PIM menyebabkan PIM kehilangan sifat plastisitas dan fleksibilitas yang menyebabkan pengurangan nilai persen pemanjangan dari PIM. Akibatnya, PIM akan lebih mudah putus oleh gaya tarikan yang diberikan dari luar. Selain itu, hasil pengukuran menunjukkan nilai persen pemanjangan untuk PIM pembanding yang dibiarkan di udara terbuka tidak berbeda nyata dengan nilai kuat tarik PIM sebelum uji stabilitas yakni sebesar 164,8 %.

Karakterisasi PIM menggunakan SEM

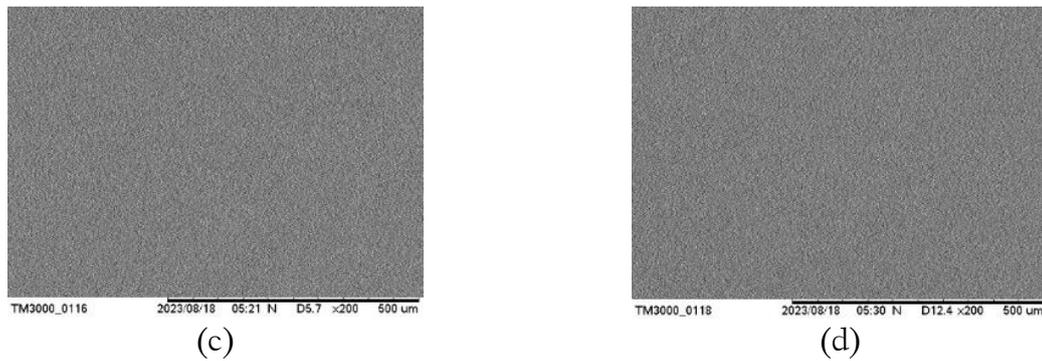
Karakterisasi PIM menggunakan SEM bertujuan untuk mengetahui morfologi permukaan PIM. Selain itu, karakterisasi menggunakan SEM juga bertujuan untuk mengidentifikasi distribusi komponen fasa cair yaitu ekstrak dan *plasticizer* pada rantai polimer pendukung yang dapat mempengaruhi efisiensi transpor membran [1]. Gambar 7 menunjukkan hasil SEM dari P3 dengan komposisi 50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO sebelum (a) dan sesudah diuji kestabilannya dalam HCl 2,5 M (b), sesudah diuji kestabilannya dalam air (c), dan setelah dibiarkan di udara terbuka (d).



(a)



(b)

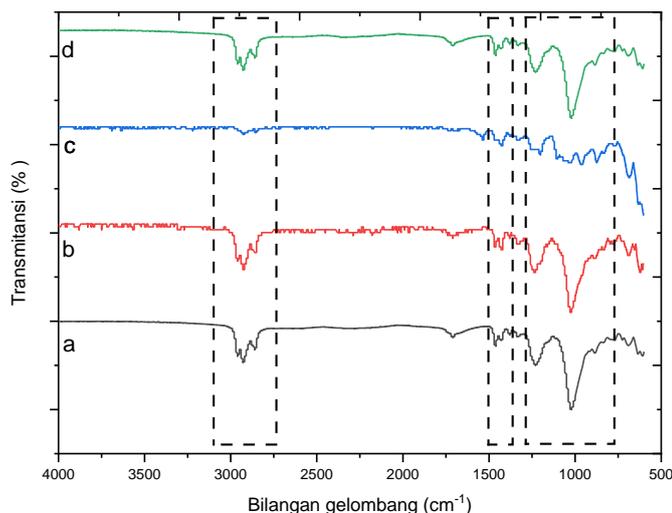


Gambar 7. Hasil SEM pada perbesaran 200x PIM P3 (a) sebelum uji stabilitas, setelah uji stabilitas dalam HCl 2,5 M (b), air (c) dan udara (d)

Dari hasil SEM yang diperoleh pada Gambar 7, tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara PIM sebelum uji stabilitas maupun sesudah uji stabilitas dalam HCl 2,5 M, uji stabilitas dalam air, maupun PIM yang dibiarkan di udara terbuka. Gambar SEM PIM sebelum uji stabilitas (Gambar 7a) menunjukkan permukaan membran tampak padat dengan beberapa pori kecil. Hal ini disebabkan oleh terdistribusinya fase cair (ekstraktan dan *plasticizer*) secara merata pada polimer pendukung yang meningkatkan porositas membran serta jumlah pori-pori yang ditemukan pada permukaan membran [38]. Hasil yang sama diperoleh untuk PIM yang diuji kestabilannya dalam dua kondisi yang berbeda yakni dalam HCl 2,5 M dan air maupun PIM pembanding yang dibiarkan pada udara terbuka dengan tampilan morfologi permukaan yang halus dan padat. Hal ini secara umum menunjukkan kompatibilitas yang baik antara komponen membran yang menunjukkan bahwa pori-pori tersebut telah terisi dengan fasa cair yakni ekstraktan dan *plasticizer*. Penelitian ini bersesuaian dengan Ling *et al.*, (2017) yang menemukan bahwa PIM dengan komposisi 50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% DOP menunjukkan morfologi PIM yang homogen dengan pori-pori yang kecil [39]. Secara teori, perubahan struktur membran PIM menjadi pendorong peningkatan pergerakan ion melalui membran karena D2EHPA menyediakan saluran mikro dalam struktur membran dan mempercepat pergerakan ion. Selain itu, AO meningkatkan kekuatan mekanik membran karena terikat dengan rantai polimer PVC, mengindikasikan bahwa PIM memiliki kekuatan mekanik yang baik. Selain itu, semua PIM menunjukkan permukaan yang tidak berminyak, yang menyatakan kompatibilitas yang baik antara polimer pendukung yang digunakan dan fasa cair dari PIM yaitu ekstraktan dan *plasticizer* [40].

Karakterisasi PIM menggunakan FTIR

Karakterisasi menggunakan FTIR bertujuan untuk mengidentifikasi gugus fungsi komponen kimia penyusun PIM dan juga untuk mengidentifikasi jenis interaksi yang terjadi antar komponen kimia penyusun PIM. Ini dilakukan dengan membandingkan serapan-serapan pada spektra FTIR PIM dengan serapan-serapan pada spektra FTIR komponen tunggal penyusun PIM. Analisis menggunakan FTIR juga dilakukan pada PIM sesudah uji stabilitas yang bertujuan untuk membandingkan gugus-gugus fungsi yang terdapat pada PIM sebelum dan sesudah uji stabilitas dalam HCl 2,5 M, uji stabilitas dalam air, maupun yang dibiarkan pada udara terbuka selama 7 hari.



Gambar 8. Spektra FTIR PIM P3 (a) sebelum uji stabilitas, setelah uji stabilitas dalam HCl 2,5 M (b), air (c) dan udara (d)

Gambar 8 menunjukkan spektra FTIR PIM dengan komposisi 50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO (a) sebelum uji stabilitas, setelah uji stabilitas dalam HCl 2,5 M (b), air (c) dan udara (d) selama 7 hari. Gambar 8a menunjukkan spektra FTIR dari *fresh* PIM sebelum diuji stabilitasnya. Spektra tersebut menunjukkan beberapa puncak karakteristik PVC, D2EHPA dan AO yang bersesuaian dengan puncak-puncak karakteristik dari komponen tunggal penyusun membran (Tabel 3). Pita serapan yang dihasilkan pada spektra di atas menunjukkan beberapa puncak karakteristik untuk PVC seperti gugus fungsi C-H dan C-H₂ *stretching* pada 2960 cm⁻¹ dan 2860 cm⁻¹. Selanjutnya, terdapat puncak tajam pada bilangan gelombang 1430 cm⁻¹ hingga 1340 cm⁻¹ yang menunjukkan pembengkokan C-H. Selain itu, pita serapan pada bilangan gelombang 695 cm⁻¹ menunjukkan peregangan ikatan C-Cl dan pita serapan pada bilangan gelombang 611 cm⁻¹ merupakan gugus C-H *wagging*. Spektra FTIR PIM (Gambar 8a) juga menunjukkan beberapa puncak karakteristik dari D2EHPA seperti peregangan P-O dan P=O pada 1020 dan 1230 cm⁻¹. Selanjutnya, ditemukan juga puncak karakteristik untuk gugus CH₂ (*twisting*) yang ditunjukkan pada pita serapan 1377 cm⁻¹, kemudian getaran yang dihasilkan dari gugus O-H ditunjukkan pada bilangan gelombang 1695 cm⁻¹. Karakteristik gugus CH₂ deformasi ditunjukkan pada pita serapan 1463 cm⁻¹. Selain itu, pita serapan pada daerah 2965 cm⁻¹ juga menunjukkan adanya gugus CH₂ (*stretching*) [41]. Spektra FTIR PIM di atas (Gambar 8a) juga menunjukkan puncak karakteristik untuk AO seperti adanya gugus C=O pada pita serapan 1723 cm⁻¹. Spektra FTIR yang diperoleh dari hasil pengukuran PIM menunjukkan bahwa tidak ada interaksi kimia yang terjadi antara ketiga komponen kimia penyusun PIM. Hal ini ditandai dengan adanya puncak karakteristik komponen tunggal penyusun PIM pada spektra hasil pengukuran FTIR PIM.

Gambar 8b menunjukkan spektra FTIR yang menunjukkan puncak-puncak karakteristik PIM setelah diuji kestabilannya dalam HCl 2,5 M selama 7 hari. Spektra IR PIM ini (Gambar 8b) menunjukkan kemiripan dibandingkan dengan spektra IR sebelum diuji stabilitasnya (Gambar 8a) di mana semua puncak-puncak karakteristik PVC, D2EHPA dan AO tetap terlihat dengan sedikit pengurangan intensitas. Gambar 8b menunjukkan puncak-puncak utama komponen-komponen penyusun PIM yang dihasilkan tetap terlihat seperti gugus C-H, gugus C-H₂ *stretching*, gugus P-O, gugus C=O, gugus C-Cl dan gugus C-H *wagging*.

Gambar 8c menunjukkan spektra FTIR dari PIM sesudah uji stabilitas di dalam air selama 7 hari. Spektra FTIR PIM ini (Gambar 8c) menunjukkan absennya hampir semua puncak karakteristik PIM yang menunjukkan keberadaan komponen tunggal fasa cair PIM (D2EHPA dan AO). Spektra FTIR PIM setelah uji stabilitas dalam air selama 7 hari hanya menunjukkan adanya gugus peregangan C-Cl pada 694 cm⁻¹ dan gugus C-H *wagging* pada 610 cm⁻¹. Hal ini

mengindikasikan telah terlepasnya komponen fasa cair (D2EHPA dan AO) dari PIM selama proses uji stabilitas (perendaman) dalam air selama 7 hari. Hal ini dimungkinkan terjadi karena adanya migrasi komponen kimia membran seperti D2EHPA dan AO dari dalam PIM ke air yang mengalami kontak langsung, karena gugus-gugus polar yang dimiliki oleh D2EHPA yaitu gugus fosfat ($\text{PO}(\text{OH})_2$) dan AO yang memiliki gugus karboksilat ($-\text{COOH}$) berinteraksi dengan air yang memiliki sifat polar melalui gaya tarik elektrostatik [21, 40].

Gambar 8d menunjukkan spektra FTIR PIM yang diukur setelah dibiarkan pada udara terbuka selama 7 hari. Spektra FIR PIM yang dibiarkan pada udara terbuka selama 7 hari tersebut (Gambar 8d) menunjukkan kemiripan dengan spektra FTIR PIM sebelum uji stabilitas (Gambar 8a). Spektra ini menunjukkan puncak-puncak karakteristik dari komponen tunggal penyusun PIM seperti puncak-puncak karakteristik PVC, D2EHPA dan AO yang terlihat pada spektra FTIR PIM sebelum diuji stabilitasnya (Tabel 3). Hal ini menunjukkan bahwa PIM dengan komposisi 50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO cukup stabil saat dibiarkan pada udara terbuka selama 7 hari. Hasil pengukuran FTIR ini bersesuaian dengan uji penurunan berat dimana membran yang direndam di dalam air mengalami penurunan berat paling besar, yang menunjukkan bahwa lebih banyak komponen kimia atau fasa cairnya yang hilang dibandingkan dengan kehilangan berat PIM yang direndam dalam HCl 2,5 M.

Tabel 3. Puncak Serapan Gugus Fungsi PIM

PIM	Bilangan Gelombang (cm^{-1})	Gugus Fungsi	Keterangan
P3 (50% PVC, 40%D2EHPA, dan 10% AO)	2960-2860	C-H dan $-\text{CH}_2$ stretching	P3
	1710	C=O	
	1640-1465	C-C	
	1430 & 1340	Pembengkokan C-H	
	1325	$-\text{CH}_2$	
	1230	P=O	
	1020	P-O	
	695	C-Cl	
	607	Goyangan C-H	
D2EHPA	2925	$-\text{CH}_2$ (stretching)	[38, 41]
	1463	$-\text{CH}_2$ (deformasi)	
	1695	$-\text{OH}$	
	1377	$-\text{CH}_2$ (twisting)	
	1230	P=O	
	1020	P-O	
AO	1723	C=O	[39]

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan komposisi optimum yang diperoleh pada pembuatan PIM dari polimer pendukung PVC, ekstrak D2EHPA, dan *plasticizer* AO yaitu pada membran P3 dengan komposisi 50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO. PIM yang dihasilkan menunjukkan karakteristik fisik yang ideal seperti tipis, transparan, fleksibel dengan permukaan yang tidak berminyak. Hasil karakterisasi menggunakan FTIR menunjukkan tidak adanya interaksi kimia diantara komponen kimia penyusun PIM, sementara karakterisasi menggunakan SEM menunjukkan bahwa PIM yang dibuat memiliki morfologi permukaan yang tampak padat, halus dan homogen yang mengindikasikan fase cair PIM telah terdistribusi merata pada polimer pendukung. Hasil uji stabilitas berturut-turut menunjukkan penurunan berat PIM yang direndam dalam HCl 2,5 M, air dan dibiarkan pada udara terbuka selama 7 hari sebesar 19,89%, 23,88%, 13,69%. Hasil ini menunjukkan bahwa PIM lebih stabil dalam kondisi asam dibandingkan dalam larutan berair (netral). Perbandingan karakteristik kimia PIM sebelum

dan setelah uji stabilitas menunjukkan PIM yang direndam di dalam air mengalami kehilangan fase cair selama proses uji stabilitas. Sebaliknya PIM yang direndam di dalam HCl 2,5 M dan dibiarkan pada udara terbuka memiliki karakteristik spektra yang mirip dengan spektra FTIR PIM sebelum diuji stabilitasnya. Perbedaan ini juga terkonfirmasi melalui perbedaan karakteristik fisika PIM sebelum dan sesudah uji stabilitas yang meliputi *water contact angle*, *water uptake*, *tensile strength* dan *% elongation*. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa PIM dengan komposisi optimum 50% PVC, 40% D2EHPA, dan 10% AO disarankan untuk digunakan dalam pemisahan pada kondisi asam untuk mempertahankan stabilitas dan efisiensi pemisahannya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LP2M), Universitas Nusa Cendana, yang telah menyediakan dana dan dukungan untuk penelitian ini melalui skema Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi (PDUPT) tahun 2024. Penulis juga berterima kasih untuk dukungan fasilitas untuk penelitian ini yang diberikan oleh Laboratorium Kimia, Fakultas Sains dan Teknik dan Laboratorium Terpadu Biosains, Universitas Nusa Cendana.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nghiem LD, Mornane P, Potter ID, Perera J, Cattrall RW, and Kolev SD. Extraction and transport of metal ions and small organic compounds using polymer inclusion membranes (PIMs). *Journal of Membrane Science*. 2006;281(1-2):7-41. DOI:10.1016/j.memsci.2006.03.035
- [2] Kuswandi B, Nitti F, Almeida MIG, and Kolev SD. Water monitoring using polymer inclusion membranes: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2020;18(1):129-150. DOI:10.1007/s10311-019-00930-9
- [3] Kiswandono AA, Sindiani AV, Khotimah RK, Rabbani MB, Kurniawan B, Rinawati R, and Putra HE. Transport of malachite green using the polyeugenol-based polymer inclusion membrane (PIM) method. *Journal of Membrane Science and Research*. 2024;10(1):2013382. DOI:10.22079/jmsr.2023.2013382.1635
- [4] Nitti F, Almeida MIGS, Morrison R, Cattrall RW, Pettigrove VJ, Coleman RA, and Kolev SD. Development of a portable 3D-printed flow-through passive sampling device free of flow pattern effects. *Microchemical Journal*. 2018;143:359-366. DOI:10.1016/j.microc.2018.08.029
- [5] Nitti F, Almeida MIGS, Morrison R, Cattrall RW, Pettigrove VJ, Coleman RA, and Kolev SD. Flow-through passive sampler for zinc in freshwaters free from flow pattern, water cationic composition and temperature effects. *Microchemical Journal*. 2022;177:107294. DOI:10.1016/j.microc.2022.107294
- [6] Almeida MIGS, Cattrall RW, and Kolev SD. Recent trends in extraction and transport of metal ions using polymer inclusion membranes (PIMs). *Journal of Membrane Science*. 2012;415-416:9-23. DOI:10.1016/j.memsci.2012.06.006
- [7] Almeida MIGS, Cattrall RW, and Kolev SD. Polymer inclusion membranes (PIMs) in chemical analysis - A review. *Analytica Chimica Acta*. 2017;987:1-14. DOI:10.1016/j.aca.2017.07.032
- [8] Hoque B, Bobrowska DM, and Poltorak L. Advantage of 3D printed casting mold induced microstructure on the extraction and transport of Cd (II) through polymer inclusion membranes. *Separation and Purification Technology*. 2024;328:124998. DOI:10.1016/j.seppur.2023.124998
- [9] Zulkefeli NSW, Weng SK, and Abdul Halim NS. Removal of heavy metals by polymer inclusion membranes. *Current Pollution Reports*. 2018;4(2):84-92. DOI:10.1007/s40726-018-0091-y

- [10] Kiswandono AA, Rinawati R, Agustina W, Hadi N, Nurhasanah N, Rahmawati A, Nitti F, and Lusiana RA. Transport of phenol using supported liquid membrane containing Eugenol cross-linked by diallyl phthalate or divinyl benzene as a carrier. *Journal of Membrane Science and Research*. 2024;10(2);-. DOI:10.22079/jmsr.2024.2009799.1626
- [11] Aini HN, Rumhayati B, Fardiyah Q, Wiryawan A, Andayani U, and Azzah AN. The performance and characterization of polymeric inclusion membranes (PIMs) containing 2-nitro phenyl octyl ether as plasticizer on phosphate transport. *Jurnal Kimia Valensi*. 2022;8(2):178-189. DOI:10.15408/jkv.v8i2.27094
- [12] Olasupo A and Suah FBM. Recent advances in the removal of pharmaceuticals and endocrine-disrupting compounds in the aquatic system: A case of polymer inclusion membranes. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;406:124317. DOI:10.1016/j.jhazmat.2020.124317
- [13] Rumhayati B, Wiryawan A, Dinira L, and Afifah S. Fabrication and characterization of passive sampler using polymeric inclusion membrane (PIM) as diffusion layer for phosphate measurement. *Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia*. 2021;6(1):29-38. DOI:10.20961/jkpk.v6i1.49825
- [14] Nitti F. Development of flow-through devices for passive sampling of zinc (II) in aquatic systems free from environmental effects. Dissertation, The University of Melbourne. 2020.
- [15] Nitti F, Selan OTE, Hoque B, Tambaru D, and Djunaidi MC. Improving the performance of polymer inclusion membranes in separation process using alternative base polymers: A review. *Indonesian Journal of Chemistry*. 2022;22(1):284-302. DOI:10.22146/ijc.68311
- [16] Zhao S, Samadi A, Wang Z, Pringle JM, Zhang Y, and Kolev SD. Ionic liquid-based polymer inclusion membranes for metal ions extraction and recovery: Fundamentals, considerations, and prospects. *Chemical Engineering Journal*. 2024;481:148792. DOI:10.1016/j.cej.2024.148792
- [17] Alcalde B, Elias G, Kolev SD, Méndez JA, Díez S, Oliver-Ortega H, Anticó E, and Fontàs C. A comprehensive study on the effect of plasticizers on the characteristics of polymer inclusion membranes (PIMs): Exploring butyl stearate as a promising alternative. *Membranes*. 2024;14(1):19. DOI:10.3390/membranes14010019
- [18] Keskin B, Zeytuncu-Gökoğlu B, and Koyuncu I. Polymer inclusion membrane applications for transport of metal ions: A critical review. *Chemosphere*. 2021;279:130604. DOI:10.1016/j.chemosphere.2021.130604
- [19] Bahrami S, Dolatyari L, Shayani-Jam H, and Yaftian MR. Membrane extraction of V(V) by an oleic acid plasticized poly(vinyl chloride)/Aliquat® 336 polymer inclusion membrane. *Journal of Applied Polymer Science*. 2022;139(26):e52434. DOI:10.1002/app.52434
- [20] Nitbani FO, Tjitda PJP, Nitti F, Jumina J, and Detha AIR. Antimicrobial properties of lauric acid and monolaurin in virgin coconut oil: A review. *ChemBioEng Reviews*. 2022;9(5):442-461. DOI:10.1002/cben.202100050
- [21] Argiropoulos G, Cattrall RW, Hamilton IC, Kolev SD, and Paimin R. The study of a membrane for extracting gold(III) from hydrochloric acid solutions. *Journal of Membrane Science*. 1998;138(2):279-285. DOI:10.1016/S0376-7388(97)00235-4
- [22] Kiswandono AA, Siswanta D, Aprilita NH, Santosa SJ, and Hayashita T. Extending the life time of polymer inclusion membrane containing copoly (Eugenol-DVB) as carrier for phenol transport. *Indonesian Journal of Chemistry*. 2013;13(3):254-261. DOI:10.22146/ijc.21285
- [23] Oluwasola IE, Ahmad AL, and Shoparwe NF. Preliminary study on the stability of self plasticised thin-flat pim for the extraction of 2-(4-isobutylphenyl) propanoic acid (Ibuprofen). *Journal of Membrane Science and Research*. 2022;8(4):553756. DOI:10.22079/jmsr.2022.553756.1546
- [24] Lailyningtyas DI and Ahmad AM. Uji mekanik bioplastik berbahan pati umbi ganyong (*Canna edulis*) dengan variasi selulosa asetat dan sorbitol. *Jurnal Keteknik Pertanian Tropis dan Biosistem*. 2020;8(1):91-100. DOI:10.21776/ub.jkptb.2020.008.01.09

- [25] Sadiq AC, Olasupo A, Rahim NY, Ngah WSW, Hanafiah MAKM, and Suah FBM. Fabrication and characterisation of novel chitosan-based polymer inclusion membranes and their application in environmental remediation. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023;244:125400. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2023.125400
- [26] Wang D, Hu J, Li Y, Fu M, Liu D, and Chen Q. Evidence on the 2-nitrophenyl octyl ether (NPOE) facilitating Copper(II) transport through polymer inclusion membranes. *Journal of Membrane Science*. 2016;501:228-235. DOI:10.1016/j.memsci.2015.12.013
- [27] Kagaya S, Ryokan Y, Cattrall RW, and Kolev SD. Stability studies of poly(vinyl chloride)-based polymer inclusion membranes containing Aliquat 336 as a carrier. *Separation and Purification Technology*. 2012;101:69-75. DOI:10.1016/j.seppur.2012.09.007
- [28] Cai C, Yang F, Zhao Z, Liao Q, Bai R, Guo W, Chen P, Zhang Y, and Zhang H. Promising transport and high-selective separation of Li (I) from Na (I) and K (I) by a functional polymer inclusion membrane (PIM) system. *Journal of Membrane Science*. 2019;579:1-10. DOI:10.1016/j.memsci.2019.02.046
- [29] Zhang LL, Cattrall RW, Ashokkumar M, and Kolev SD. On-line extractive separation in flow injection analysis based on polymer inclusion membranes: a study on membrane stability and approaches for improving membrane permeability. *Talanta*. 2012;97:382-387. DOI:10.1016/j.talanta.2012.04.049
- [30] Cardoso VF, Machado AR, Pinto VC, Sousa PJ, Botelho G, Minas G, and Lanceros-Méndez S. From superhydrophobic- to superhydrophilic-patterned poly(vinylidene fluoride-co-chlorotrifluoroethylene) architectures as a novel platform for biotechnological applications. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*. 2016;54(18):1802-1810. DOI:10.1002/polb.24099
- [31] Govindappa H, Bhat MP, Uthappa UT, Sriram G, Altalhi T, Prasanna Kumar S, and Kurkuri M. Fabrication of a novel polymer inclusion membrane from recycled polyvinyl chloride for the real-time extraction of arsenic (V) from water samples in a continuous process. *Chemical Engineering Research and Design*. 2022;182:145-156. DOI:10.1016/j.cherd.2022.03.052
- [32] Ji S, Gao C, Wang H, Liu Y, Zhang D, Zhang S, Lu X, Wu Y, and Hu Z. Application of a bio-based polyester plasticizer modified by hydrosilicon-hydrogenation reaction in soft PVC films. *Polymer Advanced Technology*. 2019;30(4):1126-1134. DOI:10.1002/pat.4546
- [33] Ji S, Gao C, Wang H, Liu Y, Zhang D, Zhang S, Lu X, Wu Y, and Hu Z. Application of a bio-based polyester plasticizer modified by hydrosilicon-hydrogenation reaction in soft PVC films. *Polymer Advanced Technology*. 2019;30(4):1126-1134. DOI:10.1002/pat.4546
- [34] Husna SM, Yusoff AH, Mohan M, Azmi NA, Ter TP, Shoparwe NF, and Sulaiman AZ. Effect of graphene oxide on the properties of polymer inclusion membranes for gold extraction from acidic solution. *Membranes*. 2022;12(10):996. DOI:10.3390/membranes12100996
- [35] Zhang C, Mu Y, Zhao S, Zhang W, and Wang Y. Lithium extraction from synthetic brine with high Mg^{2+}/Li^+ ratio using the polymer inclusion membrane. *Desalination*. 2020;496:114710. DOI:10.1016/j.desal.2020.114710
- [36] Li C, Jia Y, Lu X, and Chen H. Transport of Zn (II) through matrix enhanced polymer inclusion membrane containing OHA and D2EHPA. *Chemical Engineering Journal*. 2023;452:139288. DOI:10.1016/j.cej.2022.139288
- [37] Sellami F, Kebiche-Senhadji O, Marais S, Colasse L, and Fatyeyeva K. Enhanced removal of Cr(VI) by polymer inclusion membrane based on poly(vinylidene fluoride) and Aliquat 336. *Separation and Purification Technology*. 2020;248:117038. DOI:10.1016/j.seppur.2020.117038
- [38] Gherasim C, Cristea M, Grigoras C, and Bourceanu G. New polymer inclusion membrane. Preparation and characterization. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*. 2011;6(4):1499-1508. DOI:

- [39] Ling YY and Mohd Suah FB. Extraction of malachite green from wastewater by using polymer inclusion membrane. *Journal of Environtal Chemical Engineering*. 2017;5(1):785-794. DOI:10.1016/j.jece.2017.01.001
- [40] Dahdah H, Sellami F, Dekkouche S, Benamor M, and Senhadji-Kebiche O. Stability study of polymer inclusion membranes (PIMs) based on acidic (D2EHPA), basic (Aliquat 336) and neutral (TOPO) carriers: Effect of membrane composition and aqueous solution. *Polymer Bulletin*. 2022;80(6):6495-6525. DOI:10.1007/s00289-022-04362-4
- [41] Kebiche-Senhadji O, Mansouri L, Tingry S, Seta P, and Benamor M. Facilitated Cd(II) transport across CTA polymer inclusion membrane using anion (Aliquat 336) and cation (D2EHPA) metal carriers. *Journal of Membrane Science*. 2008;310(1-2):438-445. DOI:10.1016/j.memsci.2007.11.015