

Kinerja Membran *Polyethersulfone* (PES) Dalam Pemurnian Biodiesel Berbahan Baku Brondolan Sawit

Indah Prihatiningtyas^{1)*}, Muhammad Alfian Pahri¹⁾, Dhea Safira Aprilia¹⁾

¹⁾ Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Mulawarman

E-mail: indah.unmul@gmail.com

ABSTRAK

Melalui teknik inversi fase, menggunakan dimetil sulfoxida (DMSO) sebagai media pelarut. Karakterisasi menyeluruh dilakukan menggunakan Mikroskop Elektron Pemindaian (SEM) dan spektroskopi Inframerah Transformasi Fourier (FTIR) untuk memeriksa arsitektur morfologi membran, distribusi ukuran pori, dan gugus fungsi kimianya. Pengamatan SEM menunjukkan adanya struktur makropori dengan rongga yang relatif besar, menunjukkan panjang pori rata-rata 0,668 μm , yang mendorong peningkatan laju aliran permeat. Analisis FTIR memverifikasi integritas dan stabilitas kimia gugus fungsi PES yang khas, terutama gugus sulfonat ($-\text{SO}_2-$) dan ikatan $\text{C}=\text{C}$ aromatik. Penilaian efisiensi filtrasi menunjukkan permeabilitas membran yang konsisten dan penghilangan pengotor yang efisien, termasuk residu gliserol dan sabun. Kesimpulannya, meskipun formulasi PES 15% menghasilkan fluks tinggi karena sifatnya yang berpori, penyempurnaan tambahan—seperti penambahan aditif—disarankan untuk meningkatkan kemampuan pemisahan selektif sekaligus mempertahankan permeabilitas tinggi. Penelitian ini mendukung pengembangan teknologi pemurnian biodiesel yang efektif dan ramah lingkungan.

Kata Kunci: Biodiesel, *Polyethersulfone* (PES), phase inversion, FTIR, SEM, permeabilitas, pemurnian.

ABSTRACT

Via the phase inversion technique, employing dimethyl sulfoxide (DMSO) as the solvent medium. A thorough characterization was performed utilizing Scanning Electron Microscopy (SEM) and Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy to examine the membrane's morphological architecture, pore size distribution, and chemical functional groups. SEM observations indicated the presence of a macroporous structure with relatively large voids, exhibiting an average pore length of 0.668 μm , which promotes enhanced permeate flow rates. FTIR analysis verified the chemical integrity and stability of distinctive PES functional groups, notably the sulfonate ($-\text{SO}_2-$) moieties and aromatic $\text{C}=\text{C}$ bonds. Assessments of filtration efficiency showed consistent membrane permeability and proficient removal of impurities, including glycerol and soap residues. In conclusion, although the 15% PES formulation yields high flux attributable to its porous nature, additional refinement—such as the incorporation of additives—is advised to improve selective separation capabilities while maintaining high permeability. This work supports the advancement of effective and environmentally sustainable technologies for biodiesel purification.

Keywords: Biodiesel, Polyethersulfone (PES), phase inversion, FTIR, SEM, permeability flux, purification

1. Pendahuluan

Konsumsi energi di seluruh dunia terus menunjukkan tren yang meningkat, didorong oleh laju pertumbuhan jumlah penduduk dan ekspansi sektor industri yang pesat. Ketergantungan yang masih tinggi pada sumber energi fosil, yang notabene tidak dapat diperbarui, telah memunculkan berbagai tantangan kompleks. Mulai dari gejolak harga yang tidak stabil, kerawanan akibat ketegangan geopolitik, hingga dampak paling serius yaitu pencemaran lingkungan akibat lepasnya emisi gas rumah kaca ke atmosfer (Abdullah et al., 2017). Dalam merespons kondisi ini, inisiatif untuk menggalakkan dan mengoptimalkan pemanfaatan sumber-sumber energi terbarukan yang lebih bersih dan berkelanjutan merupakan sebuah langkah yang tidak dapat ditawar lagi. Di antara berbagai opsi yang ada, biodiesel hadir sebagai bahan bakar alternatif yang berasal dari bahan biologis dan menawarkan sejumlah

keunggulan. Biodiesel muncul sebagai salah satu solusi yang sangat prospektif berkat karakternya yang terbarukan, mudah terurai secara alami (biodegradable), serta menghasilkan tingkat emisi yang lebih rendah apabila dibandingkan dengan bahan bakar diesel konvensional yang berasal dari fosil (Balat., 2011). Minat terhadap biodiesel diperkirakan akan meningkat dalam beberapa dekade ke depan terkait dengan pengaturan pemerintah yang ambisius, kekhawatiran ekologis, dan waktu tunggu mekanis. Badan Energi Internasional (IEA) menyatakan bahwa produksi biodiesel global dapat mencapai 5,7 juta barel setara minyak per hari (mb/d) pada tahun 2030 dan tetap mendekati level tersebut pada tahun 2050 dalam situasi Net Zero Outflows (NZE) (Prajapati & Ajeet Kumar, 2024).

Biodiesel, yang dihasilkan dari bahan baku nabati atau limbah hewani, menawarkan keuntungan ganda: sebagai sumber energi yang lebih bersih dan sebagai solusi untuk mengurangi limbah. Salah satu bahan utama yang sering digunakan dalam produksi biodiesel adalah minyak kelapa sawit (CPO). Penggunaan CPO tidak hanya memberikan alternatif yang ramah lingkungan, tetapi juga mendukung pertumbuhan ekonomi lokal melalui pengembangan industri kelapa sawit. Penggunaan biodiesel semakin meluas karena sejumlah alasan, termasuk kemampuannya untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, mengurangi ketergantungan pada energi fosil, serta mendukung pertumbuhan ekonomi lokal melalui pengembangan industri pertanian. Brondolan sawit atau palm fruitlets merupakan produk sampingan dari aktivitas pemanenan kelapa sawit yang memiliki prospek cerah sebagai bahan baku pembuatan biodiesel yang ramah lingkungan, meskipun pemanfaatannya saat ini masih belum optimal. Penggunaan brondolan sawit tidak hanya berperan dalam meningkatkan nilai tambah ekonomi dalam industri kelapa sawit, tetapi juga dapat membantu mengurangi akumulasi limbah di areal perkebunan (Santoso., 2018). Biodiesel dihasilkan melalui proses transesterifikasi, yaitu reaksi antara minyak yang diekstrak dari brondolan sawit dengan metanol, yang menghasilkan metil ester (biodiesel) dan gliserin sebagai hasil samping. Akan tetapi, biodiesel mentah (crude biodiesel) yang dihasilkan dari reaksi ini masih mengandung sejumlah pengotor, seperti sisa katalis, sabun, gliserin sisa, dan metanol yang tidak bereaksi, yang harus disingkirkan agar kualitasnya memenuhi standar yang ditetapkan, misalnya SNI 7182:2015 atau ASTM D6751 (BSN., 2015). Metode pemurnian konvensional seperti pencucian dengan air memiliki beberapa kelemahan signifikan, di antaranya adalah tingginya konsumsi air, timbulan limbah cair dalam volume besar, serta risiko terbentuknya emulsi dan terjadinya hidrolisis yang pada akhirnya dapat menurunkan rendemen biodiesel secara keseluruhan (Atadashi et.al., 2010).

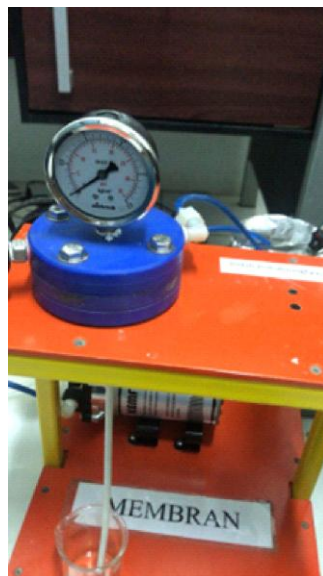
Dalam upaya mengatasi berbagai kendala yang melekat pada metode pemurnian konvensional, teknologi membran hadir sebagai inovasi yang revolusioner dalam proses pemurnian biodiesel. Pendekatan ini memperkenalkan paradigma baru yang menawarkan sejumlah kelebihan substansial, di antaranya adalah kemampuan selektifitas yang unggul dalam memisahkan komponen, efisiensi energi yang tinggi sehingga konsumsi daya menjadi lebih rendah, tidak memerlukan penambahan bahan kimia tambahan yang berpotensi mencemari lingkungan, serta kemampuan operasional yang berkesinambungan (continuous operation) tanpa mengorbankan kualitas output (Cao et.al., 2016). Dalam konteks material membran, Polyethersulfone (PES) telah emerge sebagai salah satu polimer yang paling banyak mendapatkan perhatian dalam riset dan aplikasi membran ultrafiltrasi. Popularitas ini ditopang oleh karakteristik unggul yang dimilikinya, termasuk stabilitas thermal yang mantap bahkan pada suhu elevasi, kekuatan mekanik yang tangguh, dan ketahanan kimia yang exceptional terhadap berbagai kondisi proses, yang kesemuanya merupakan atribut kritis yang sangat dibutuhkan dalam lingkungan operasi pemurnian biodiesel yang menuntut durabilitas dan reliabilitas tinggi (Garcia et al., 2019). Karakteristik istimewa ini menjadikan membran PES sebagai kandidat primer dalam pengembangan sistem pemurnian biodiesel yang tidak hanya efisien tetapi juga berkelanjutan.

Efektivitas dan efisiensi membran Polyethersulfone (PES) dalam melakukan penyaringan terhadap berbagai kontaminan dan pengotor sangat ditentukan oleh sifat-sifat intrinsik yang dimiliki oleh membran tersebut. Karakteristik kunci yang berperan penting antara lain adalah distribusi ukuran pori-pori membran, tingkat hidrofilisitas atau kebasahan permukaan membran, serta struktur morfologi permukaan dan cross-sectionnya. Seluruh atribut ini tidaklah bersifat statis, melainkan dapat direkayasa dan dioptimalkan melalui manipulasi parameter-parameter dalam tahapan fabrikasi membran, seperti komposisi bahan, metode pencetakan, dan kondisi fase inversion (Wenten., 2016). Berangkat dari latar belakang tersebut, maka studi yang mengkaji secara komprehensif tentang kinerja membran PES dalam konteks pemurnian biodiesel yang berasal dari brondolan sawit memiliki relevansi yang sangat tinggi, baik dari segi ilmiah maupun aplikasi industri. Secara lebih spesifik, penelitian ini dirancang dengan

tujuan untuk menganalisis sejauh mana kemampuan membran PES dalam mereduksi konsentrasi pengotor utama seperti gliserin sisa reaksi dan sabun, serta menyelidiki pengaruh perubahan kondisi operasional—seperti variasi tekanan transmembran dan rentang suhu proses—terhadap dua parameter kinerja utama, yaitu laju fluks permeat yang dihasilkan dan persentase penolakan (rejection) terhadap zat pengotor. Pada akhirnya, temuan yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi berarti bagi pengembangan metode produksi biodiesel yang tidak hanya unggul dalam aspek efisiensi proses dan ekonomi, tetapi juga lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

2. Metode Penelitian

Bahan baku utama yang digunakan adalah Crude palm oil (CPO) hasil dari minyak brondolan sawit. Membran Polyethersulfone (PES) dengan konsentrasi 15% berbentuk flatsheet dibuat dengan menggunakan bahan kimia Dimetil Sulfoksida (DMSO) sebagai pelarut. Peralatan untuk filtrasi yang digunakan adalah seperti Gambar 1 dibawah ini :



Gambar 1. Alat filtrasi membran PES 15%

A. Fabrikasi Membran PES

Membran PES difabrikasi menggunakan metode phase inversion. Langkah penelitian diawali dengan menimbang serbuk polyethersulfone (PES) menggunakan neraca analitik dengan massa 15 gram. Selanjutnya, disiapkan larutan pelarut berupa dimetil sulfoksida (DMSO) dalam botol sampel berkapasitas 100 mL. PES kemudian dimasukkan secara perlahan ke dalam DMSO sambil diaduk menggunakan magnetic stirrer pada suhu 60 °C. Proses pengadukan dilakukan selama 2 jam hingga diperoleh larutan yang homogen, jernih, dan kental.

Tahap pencetakan membran diawali dengan menyiapkan pelat kaca yang digunakan sebagai alas atau dasar untuk pencetakan membran berbentuk lembaran (flatsheet). Larutan PES kemudian dituangkan secara perlahan ke atas permukaan pelat kaca, lalu diratakan menggunakan film applicator untuk memperoleh ketebalan membran sesuai yang diinginkan (menggunakan ketebalan aplikator 200 μm). Setelah itu, pelat kaca berisi larutan membran diselupkan ke dalam bak air yang berisi akuades pada suhu kamar. Membran yang telah terbentuk kemudian diangkat dengan hati-hati, dilanjutkan dengan proses pembilasan menggunakan akuades untuk menghilangkan sisa DMSO dan PES yang tidak terikat.

B. Karakterisasi Membran

Karakterisasi morfologi permukaan dan cross-sectional membran dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM). Uji FT-IR untuk mengetahui gugus fungsi dalam sampel.

C. Proses Pemurnian Biodiesel

Proses filtrasi diawali dengan menyiapkan sistem filtrasi dan memastikan seluruh komponen alat, seperti modul membran, tangki umpan, pompa, dan selang, terpasang dengan benar serta dalam kondisi bersih. Membran kemudian dipotong sesuai ukuran modul filtrasi dan dipasang dengan posisi yang tepat agar aliran fluida berjalan optimal. Sebelum digunakan, dilakukan pembilasan awal menggunakan metanol untuk menghilangkan residu bahan kimia maupun partikel yang masih menempel pada sistem. Setelah itu, tangki umpan diisi dengan biodiesel yang akan difiltrasi dengan volume mencukupi. Proses filtrasi dimulai dengan menyalakan pompa sehingga biodiesel mengalir melalui sistem cross-flow, sambil memastikan tekanan dan laju alir sesuai dengan parameter yang telah ditentukan. Hasil filtrasi dipantau dengan mencatat volume serta berat permeat setiap 15 menit, dilakukan sebanyak delapan kali pengulangan untuk memperoleh data yang akurat. Setelah proses selesai, membran diambil untuk dianalisis lebih lanjut mengenai perubahan struktur dan kinerjanya. Terakhir, dilakukan pembilasan akhir menggunakan metanol agar seluruh sistem bersih dari sisa biodiesel maupun zat yang menempel, sehingga alat siap digunakan kembali.

Permeate yang dihasilkan ditampung dan diukur volumenya untuk menghitung flux permeat menggunakan persamaan:

$$J = V / (A \times t)$$

Dimana J adalah flux (L/m².jam), V adalah volume permeat (L), A adalah luas membran (m²), dan t adalah waktu (jam).

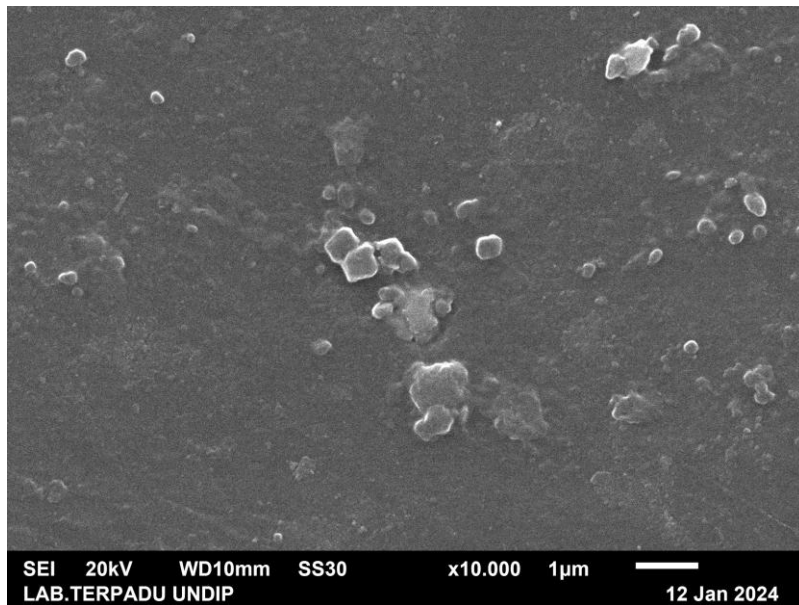
D. Analisa Hasil

Analisis karakterisasi membran dilakukan melalui beberapa tahapan. Pertama, analisis morfologi dan struktur permukaan karbon aktif menggunakan metode Scanning Electron Microscopy (SEM). Proses pengambilan gambar SEM dilakukan dengan mengirimkan sampel ke UPT Laboratorium Terpadu Institut Teknologi Kalimantan untuk memperoleh citra morfologi pada setiap sampel. Selanjutnya, analisis gugus fungsi dilakukan dengan metode Fourier Transform Infrared (FTIR), di mana sampel juga dikirimkan ke laboratorium yang sama untuk memperoleh data berupa wave number. Selain itu, uji permeabilitas membran dilakukan guna mengukur fluks permeat yang dihasilkan selama proses filtrasi cross-flow, dengan cara menghitung volume permeat yang melewati membran dalam selang waktu tertentu untuk menilai kinerja membran dalam menyaring biodiesel. Hasil dari setiap analisis kemudian dibandingkan dan dievaluasi untuk mendapatkan karakteristik terbaik berdasarkan morfologi permukaan (SEM), gugus fungsi (FTIR), serta permeabilitas membran. Evaluasi dilakukan dengan mempertimbangkan struktur dan distribusi pori, komposisi kimia, serta fluks permeat yang dihasilkan. Selain itu, pengaruh variasi konsentrasi PES terhadap sifat fisik dan kinerja membran juga dianalisis guna menentukan formulasi optimal pada aplikasi filtrasi biodiesel.

3. Hasil dan Pembahasan

A. Karakteristik Membran terhadap SEM

Karakterisasi morfologi membran dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) dengan pembesaran 10.000x dan akselerasi electron beam sebesar 20 kV. Uji ini bertujuan untuk mengamati struktur permukaan membran PES (Polyethersulfone) 15%. Hasil pengamatan morfologi membran PES 15% ditunjukkan pada Gambar 2. berikut.



Gambar 2. Hasil Uji SEM pada PES 15%

Berdasarkan hasil karakterisasi morfologi menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM), dapat diamati bahwa variasi konsentrasi polimer Polyethersulfone (PES) memberikan pengaruh yang signifikan terhadap struktur morfologi permukaan membran. Terlihat jelas bahwa terdapat kecenderungan yang konsisten di mana peningkatan persentase berat PES dalam larutan dope solution secara langsung berdampak pada perubahan karakteristik permukaan membran. Pada membran yang difabrikasi dengan konsentrasi PES 15%, morfologi permukaan menunjukkan adanya pori-pori dengan ukuran relatif lebih besar dan distribusi yang lebih banyak serta homogen, yang mengindikasikan terbentuknya struktur membran yang lebih terbuka (open structure). Struktur makropori yang dominan ini secara teoritis dapat membentuk jalur aliran yang lebih lebar bagi permeat, yaitu fraksi biodiesel yang telah dimurnikan, untuk dapat melintasi membran dengan hambatan yang lebih rendah. Kondisi ini pada akhirnya berpotensi untuk menghasilkan nilai flux permeat yang lebih tinggi mengingat laju alirannya yang lebih besar dibandingkan dengan membran yang memiliki struktur lebih padat.

Berdasarkan hasil pencitraan yang diperoleh dari Scanning Electron Microscopy (SEM), data morfologi permukaan membran kemudian diproses secara komprehensif menggunakan perangkat lunak ImageJ yang secara khusus didesain untuk analisis citra ilmiah. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengukur secara presisi dimensi diameter pori-pori yang terbentuk pada setiap variasi konsentrasi membran yang difabrikasi. Untuk memastikan akurasi dan representasi data yang andal, sebanyak 100 pori dari masing-masing sampel dipilih secara acak dari berbagai area yang berbeda, lalu diukur diameternya guna mendapatkan nilai rata-rata yang statistiknya valid. Seluruh data hasil pengukuran tersebut selanjutnya diolah dan dianalisis lebih lanjut menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel untuk melakukan perhitungan statistik deskriptif, seperti rata-rata, standar deviasi, dan distribusi frekuensi ukuran pori. Melalui proses analisis kuantitatif ini, dapat diperoleh gambaran yang jelas dan objektif mengenai bagaimana variasi konsentrasi polimer dalam larutan dope solution mempengaruhi morfologi dan ukuran pori membran, yang pada akhirnya akan menentukan performa membran dalam aplikasi filtrasi.

Tabel 1. Hasil pengaruh konsentrasi polimer PES 15% terhadap ukuran pori membrane

No	Area (mm ²)	Mean (Gray)	Min	Max	Angle (°)	Length (µm)
1	0.003	132.906	64.780	255.000	-117.216	0.596
2	0.003	174.844	88.000	255.000	-123.690	0.655
3	0.005	134.986	74.162	211.957	-123.959	0.895
4	0.005	119.721	68.505	198.567	-148.092	0.946
5	0.003	112.407	64.321	158.393	-146.689	0.634

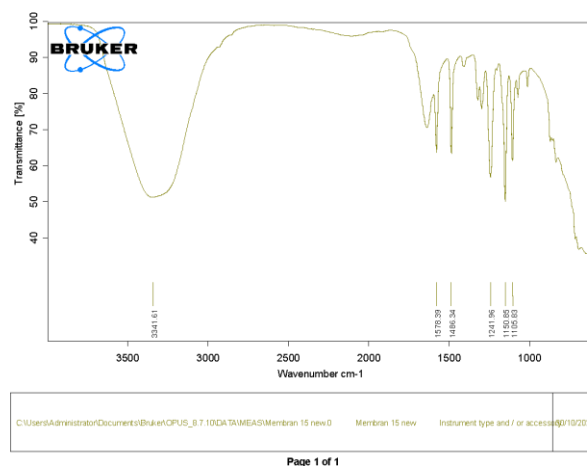
No	Area (mm ²)	Mean (Gray)	Min	Max	Angle (°)	Length (μm)
6	0.005	130.690	66.902	232.146	-145.408	0.534
7	0.003	127.766	66.014	210.775	-104.745	0.580
8	0.004	124.056	66.177	180.709	-145.561	0.645
9	0.003	126.192	67.589	255.000	-97.907	0.551
10	0.003	108.141	74.115	242.000	23.552	0.645
Mean	0.003	127.773	71.498	219.986	-80.399	0.668
SD	0.001	18.902	7.756	34.063	94.637	0.140
Min	0.003	108.141	64.321	158.393	-148.092	0.534
Max	0.005	174.844	88.000	255.000	145.561	0.946

Tabel 1 menunjukkan bahwa nilai luas area yang terukur pada sampel berkisar antara 0.003 mm² hingga 0.005 mm², dengan rata-rata 0.003 mm² dan standar deviasi yang rendah (0.001 mm²). Ini menunjukkan bahwa fitur-fitur (seperti pori atau partikel) yang dianalisis memiliki ukuran yang relatif seragam dan konsisten di seluruh sampel. Intensitas gray rata-rata bervariasi dari 108.141 hingga 174.844 (skala 0–255), dengan rata-rata 127.773. Nilai ini merefleksikan kecerahan atau densitas material pada area yang dianalisis. Variasi nilai gray menunjukkan heterogenitas komposisi atau ketebalan material pada permukaan. Nilai minimum gray berkisar antara 64.321 hingga 88.000, sementara nilai maksimum mencapai 255.000 (nilai saturasi). Adanya nilai maksimum 255 pada beberapa sampel (misalnya sampel 1, 2, dan 9) mengindikasikan adanya area yang sangat terang atau jenuh, mungkin akibat refleksi tinggi atau ketidakteraturan permukaan. Sudut orientasi fitur menunjukkan variasi yang sangat besar, dari -148.092° hingga 145.561°, dengan standar deviasi tinggi (94.637). Ini menandakan bahwa fitur-fitur pada permukaan tidak memiliki orientasi yang teratur (acak/random), yang umum pada membran dengan struktur isotropik. Panjang fitur berkisar antara 0.534 μm hingga 0.946 μm, dengan rata-rata 0.668 μm dan deviasi standar 0.140 μm. Ukuran ini konsisten dengan skala pori atau fitur pada membran ultrafiltrasi, yang biasanya berada pada rentang submikron.

B. Uji Karakteristik Gugus Fungsi Membran dengan FTIR

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi kimia yang terdapat dalam membran PES (Polyethersulfone) dengan variasi konsentrasi polimer. Spektroskopi inframerah mampu memberikan informasi terkait struktur kimia dan kemungkinan adanya interaksi antar molekul dalam membran yang disintesis.

Pada penelitian ini, dilakukan analisis terhadap spektrum FTIR untuk mendeteksi keberadaan gugus fungsi utama pada membran hasil sintesis. Gambar 3 menunjukkan spektrum inframerah dari membran PES 15% yang telah diuji.



Gambar 3. Hasil uji FTIR pada membran PES 15%

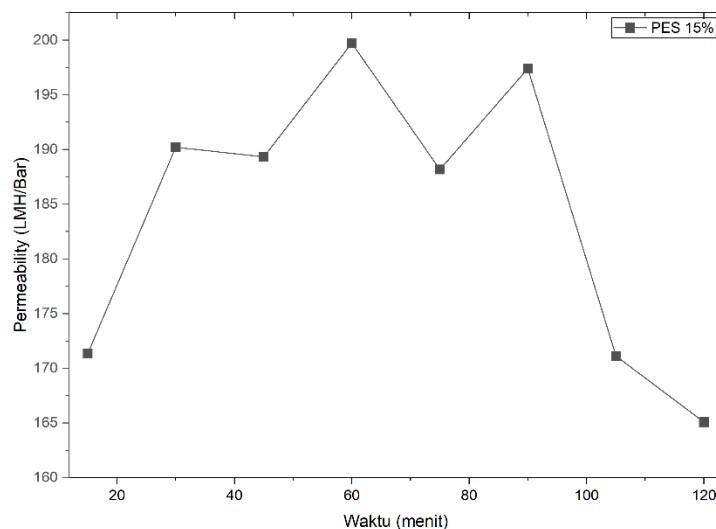
Hasil spektrum pada Gambar 3 menunjukkan pola serapan yang relatif serupa, namun terdapat variasi intensitas pada beberapa pita serapan, terutama pada bilangan gelombang sekitar:

- $\sim 1150\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$, mengindikasikan keberadaan gugus sulfon ($-\text{SO}_2-$) yang merupakan karakteristik utama dari PES.
- $\sim 1580\text{ cm}^{-1}$, menandakan adanya ikatan $\text{C}=\text{C}$ aromatik dari *backbone* cincin benzena.
- $\sim 3400\text{ cm}^{-1}$, kemungkinan terkait dengan gugus $-\text{OH}$ dari sisa air atau pelarut yang masih terjebak di dalam struktur membran.

Perubahan intensitas dan pergeseran kecil pada panjang gelombang dapat dikaitkan dengan perubahan densitas dan kekompakan struktur akibat peningkatan konsentrasi polimer. Hal ini sejalan dengan temuan pada Kulak et al. (2022), yang menunjukkan bahwa variabel proses seperti waktu penguapan berpengaruh terhadap struktur morfologi membran dan memengaruhi posisi serta luasan area pita serapan gugus fungsi.

Pada variasi konsentrasi 15%, spektrum menunjukkan intensitas yang relatif lebih tinggi pada gugus sulfon dan $-\text{OH}$, mengindikasikan struktur yang lebih terbuka dan interaksi air yang lebih besar. Fenomena ini menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya konsentrasi polimer PES, terjadi peningkatan kerapatan struktur membran yang tercermin dari spektrum FTIR. Hal ini mendukung hasil morfologi dari analisis SEM yang menunjukkan pepadatan pori dan pengurangan ukuran pori pada konsentrasi yang lebih tinggi. Kombinasi data FTIR dan SEM ini memberikan gambaran yang saling melengkapi tentang perubahan struktur kimia dan fisik pada membran.

C. Pengaruh Membran PES 15% terhadap Permeabilitas & Rejeksi



Gambar 4. Hasil uji Permeabilitas pada membran PES 15%

Pada Gambar 4 terlihat bahwa membran dengan konsentrasi PES 15% memiliki nilai permeabilitas yang relatif rendah namun stabil sepanjang proses filtrasi. Stabilitas ini menunjukkan bahwa membran mampu menjaga keseimbangan antara laju alir yang masuk dengan kemampuan penyaringan. Meskipun tidak menghasilkan fluks yang sangat tinggi, membran ini tetap efektif karena struktur porinya cukup rapat untuk menahan kontaminan, sehingga memberikan kinerja rejeksi yang baik. Menurut Mulder (1996), peningkatan konsentrasi polimer dalam larutan casting akan memperlambat proses demixing saat fase inversi, menghasilkan membran yang lebih padat dengan ukuran pori lebih kecil. Hal ini sejalan dengan Ahmad et al. (2012), yang menyatakan bahwa membran dengan distribusi pori sempit dan homogen mampu memberikan kestabilan fluks serta rejeksi yang lebih efektif. Dengan demikian, membran 15% PES dapat dikatakan memiliki kinerja optimal karena mampu menjaga kestabilan permeabilitas sekaligus mempertahankan kemampuan rejeksi yang baik.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa variasi konsentrasi polimer Polyethersulfone (PES) memiliki pengaruh yang signifikan dan sistematis terhadap karakteristik morfologi permukaan dan cross-sectional, sifat kimia, serta kinerja permeabilitas membran komposit berbasis PES dalam aplikasi pemurnian biodiesel. Secara khusus, membran dengan konsentrasi PES 15% menghasilkan struktur pori-pori yang relatif lebih besar, yang pada satu sisi mampu menghasilkan nilai fluks permeat yang tinggi akibat berkurangnya hambatan aliran, namun di sisi lain menyebabkan penurunan selektivitas membran terhadap molekul-molekul pengotor seperti gliserin dan sabun. Hasil karakterisasi menggunakan Fourier Transform Infrared (FTIR) menunjukkan bahwa gugus fungsi khas PES tetap stabil, sementara analisis Scanning Electron Microscopy (SEM) mengonfirmasi bahwa peningkatan konsentrasi PES menyebabkan peningkatan kerapatan rantai polimer dan homogenitas struktur membran, yang berkontribusi terhadap peningkatan mekanisme penolakan (rejection) namun dapat menurunkan fluks. Oleh karena itu, untuk mencapai performa yang optimal, diperlukan strategi pengoptimalan lebih lanjut, misalnya dengan incorporasi bahan aditif seperti porogen atau nanopartikel, guna menciptakan membran dengan struktur pori yang terkendali sehingga dapat menghasilkan permeabilitas yang lebih efisien tanpa mengorbankan selektivitas.

5. Pengakuan

Penelitian ini didukung oleh Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi melalui program hibah penelitian SIMLITABMAS tahun 2023 melalui skema Riset Dasar Kompetitif Nasional nomor 031/E5/PG.02.00.PL/2023

6. Daftar Pustaka

- Abdullah, A. B., Rahman, N. H. A., & Lam, S. S. (2017). An overview of biodiesel production from renewable resources. *Energy Procedia*, 142, 4–11.
- Ahmad, A. L., Abdulkarim, A. A., Ooi, B. S., & Ismail, S. (2012). Recent development in additives modifications of polyethersulfone membrane for flux enhancement. *International Journal of Applied Membrane Science & Technology*, 2(1), 1–12.
- Atadashi, S. M., Aroua, M. K., & Abdul Aziz, A. R. (2010). High quality biodiesel and its diesel engine application: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1999–2008.
- Badan Standardisasi Nasional. (2015). *SNI 7182:2015: Biodiesel*. BSN.
- Balat, M. (2011). Potential alternatives to edible oils for biodiesel production – A review of current work. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1479–1492.
- Cao, C., et al. (2016). A review of membrane technology for biodiesel production and purification. *Green Chemistry*, 18(18), 3302–3317.
- García, D. M., et al. (2019). Polyethersulfone membranes for biodiesel purification. *Journal of Membrane Science*, 383(1–2), 17–23.
- Mulder, M. (1996). *Basic principles of membrane technology* (2nd ed.). Springer Science & Business Media.
- Santosa, E. (2018). Pemanfaatan brondolan sawit sebagai bahan baku biodiesel: Peluang dan tantangan. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 28(2), 45–52.
- Wenten, I. G., & Khoiruddin. (2016). Reverse osmosis applications: Prospect and challenges. *Desalination*, 391, 112–125.