

# Optimasi Filler Polivinil Alkohol Membran Elektrolit Berbasis Biopolimer Kitosan Untuk Aplikasi Sel Bahan Bakar

<sup>1</sup>Ayu Oktari Rahman, <sup>1</sup>Umi Sholikah, <sup>2</sup>Mochammad Purwanto\*.

<sup>1</sup>Teknik Lingkungan, Fakultas Pembangunan Berkelanjutan, Jurusan Teknologi Kemaritiman, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan 76127, Indonesia.

<sup>2</sup>Teknik Kimia, Fakultas Rekayasa dan Teknologi Industri, Jurusan Rekayasa Industri, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan 76127, Indonesia.

\*Penulis Korespondensi: m.purwanto@lecturer.itk.ac.id

**Abstrak.** Membran elektrolit merupakan komponen penting dalam sistem sel bahan bakar yang memiliki fungsi sebagai konduktor proton dan separator antara katoda dan anoda. Sintesis membran elektrolit dilakukan dengan optimasi filler Polivinil Alkohol (PVA) dalam membran berbasis biopolimer kitosan. Penelitian bertujuan untuk mengetahui sifat dan kemampuan membran elektrolit Ch-PVA pada aplikasi sel bahan bakar. Pada tahap awal biopolimer kitosan diekstraksi dari limbah kulit udang melalui tiga tahap yaitu deproteinasi, demineralisasi, dan deasetilasi. Sintesis membran elektrolit dilakukan dengan metode inversi fasa menggunakan pelarut asam asetat. Analisa kemampuan membran dilakukan dengan pengujian water dan methanol uptake, kapasitas pertukaran ion, permeabilitas metanol, dan konduktivitas proton. Nilai water uptake tertinggi dan nilai methanol uptake terendah diperoleh pada membran Ch-PVA 15 dengan nilai masing-masing sebesar 96% dan 37%. Sementara untuk nilai kapasitas pertukaran ion tertinggi dihasilkan pada membran Ch-PVA 5 yaitu sebesar 1,86 mmol/gr. Permeabilitas metanol terendah terdapat pada membran Ch-PVA 15 sebesar  $3,10 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  dan konduktivitas proton tertinggi didapatkan pada membran Ch-PVA 10 yaitu sebesar  $2,86 \times 10^{-4} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Semua data pengujian yang diperoleh menunjukkan bahwa membran yang dihasilkan memiliki potensi untuk menjadi alternatif membran elektrolit pada aplikasi sel bahan bakar.

**Kata kunci:** Membran Elektrolit, Polivinil Alkohol, Kitosan, Kulit udang, Sel bahan bakar

**Abstract.** The electrolyte membrane is an important component in the fuel cell system which functions as a proton conductor and separator between the cathode and anode. Synthesis of electrolyte membranes was carried out by optimizing Polyvinyl Alcohol (PVA) filler in chitosan biopolymer based membranes. The research aims to determine the properties and capabilities of the chitosan-PVA electrolyte membrane in fuel cell applications. In the initial stage, chitosan biopolymer is extracted from shrimp shell waste through three stages, namely deproteination, demineralization, and deacetylation. Synthesis of electrolyte membranes was carried out using the Vasa inversion method using acetic acid as a solvent. Membrane capability analysis was carried out by testing water and methanol uptake, ion exchange capacity, methanol permeability, and proton conductivity. The highest water uptake value and the lowest methanol uptake value were obtained on the Ch-PVA 15 membrane with values of 96% and 37% respectively. Meanwhile, the highest ion exchange capacity value was produced on the Ch-PVA 5 membrane, namely 1,86 mmol/gr. The lowest methanol permeability was found on the Ch-PVA 15 membrane at  $3.10 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  and the highest proton conductivity was found on the Ch-PVA 10 membrane, namely  $2.86 \times 10^{-4} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ . All test data obtained shows that the resulting membrane has the potential to become an alternative electrolyte membrane in fuel cell applications.

**Keywords:** Electrolyte Membranes, Polyvinyl Alcohol, Chitosan, Shrimp shells, Fuel cells.

## 1. Pendahuluan

Konsumsi energi fosil yang tinggi menyebabkan peningkatan emisi gas rumah kaca yang berdampak pada ketidakstabilan iklim, peningkatan suhu bumi, serta kenaikan permukaan air laut. Secara global, emisi karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dari sektor energi mencapai lebih dari 36 miliar ton per tahun, yang berkontribusi terhadap kenaikan suhu rata-rata bumi sekitar  $1,1^\circ\text{C}$  dibandingkan era pra-industri (Setyono, 2021). Selain itu, bahan bakar fosil merupakan sumber daya alam yang tidak terbarukan sehingga ketersediaannya semakin menipis, dengan cadangan minyak bumi diperkirakan hanya mampu bertahan sekitar 50 tahun, gas alam  $\pm 52$  tahun, dan batu bara  $\pm 130$  tahun jika dikonsumsi pada tingkat saat ini (Noviyanti, 2016). Kondisi ini mendorong berbagai negara untuk mencari sumber energi alternatif yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Salah satu teknologi yang berkembang adalah sel bahan bakar, yaitu perangkat yang mampu mengubah energi kimia secara langsung menjadi

energi listrik dengan efisiensi yang dapat mencapai 40–60% (Ravichandran dkk., 2021). *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC) merupakan salah satu jenis sel bahan bakar yang menggunakan metanol cair sebagai bahan bakar dan memiliki potensi besar karena kemudahan penyimpanan serta densitas energi yang tinggi, yaitu sekitar 4,8–6,1 kWh/kg (J.A. Baak, 2019).

Salah satu komponen penting dalam sistem DMFC adalah membran elektrolit yang berfungsi sebagai media penghantar proton dari anoda ke katoda (Dutta, 2020). Hingga saat ini, membran berbasis asam perfluorosulfonic seperti Nafion banyak digunakan secara komersial karena memiliki konduktivitas proton yang tinggi. Namun, membran Nafion memiliki beberapa kelemahan, antara lain harga yang relatif mahal, tingkat *crossover* metanol yang tinggi, serta kecenderungan mengalami dehidrasi pada suhu tinggi yang dapat menurunkan konduktivitas proton (Lufrano dkk., 2013). Oleh karena itu, diperlukan pengembangan membran alternatif yang lebih ekonomis dan memiliki kinerja yang lebih baik untuk aplikasi DMFC.

Penggunaan bahan berbasis biopolimer menjadi salah satu pendekatan yang menjanjikan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Kitosan merupakan biopolimer yang dapat diperoleh dari limbah kulit udang-udangan (*crustacean*) dan memiliki potensi sebagai bahan membran elektrolit, meskipun konduktivitas protonnya yang masih rendah pada kisaran  $10^{-4}$  hingga  $10^{-3}$  S.cm<sup>-1</sup> menjadi keterbatasan utama sehingga perlu dimodifikasi (Cheba, 2020). Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah mengkombinasikan kitosan dengan *Polyvinyl Alcohol* (PVA), sebuah polimer sintetik dengan keunggulan pembentukan film yang baik dan kemudahan preparasi yang dapat meningkatkan konduktivitas proton melalui pembentukan ikatan silang (Yang, 2022). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa variabel terbaik membran kitosan-PVA dengan rasio 70:30 menghasilkan konduktivitas ion  $3,8 \times 10^{-2}$  S.cm<sup>-1</sup> dan *water uptake* 68% (Gopi, 2019), sementara Purwanto dkk. (2021) melaporkan bahwa penambahan filler pada matriks kitosan mampu menekan permeabilitas metanol hingga  $3,5 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> sekaligus mempertahankan konduktivitas proton, yang secara keseluruhan menunjukkan bahwa optimasi komposisi PVA merupakan kunci untuk mencapai keseimbangan antara *water uptake*, permeabilitas metanol, dan konduktivitas proton pada aplikasi DMFC.

Berdasarkan uraian tersebut, hipotesis dalam penelitian ini adalah bahwa modifikasi kitosan dengan PVA dapat menghasilkan membran elektrolit dengan permeabilitas metanol yang lebih rendah dan konduktivitas proton yang lebih tinggi dibandingkan membran kitosan murni. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi membran elektrolit berbasis kitosan dan kitosan-PVA, serta mengevaluasi potensi penggunaannya sebagai membran elektrolit pada aplikasi *Direct Methanol Fuel Cell*.

## 2. Bahan dan Metode

### 2.1. Bahan

Serbuk kulit udang yang telah lolos ayakan 100 mesh (diperoleh dari limbah industri pengolahan udang lokal), asam klorida (HCl, 37%, p.a., Merck), asam asetat glacial (CH<sub>3</sub>COOH, 99,8%, p.a., Merck), natrium hidroksida (NaOH, 98%, p.a., Merck), natrium klorida (NaCl, 99,5%, p.a., Merck), metanol (CH<sub>3</sub>OH, 99,9%, p.a., Merck), indikator fenoltalein (PP, 1% w/v dalam etanol, Merck), polyvinyl alcohol (PVA, berat molekul 85.000–124.000 g/mol, derajat hidrolisis ≥99%, Sigma-Aldrich), dan akuades dengan resistivitas ≥18 MΩ.cm (diperoleh dari sistem purifikasi air deionisasi).

### 2.2. Ekstraksi Kitosan

Ekstraksi kitosan terdiri atas tiga langkah penting. Pertama, langkah deproteinasi, serbuk kulit udang yang telah lolos ayakan 100 mesh di-*stirrer* ±400 rpm dalam larutan NaOH 3,5% dengan perbandingan massa serbuk dan volume larutan 1:10 (w/v) pada 70°C selama 2 jam. Sampel dicuci dengan akuades sampai pH netral dan kemudian dikeringkan. Kedua, tahap demineralisasi, yaitu serbuk yang telah kering di-*stirrer* ±400 rpm dalam larutan HCl 1M dengan perbandingan massa serbuk dan volume larutan 1:10 (w/v) pada 70°C selama 2 jam. Sampel dicuci dengan akuades sampai pH netral dan kemudian dikeringkan. Serbuk kulit udang yang telah melewati dua tahap ini berubah menjadi kitin. Langkah ketiga, deasetilasi, yaitu kitin di-*stirrer* ±400 rpm dalam larutan NaOH 50% dengan perbandingan massa serbuk dan volume larutan 1:10 (w/v) pada 120°C selama 2 jam. Sampel dicuci

dengan akuades sampai pH netral dan kemudian dikeringkan. Produk kemudian digerus dan diayak hingga lolos ayakan 100 mesh untuk mendapatkan kitosan bubuk.

### 2.3. Sintesis Membran Ch-PVA

Sintesis membran Ch-PVA dilakukan dalam tiga variasi komposisi, yaitu Ch-PVA 5 (kitosan 95% : PVA 5%), Ch-PVA 10 (kitosan 90% : PVA 10%), dan Ch-PVA 15 (kitosan 85% : PVA 15%), dengan total massa polimer yang digunakan tetap konstan pada setiap variabel. Perbedaan komposisi ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh peningkatan konsentrasi PVA terhadap sifat dan performa membran elektrolit yang dihasilkan.

Prosedur sintesis untuk setiap variabel membran dilakukan dengan cara yang sama sebagai berikut. Larutan asam asetat 2% sebanyak 75 mL dibagi ke dalam 2 *beaker glass*. *Beaker glass* 1 berisi 37,5 mL asam asetat 2% dan serbuk kitosan (sesuai komposisi masing-masing variabel) di-*stirrer* 400 rpm pada suhu 80°C selama 30 menit. Pada saat yang bersamaan, *beaker glass* 2 berisi 37,5 mL asam asetat 2% dan serbuk PVA (sesuai komposisi masing-masing variabel) disonikasi pada suhu ruang selama 30 menit. Pelarutan dilakukan secara terpisah karena kitosan dan PVA memiliki karakteristik kelarutan yang berbeda, kitosan memerlukan pemanasan untuk larut sempurna dalam asam asetat, sedangkan PVA cukup didispersikan pada suhu ruang melalui sonikasi, sehingga masing-masing polimer dapat terdispersi secara optimal sebelum digabungkan. Kedua campuran kemudian digabung dan di-*stirrer* 400 rpm pada suhu 80°C selama 30 menit untuk menyempurnakan homogenisasi. Selanjutnya, campuran disonikasi selama 30 menit, didiamkan pada suhu ruang selama 30 menit, lalu disonikasi kembali selama 30 menit. Terakhir, campuran dituang pada cetakan akrilik persegi panjang dengan luas permukaan  $\pm 352 \text{ cm}^2$ , dan dikeringkan pada suhu ruang selama  $\pm 5$  hari.

## 3. Karakterisasi Membran Ch-PVA

Pengujian dan karakterisasi dilakukan terhadap setiap variabel membran.

### 3.1. Uji Fourier Transform InfraRed (FTIR)

Membran komposit yang terbentuk di analisis struktur dan gugus fungsi dengan menggunakan *Fourier Transform InfraRed* (FTIR). Sampel disiapkan sebanyak 0,1 – 0,2g pada *pin stub holder* dan dianalisa pada rentang bilangan gelombang 500 – 4000  $\text{cm}^{-1}$  (Purwanto dkk, 2021).

### 3.2. Uji Serapan Air dan Metanol

Uji serapan air dan metanol dilakukan untuk mengetahui kemampuan membran dalam menyerap air maupun metanol, yang berkaitan langsung dengan performa membran dalam aplikasi DMFC. Nilai *water uptake* yang tinggi mengindikasikan membran berada dalam kondisi terhidrasi yang baik sehingga mampu menghantarkan proton secara optimal, sementara nilai *methanol uptake* yang rendah mengindikasikan membran mampu meminimalkan terjadinya *methanol crossover* dari anoda ke katoda. Pengujian dilakukan dengan terlebih dahulu mengeringkan membran di dalam oven pada suhu 50°C selama 1 jam, kemudian dipotong menjadi ukuran  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ . Setiap membran ditimbang sebagai berat kering (*Wdry*) dan kemudian direndam ke dalam akuades dan larutan metanol 1 M masing-masing selama 24 jam. Membran yang telah direndam diusap dengan tisu dan ditimbang sebagai berat basah (*Wwet*). Penentuan nilai serapan air dan metanol menggunakan persamaan sebagai berikut (Purwanto dkk, 2021):

$$\text{Uptake (\%)} = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{dry}} 100$$

### 3.3. Uji Kapasitas Pertukaran Ion

Uji kapasitas pertukaran ion (KPI) dilakukan untuk mengetahui kemampuan membran dalam mengikat dan mempertukarkan proton ( $\text{H}^+$ ), yang merupakan indikator langsung seberapa efektif membran dapat berfungsi sebagai penghantar proton dalam aplikasi DMFC. Semakin tinggi nilai KPI, semakin banyak proton yang dapat diikat oleh membran sehingga semakin baik performanya sebagai membran elektrolit. Penentuan nilai KPI dilakukan dengan metode titrasi menggunakan larutan NaOH 0,01 M. Sebelum itu, membran dipotong menjadi ukuran  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  dan ditimbang sebagai berat kering (*Wdry*), lalu direndam ke dalam larutan HCl 0,1 M selama 24 jam untuk memprotonasi gugus aktif pada

membran, kemudian direndam kembali dengan larutan NaCl 0,1 M selama 24 jam sebagai *second protonate*. Penentuan nilai KPI menggunakan persamaan sebagai berikut (Purwanto dkk, 2020):

$$KPI = V \times \frac{C}{W_{dry}}$$

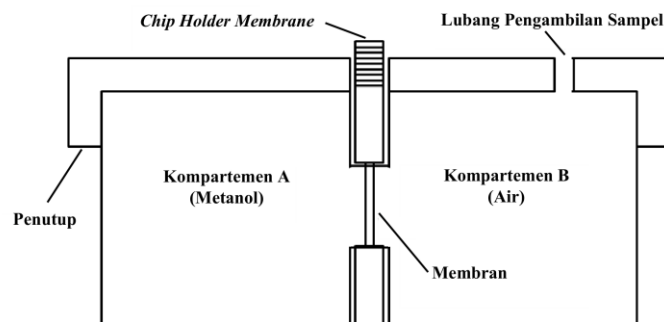
Dimana KPI adalah Kapasitas Pertukaran Ion (mmol/gram), V adalah volume NaOH yang digunakan untuk menetralkan NaCl (mL), C adalah konsentrasi NaOH (M), dan *W<sub>dry</sub>* adalah berat kering membran (gr).

### 3.4. Uji Permeabilitas Metanol

Permeabilitas metanol dianalisis menggunakan dua kompartemen *diffusion cell* sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1. Kompartemen A diisi dengan larutan metanol 1M dan kompartemen B diisi dengan air deionisasi. Selanjutnya, membran yang dijepit dan diletakkan antara dua kompartemen. Air pada kompartemen B diambil dengan pipet setiap 30 menit, dan dimasukkan ke dalam piknometer lalu ditimbang, lakukan pengulangan selama 3 jam. Nilai permeabilitas metanol dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Purwanto dkk, 2021):

$$P = \left( \frac{\Delta C_B}{\Delta t} \right) \cdot \left( \frac{L V_B}{A C_A} \right)$$

Dimana P adalah Permeabilitas metanol ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\Delta C_B / \Delta t$  adalah Slope variasi konsentrasi metanol pada kompartemen B dengan fungsi terhadap waktu ( $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ), L adalah ketebalan membran (cm),  $V_B$  adalah volume air di kompartemen B ( $\text{cm}^3$ ), A adalah Luas area kontak/difusi membran yang terhubung di kompartemen ( $\text{cm}^2$ ), dan  $C_A$  adalah konsentrasi metanol pada kompartemen A ( $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ).



**Gambar 1.** Skema ilustrasi *diffusion cell* dengan dua kompartemen

### 3.5. Uji Konduktivitas proton

Uji konduktivitas proton dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan membran dalam menghantarkan proton dari anoda menuju katoda di bawah medan listrik bolak-balik (AC), yang merupakan parameter utama penentu efektivitas membran elektrolit dalam sistem DMFC. Semakin tinggi nilai konduktivitas proton suatu membran, semakin baik kinerjanya dalam mengalirkan proton sehingga efisiensi sel bahan bakar pun meningkat. Membran dianalisis menggunakan *Conductivity Instrument* dengan metode *four probe* dalam kondisi terhidrasi dan dimasukkan pada *pin stub holder*. Proses analisis dilakukan pada rentang frekuensi 1–10<sup>6</sup> Hz. Konduktivitas proton dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut (Purwanto dkk, 2021):

$$\sigma = \left( \frac{L}{R \times A} \right)$$

Dimana  $\sigma$  adalah Konduktivitas proton membran ( $\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ), L adalah Ketebalan membran (cm), A adalah Luas permukaan membran ( $\text{cm}^2$ ), dan R adalah Nilai resistan membran ( $\Omega$ ).

#### 4. Hasil dan Pembahasan

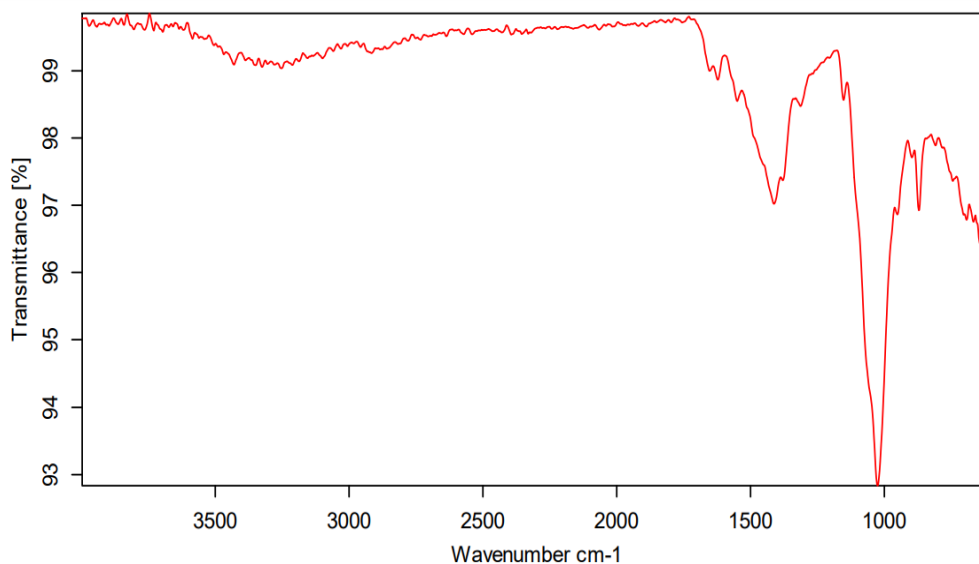
##### 4.1. Ekstraksi Kitosan

Telah dilakukan ekstraksi kitosan dari limbah kulit udang melalui 3 (tiga) tahap proses, yaitu deproteinasi, demineralisasi, dan deasetilasi. Setelah melalui tahap deproteinasi dan demineralisasi menghasilkan produk intermediet berupa kitin. Kitin adalah senyawa yang mengandung gugus asetil pada strukturnya. Sehingga pada tahap berikutnya dilakukan proses lanjutan berupa penghilangan gugus asetil melalui tahap deasetilasi. Tahapan ini dimaksudkan untuk memutus ikatan gugus asetil (-COCH<sub>3</sub>) sehingga menghasilkan produk utama yang berupa kitosan. Adapun produk kitosan yang dihasilkan berupa serbuk yang berwarna putih kecoklatan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Hasil ekstraksi kitosan dari kulit udang.

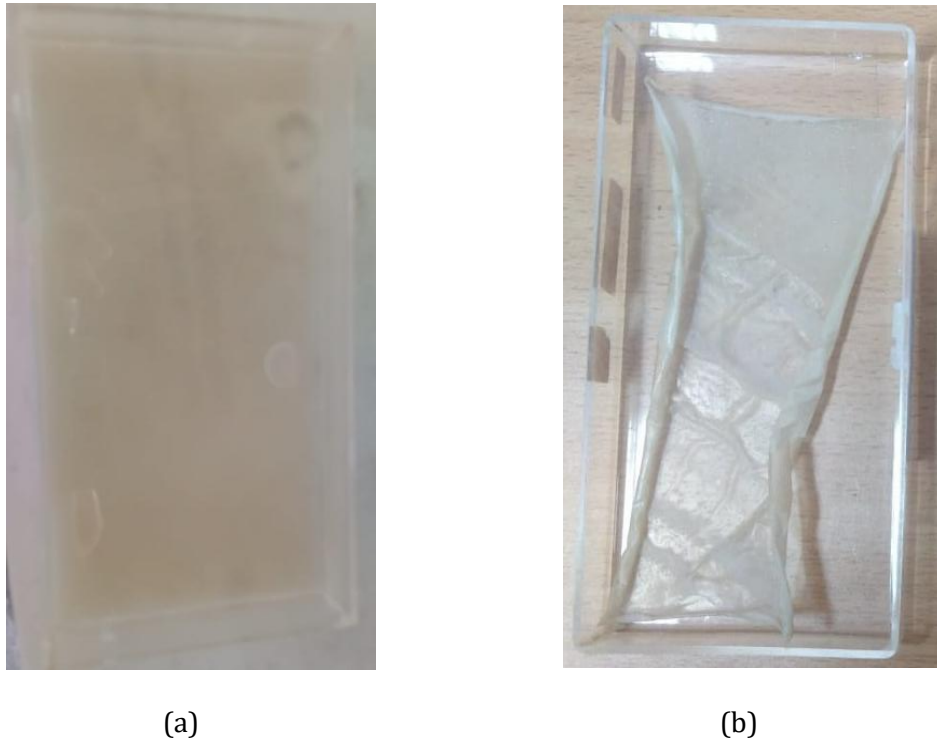
Serbuk kitosan yang diperoleh telah dilakukan analisis untuk mengetahui gugus fungsi yang dimiliki dengan menggunakan FTIR sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Spektrum FTIR untuk kitosan menunjukkan pita serapan yang muncul pada bilangan gelombang 3252,27 cm<sup>-1</sup> yang mana menunjukkan adanya gugus fungsi O-H hidroksil. Gugus fungsi C=O juga terlihat pada bilangan gelombang 1025,46 cm<sup>-1</sup> namun mengalami penurunan intensitas. Hal ini sesuai dengan penelitian (Zidni, 2019) yang menyatakan penurunan intensitas gugus C=O pada kitosan menandakan bahwa terjadi pelepasan gugus asetil. Berdasarkan analisis FTIR yang dibandingkan dengan spektrum kitosan standar menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan. Adanya spektrum utama pada daerah panjang gelombang tertentu yang menunjukkan adanya gugus fungsi utama yaitu gugus amida dan hidroksil yang mengidentifikasi bahwa senyawa hasil reaksi deasetilasi adalah kitosan (Handayani, 2018).



**Gambar 3.** Spektrum FTIR Kitosan

#### 4.2. Pembuatan Membran Elektrolit Ch-PVA

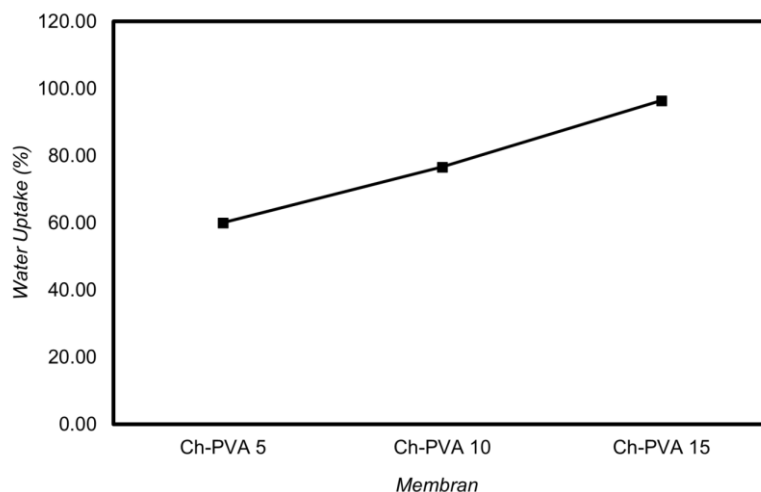
Telah dilakukan sintesis membran berbasis biopolimer kitosan dengan modifikasi PVA (*polyvinyl alcohol*) dalam pembuatan membran elektrolit serta modifikasi struktur membran dengan cara menyisipkan gugus yang bersifat polar seperti ion sulfat dan rantainya yang mana bertujuan untuk meningkatkan kemampuan serapan air dan konduktivitas proton serta kapasitas pertukaran ion pada membran (Ardi, 2023).



**Gambar 4.** Pencetakan Membran (a) saat basah (b) setelah kering.

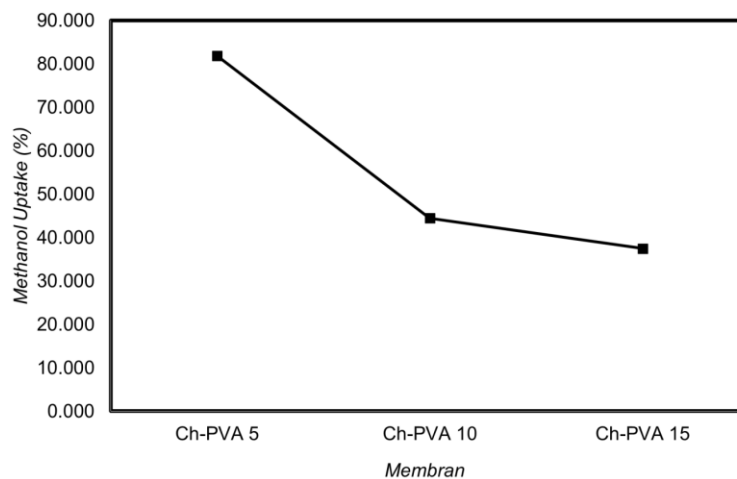
#### 4.3. Uji Serapan Air dan Metanol

Telah dilakukan uji serapan air & metanol untuk mengetahui karakteristik setiap variabel membran yang dihasilkan dari segi kemampuannya dalam menyerap air maupun metanol. Gambar 5 menunjukkan grafik serapan air dari masing-masing variabel membran.



**Gambar 5.** Nilai Serapan Air Tiap Variabel Membran

Grafik di atas menunjukkan bahwa semakin tinggi komposisi PVA pada variabel Ch-PVA akan berpengaruh terhadap kemampuan membran dalam menyerap air. Membran variabel Ch-PVA dengan komposisi Ch-85 dan PVA-15 memiliki nilai serapan air tertinggi yaitu 96,429%, sedangkan komposisi Ch-95 dan PVA-5 memiliki nilai serapan air terendah yaitu 60%. Adanya modifikasi kitosan dengan PVA menunjukkan afinitas atau kemampuan menyerap yang lebih tinggi terhadap air (Celeizabal dkk, 2022). Hal ini disebabkan karena PVA memiliki gugus hidroksil (-OH) dalam jumlah besar yang bersifat hidrofilik, sehingga semakin tinggi konsentrasi PVA yang ditambahkan pada matriks kitosan, semakin banyak gugus -OH yang tersedia untuk berinteraksi dengan molekul air melalui ikatan hidrogen, yang pada akhirnya meningkatkan kemampuan membran dalam menyerap air. Membran dapat bekerja untuk menghantarkan proton jika dalam keadaan terhidrasi. Namun, membran juga dapat mengalami *swelling* jika terlalu banyak mengandung air, sehingga keseimbangan nilai *water uptake* yang optimal perlu diperhatikan agar tidak menurunkan kestabilan mekanik membran. Parameter lain yang turut dievaluasi adalah karakteristik serapan metanol membran melalui uji *methanol uptake*. Hasil penelitian *methanol uptake* ditunjukkan sebagaimana Gambar 6.



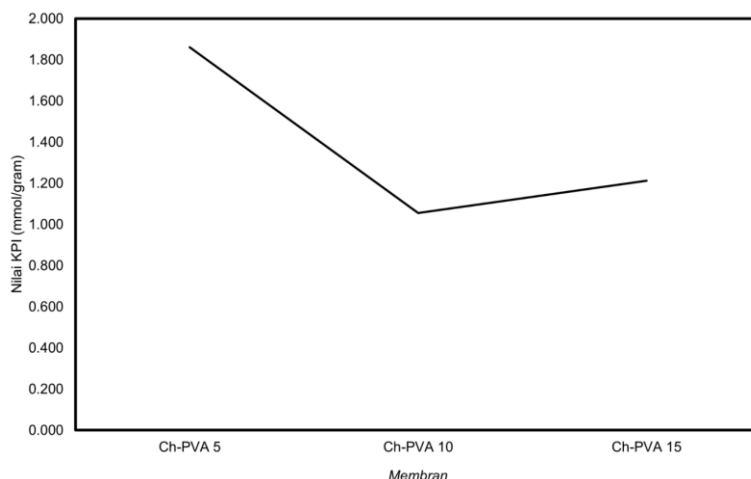
**Gambar 6.** Nilai Serapan Metanol Tiap Variabel Membran

Grafik nilai serapan metanol menunjukkan tren menurun pada setiap variabel membran. Membran Ch-PVA 5 memiliki nilai serapan metanol tertinggi sebesar 81,818%, sedangkan nilai terendah terdapat pada membran Ch-PVA 15 sebesar 37,5%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan PVA pada modifikasi membran dapat membantu mengurangi terjadinya *crossover* pada membran. Hal tersebut terjadi karena PVA membentuk jaringan ikatan silang (*crosslink*) dengan kitosan melalui interaksi gugus hidroksil (-OH) pada PVA dengan gugus amina (-NH<sub>2</sub>) pada kitosan, sehingga menghasilkan struktur membran yang lebih rapat dan kompak. Kerapatan struktur ini mempersempit ukuran pori membran, sehingga pergerakan molekul metanol yang berukuran lebih besar menjadi terhambat dan tidak dapat menembus membran secara bebas. Dengan demikian, semakin tinggi konsentrasi PVA, semakin rapat struktur membran yang terbentuk, dan semakin rendah pula nilai serapan metanolnya. Nilai serapan metanol yang rendah berarti kemungkinan terjadinya *crossover* pada membran juga rendah. Adapun *methanol crossover* adalah proses difusi molekul metanol dari anoda menuju katoda melalui membran yang dapat menghilangkan sebagian bahan bakar dan menyebabkan katoda tergenang, sehingga laju reaksi di katoda menjadi lebih lambat dan menurunkan kinerja sel voltase secara keseluruhan. Dengan demikian, penurunan nilai *methanol uptake* mengindikasikan bahwa membran yang dihasilkan mampu menahan laju difusi metanol yang melewati membran secara lebih efektif (Ardi, 2023).

#### 4.4. Uji Kapasitas Pertukaran Ion

Telah didapatkan hasil data pengujian nilai kapasitas pertukaran ion setiap variabel membran. Nilai KPI digunakan untuk mengetahui seberapa banyak proton yang dapat diikat oleh membran

elektrolit. Dalam hal ini membran elektrolit yang mampu mengikat proton akan sangat berguna dalam pengaplikasian DMFC. Nilai KPI disajikan dalam grafik Gambar 7:

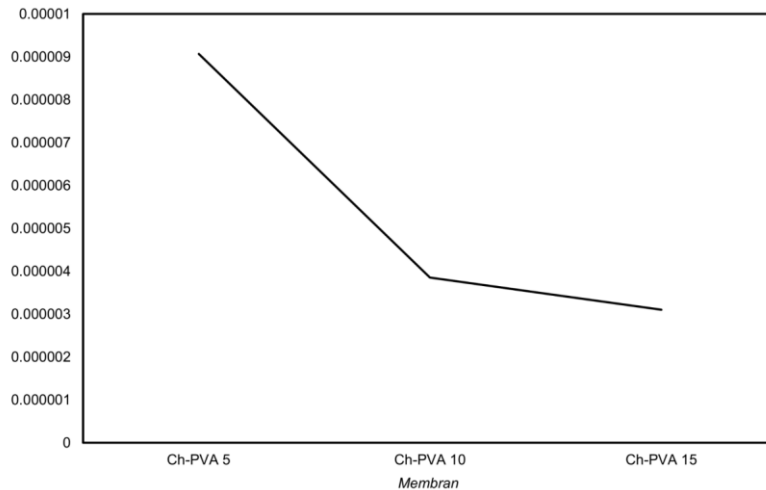


**Gambar 7.** Nilai Kapasitas Pertukaran Ion Setiap Variabel Membran.

Grafik di atas menunjukkan bahwa nilai KPI tertinggi diperoleh pada membran Ch-PVA 5 sebesar 1,861 mmol/gram, kemudian menurun ke titik terendah pada Ch-PVA 10 sebesar 1,056 mmol/gram, lalu naik kembali pada Ch-PVA 15 menjadi  $\pm 1,213$  mmol/gram. Tren non-linear ini disebabkan oleh dua mekanisme yang saling bersaing. Pada satu sisi, ikatan silang (*crosslinking*) dapat mempengaruhi ketersediaan situs pertukaran ion pada membran (Meshram, 2025), seiring meningkatnya konsentrasi PVA dari 5% ke 10%, semakin banyak ikatan silang yang terbentuk antara gugus -OH pada PVA dan gugus -NH<sub>2</sub> pada kitosan, sehingga sebagian situs aktif kitosan sebagai penukar ion tertutup dan nilai KPI turun. Pada sisi lain, struktur kimia PVA menyediakan lebih banyak situs pertukaran ion dibandingkan kitosan murni (Meshram, 2025), sehingga pada konsentrasi PVA yang lebih tinggi (Ch-PVA 15), gugus -OH bebas dari PVA yang berlimpah turut berkontribusi dalam pengikatan dan pertukaran proton, menghasilkan kompensasi parsial yang menyebabkan nilai KPI naik kembali. Nilai KPI yang lebih tinggi pada membran umumnya mengindikasikan sifat transport ion yang lebih baik dan berpotensi meningkatkan konduktivitas ionik serta performa elektrokimia secara keseluruhan (Bauyrzhan, 2023).

#### 4.5. Uji Permeabilitas Metanol

Uji permeabilitas metanol dilakukan untuk mengetahui karakteristik pergerakan atau difusi metanol pada saat melewati membran secara menyeluruh dari satu sisi ke sisi lainnya. Berbeda dengan uji *methanol uptake* yang mengukur seberapa banyak metanol yang terserap ke dalam matriks membran, koefisien permeabilitas metanol merupakan hasil perkalian antara difusivitas dan koefisien distribusi, yang mempertimbangkan kelarutan dan difusi metanol secara keseluruhan melalui membran (Jing, 2021). Dengan demikian, permeabilitas metanol merupakan parameter yang lebih langsung dalam menggambarkan potensi terjadinya *methanol crossover* pada kondisi operasional DMFC. Nilai *methanol uptake* yang rendah mengindikasikan rendahnya afinitas membran terhadap methanol (Junoh, 2020), namun nilai permeabilitas metanol yang rendahlah yang secara langsung menentukan efektivitas membran dalam mencegah *crossover*. Membran elektrolit dikatakan bekerja dengan baik apabila nilai permeabilitas metanol rendah, karena pada aplikasinya dalam DMFC hal ini bertujuan untuk meminimalkan terjadinya *methanol crossover*, yaitu proses difusi molekul metanol dari anoda menuju katoda yang menyebabkan hilangnya bahan bakar dan menurunnya kinerja sel secara keseluruhan.). Hasil pengujian permeabilitas metanol disajikan dalam Gambar 8:

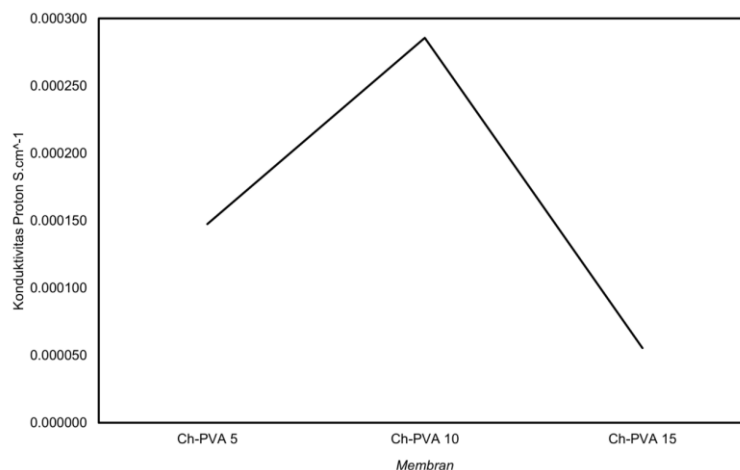


**Gambar 8.** Nilai Permeabilitas Metanol Variabel Membran Ch-PVA.

Grafik di atas menunjukkan bahwa variabel Ch-PVA memiliki tren permeabilitas metanol yang menurun secara konsisten. Seiring dengan penambahan konsentrasi PVA, nilai permeabilitas metanol menurun dari  $9,0 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  pada Ch-PVA 5, menjadi  $3,9 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  pada Ch-PVA 10, dan  $3,1 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  pada Ch-PVA 15. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan PVA memperkuat struktur membran sehingga  $\text{CH}_3\text{OH}$  hanya terserap pada permukaannya saja dan tidak dapat menembus atau melewati membran secara bebas. Pergerakan metanol melalui membran dipengaruhi oleh tiga gaya utama yaitu gradien konsentrasi, gradien tekanan, dan *electro-osmotic drag*, sehingga membran dengan struktur yang lebih rapat secara efektif menghambat difusi methanol (Corti, 2022). Dengan demikian, semakin rendah nilai permeabilitas metanol, semakin baik kualitas membran dalam aplikasi DMFC (Purwanto, 2022).

#### 4.6. Uji Konduktivitas Proton

Pengujian konduktivitas proton dilakukan untuk mengevaluasi keefektifan kinerja membran sebagai elektrolit dalam aplikasi DMFC. Konduktivitas proton dari membran elektrolit mencerminkan dinamika perilaku proton di bawah medan listrik bolak-balik (AC) — semakin tinggi nilainya, semakin baik membran dalam mengalirkan proton dari anoda ke katoda (Abaci dkk, 2023).



**Gambar 9.** Grafik Hasil Uji Konduktivitas Proton Tiap variabel Membran Ch-PVA.

Berdasarkan grafik, nilai konduktivitas proton meningkat secara signifikan dari Ch-PVA 5 ( $1,47 \times 10^{-4} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) menuju Ch-PVA 10 ( $2,86 \times 10^{-4} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ), kemudian turun drastis pada Ch-PVA 15 ( $5,5 \times 10^{-5} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ). Tren non-linear ini terjadi akibat dua mekanisme yang saling bersaing. Pada sisi pertama,

proses *crosslinking* meningkatkan domain amorf membran dan menurunkan fase kristal kitosan, sehingga meningkatkan konduksi ionik (Faizah, 2020). Penambahan PVA hingga 10% menyediakan gugus -OH dalam jumlah yang cukup untuk membentuk jalur *hopping* proton melalui mekanisme Grotthuss, yaitu perpindahan proton melalui jaringan ikatan hidrogen antar molekul air yang teradsorpsi pada membran sehingga konduktivitas proton meningkat optimal pada Ch-PVA 10. Dalam membran dengan *crosslink*, selain bertambahnya jumlah ion dalam membran, mekanisme *hopping* proton melalui jaringan *crosslinking* turut bertanggung jawab atas peningkatan konduktivitas proton (Danwanichakul, 2013).

Pada sisi lain, peningkatan konsentrasi PVA lebih lanjut menjadi 15% justru berdampak negatif. Nilai *water uptake* yang sangat tinggi pada Ch-PVA 15 (96%) menyebabkan *swelling* berlebihan yang mendilusi kanal transport proton dan merusak keutuhan struktur jaringan *crosslink* yang telah terbentuk. Ketika penyerapan air melampaui batasnya, hal ini akan menyebabkan peningkatan permeabilitas metanol dan berbagai efek samping yang merugikan kinerja membran (Zhou, 2015). Dengan mekanisme yang sama, *swelling* berlebihan pada Ch-PVA 15 mendisrupsi jalur konduksi proton sehingga nilai konduktivitas proton turun ke titik terendah. Fenomena ini membuktikan bahwa terdapat komposisi PVA yang optimal, dalam hal ini pada Ch-PVA 10, di mana keseimbangan antara ketersediaan gugus -OH, tingkat *crosslinking*, dan kondisi hidrasi membran menghasilkan konduktivitas proton yang paling tinggi untuk aplikasi DMFC (Fang, 2018).

## 5. Kesimpulan

Penelitian sintesis membran elektrolit berbasis biopolimer kitosan dengan variasi filler PVA pada konsentrasi 5%, 10%, dan 15% (Ch-PVA 5, Ch-PVA 10, dan Ch-PVA 15) telah berhasil dilakukan dan menghasilkan data bahwa membran Ch-PVA 15 menunjukkan performa terbaik dengan nilai *water uptake* tertinggi sebesar 96,43% yang mengindikasikan kondisi hidrasi membran yang baik untuk menghantarkan proton, sekaligus nilai *methanol uptake* terendah sebesar 37,5% yang menunjukkan kemampuan membran dalam meminimalkan afinitas terhadap metanol. Selanjutnya, nilai permeabilitas metanol terendah juga diperoleh pada membran Ch-PVA 15 sebesar  $3,10 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , yang mengindikasikan bahwa membran ini paling efektif dalam mencegah terjadinya *methanol crossover* dalam sistem DMFC. Selain itu, nilai kapasitas pertukaran ion tertinggi diperoleh pada membran Ch-PVA 5 sebesar 1,861 mmol/gram, sedangkan nilai konduktivitas proton tertinggi dicapai oleh membran Ch-PVA 10 sebesar  $2,86 \times 10^{-4} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , yang menunjukkan adanya komposisi optimal karena keseimbangan antara *crosslinking* dan ketersediaan gugus aktif menghasilkan transport proton terbaik. Berdasarkan seluruh parameter uji yang dilakukan, membran Ch-PVA 15 dinilai sebagai variabel dengan komposisi terbaik karena memiliki keunggulan pada parameter *water uptake*, *methanol uptake*, dan permeabilitas metanol yang rendah, sehingga membran ini berpotensi menjadi alternatif membran elektrolit yang menjanjikan untuk aplikasi *Direct Methanol Fuel Cell*.

## 6. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) dan Laboratorium Teknik Kimia Institut Teknologi Kalimantan atas dukungan pendanaan dan fasilitas penelitian. Serta ucapan terima kasih kami sampaikan kepada berbagai pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini, baik berupa bantuan fasilitas, maupun kontribusi lainnya, sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

## References

- Adam, F., J.N. Appaturi, A. Iqbal. (2012). "The utilization of rice husk silica as a catalyst: Review and recent progress". *Catalysis Today*, 190(1): p. 2-14.
- Agus Eko Setyono, Berkah Fajar Tamtomo Kiono. (2021). "Dari Energi Fosil Menuju Energi Terbarukan: Potret Kondisi Minyak dan Gas Bumi Indonesia Tahun 2020 - 2050". *Jurnal Energi Baru & Terbarukan* Vol. 2, No. 3, pp 154 - 162.

- Aisyah Alifatul Zahidah Rohmah, Alifah Nur Aini Fajrin, Setiyo Gunawan. (2022). "Aplikasi kitosan berbasis kulit udang sebagai alternatif substitusi lilin pelapis dalam rangka peningkatan umur simpan buah-buahan: A review". ITS: 120-136.
- Alaa Fahmy, M.A. Abu Saied, Nasser Morgan, Walid Qutop, Hassan Abdelbary, Salah M. El-Bahy, Andreas Schonhals, Jorg Florian Friedrich. (2021). "Modified polyvinyl chloride membrane grafted with an ultra-thin polystyrene film: structure and electrochemical properties". 2238-7854/The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.
- Anjas Badarani, Gugus Handika, Mochammad Purwanto, Edi Pramono, Cynthia Linaya R. (2020). "Electrolyte Membrane Composite from Modified Chitosan-Vanillin and Zeolite Filler for Direct Methanol Fuel Cell Application". In Proceedings of the 1st International Conference on Industrial Technology (ICONIT 2019), pages 94-99 ISBN: 978-989-758-434-3 by SCITEPRESS – Science and Technology Publications, Lda.
- Atiek Rostika Noviyanti, Yati B. Yuliati, Diana Rakhmawaty Eddy, Solihudin, Roekmiati Tjokronegoro. (2016). "Struktur dan Morfologi Elektrolit Apatit Lantanum Silikat Berbahan Dasar Silika Sekam Padi". Jurnal Material dan Energi Indonesia Vol. 06, No. 02 1 – 6 Departemen Fisika FMIPA Universitas Padjadjaran.
- Bakar, R.A., R. Yahya, S.N. Gan, (2016). "Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk". Procedia Chemistry, 19: p. 189-195.
- Barbara E. Teixeira-Costa, Cristina T. Andrade. (2021). "Chitosan as a Valuable Biomolecule from Seafood Industry Waste in the Design of Green Food Packaging". Biomolecules, 11, 1599.
- Bauyrzhan Myrzakhmetov, Aktilek Akhmetova, Aiman Bissenbay, Mirat Karibayev, Xuemiao Pan, Yanwei Wang, Zhumabay Bakenov, Almagul Mentbayeva; Review: chitosan-based biopolymers for anion-exchange membrane fuel cell application. *R Soc Open Sci.* 1 November 2023; 10 (11): 230843. <https://doi.org/10.1098/rsos.230843>
- Cheba, B. A. (2020). "Chitosan: Properties, Modifications and Food Nanobiotechnology". Procedia Manufacturing, 46, 652-658.
- Christine Dyta Nugraeni, Lukman Atmaja, Nur Hayati, Mochammad Purwanto, Mardi Santoso, Yuli Kusumawati. (2021). "Fabrication and Characterization of Chitosan/N-Phthaloyl Composite Membrane for DMFC Application". Vol. 12, No. 2.
- Corti, H. R., & Trevani, L. (2022). Electro-osmotic flow of water-methanol mixtures through Nafion membranes revisited: Composition and temperature dependence. *Frontiers in Energy Research*, 10, 855333. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.855333>
- Danwanichakul, P., & Sirikhajornnam, P. (2013). An investigation of chitosan-grafted-poly(vinyl alcohol) as an electrolyte membrane. *Journal of Chemistry*, 2013, 642871. <https://doi.org/10.1155/2013/642871>
- Dian Permana. (2015). "Sintesis dan Karakterisasi Membran Kompleks Komposit Kitosan Asam-Fosfat/monmorilonit Termodifikasi Silan untuk Aplikasi DMFC". ITS: Tesis SK-142502.
- Diana Eka Pratiwi. (2018). "Sintesis Membran Elektrolit Padat Berbahan Dasar Kitosan". Jurnal Sainsmat, September 2018, Halaman 86-91 Vol. VII, No. 2 ISSN 2579-5686 (Online) ISSN 2086-6755 (Cetak).
- Divya K, Rana D, Alwarappan S, Sri Abirami Saraswathi MS, Nagendran A. "Investigating the usefulness of chitosan based proton exchange membranes tailored with exfoliated molybdenum disulfide nanosheets for clean energy applications". *Carbohydr Polym.* 2019;208:504–512
- Eka Cahya Muliawati, Yustia Wulandari Mirzayanti. (2021). "Membran Polieugenol Tersulfonasi (PET) sebagai Potensi Sel Bahan Bakar Metanol Langsung". *Journal of Research and Technology* Vol. 7 No. 2 Desember: 247–256.
- Eniya Listiani Dewi, Tjutjuk Ismujanto, Ganesha Tri Chandrasa. (2008). "Pengembangan dan Aplikasi Fuel Cell". Prosiding Seminar Nasional Teknoin Bidang Teknik Mesin.
- Faizah Altaf, Rida Batool, Rohama Gill, Muhammad Atif Shabir, Matthew Drexler, Faisal Alamgir, Ghazanfar Abbas, Aneela Sabir, Karl I. Jacob, (2020), Novel N-p-carboxy benzyl chitosan/poly(vinyl alcohol)/functionalized zeolite mixed matrix membranes for DMFC applications, *Carbohydrate Polymers*, Volume 237, 116111, ISSN 0144-8617, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116111>.
- Fang, J.-H. (2018). Polyimide proton exchange membranes. In S.-Y. Yang (Ed.), *Advanced polyimide*

- materials* (pp. 323–383). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812640-0.00007-X>
- Farook Adam, Jimmy Nelson Appaturi, Anwar Iqbal. (2012). "The utilization of rice husk silica as a catalyst: Review and recent progress". *Catalysis Today* 190: 2–14.
- Gladis Aros Safitri, dan Eko Santoso. (2016). "Perbandingan Variasi Komposisi PVA/Kitosan terhadap Perilaku Membran Komposit PVA/Kitosan/Grafin Oksida yang Terikat Silang Trisodium Sitrat". *Jurnal Sains dan Seni ITS* Vol. 5, No.1, 2337-3520.
- Hendri, Suhengki, dan Lubis, A. F. (2018). "Pengaruh Fouling terhadap Laju Perpindahan Panas pada Superheater Boiler Cfb Pltu Sebalang". *Jurnal Powerplant*, 6(1), 48-57.
- Ignatius Agusta. (2021). "Ekstraksi Kitosan dari Limbah Kulit Udang dengan proses Deasetilasi". *CHEMTAG Journal of Chemical Engineering*. Vol 2 No 2.
- Isiaka Olajide Odewale, et al. (2013). "Hindrances and Prospects of Ceramic Technology Development in Nigeria". *Int'l Journal of Science Innovators & Discoveries*. Vol 3(1). 14 – 22
- J.A. Baak, A.K. Pozarlik, M.J. Arentsen, G. Brem.(2019)."Techno-economic study of a zero-emission methanol based energy storage system,Energy Conversion and Management" Volume 182,Pages 530-545, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.015>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418313499>)
- Jian Indah Tri Prastiwi, Nida Fauziah Sandy, Shafira Nur Fitriah, Rizki Hermawan, Muhammad Reza Huseini. 2022. "Synthesis of Chitosan-Silica Combination Aerogel Membrane for Biodiesel Emulsion Purification". University of Muhammadiyah Jakarta, Chemical Engineering Department, 10510 Cempaka Putih Tengah, Central Jakarta, Indonesia. Volume 63, Supplement 1, 2022, Pages S379-S384.
- Jing Zhou, Jiamu Cao, Yufeng Zhang, Junfeng Liu, Junyu Chen, Mingxue Li, Weiqi Wang, Xiaowei Liu, (2021), Overcoming undesired fuel crossover: Goals of methanol-resistant modification of polymer electrolyte membranes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 138, 110660, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110660>.
- Jiujun Zhang, (2008), *PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers Fundamentals and Applications*, Springer-Verlag, London.
- Junoh, H., Jaafar, J., Nordin, N. A. H. M., Ismail, A. F., Othman, M. H. D., Rahman, M. A., Aziz, F., & Yusof, N. (2020). Performance of Polymer Electrolyte Membrane for Direct Methanol Fuel Cell Application: Perspective on Morphological Structure. *Membranes*, 10(3), 34. <https://doi.org/10.3390/membranes10030034>.
- K. Hari Gopi, Vishal M. Dhavale, Santoshkumar D. Bhat. (2019). "Development of polyvinyl alcohol/chitosan blend anion exchange membrane with mono and di quaternizing agents for application in alkaline polymer electrolyte fuel cells". 2589-2991 The Authors. Production and hosting by Elsevier B.V. on behalf of KeAi Communications Co., Ltd.
- Kadja, G.T.M., et al., (2016). "The effect of structural properties of natural silica precursors in the mesoporous-free synthesis of hierarchical ZSM-5 below 100 °C". *Advanced Powder Technology*.
- Kakati, N., Maiti, J., Das, G., Lee, S., & Yoon, Y. (2015). "An Approach of Balancing The Ionic Conductivity and Mechanical Properties of PVA Based Nanocomposite Membrane for DMFC by Various Crosslinking Agents with Ionic Liquid". *Hydrogen Energy*.
- Kingshuk Dutta, (2020), *Direct Methanol Fuel Cell Technology*, Elsevier Inc, Oxford.
- Lukman Atmaja, Mochammad Purwanto, Muhammad Taufiq Salleh, Mohamad Azuwa Mohamed, Juhana Jaafar, Ahmad Fauzi Ismail, Mardi Santoso, Nurul Widiastuti. (2019). "GPTMS-Montmorillonite-filled biopolymer chitosan membrane with improved compatibility, physicochemical, and thermal stability properties". *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences* Vol. 15, No. 4 (2019) 492-497.
- M. Ranjani, Mehboobali Pannipara, Abdullah G. Al-Sehemi, A. Vignesh, G. Gnana kumar. (2019). "Chitosan/sulfonated graphene oxide/silica nanocomposite membranes for direct methanol fuel cells". *Solid State Ionics*. Volume 338, Pages 153-160.
- Meliyana, Cut Rahmawati, Lia Handayani. (2019). "Sintesis Silika dari Abu Sekam Padi dan Pengaruhnya Terhadap Karakteristik Bata Ringan". *Elkawanie: Journal of Islamic Science and Technology* Vol. 5, No. 2.
- Meshram SMM, Gonugunta P, Taheri P, Jourdin L and Pande S (2025) Preparation of biodegradable

- membrane utilizing chitosan and polyvinyl alcohol, and assessment of its performance after coating with graphene conductive ink. *Front. Membr. Sci. Technol.* 4:1552368. doi: 10.3389/frmst.2025.1552368
- Mochammad Purwanto, Nurul Widiastuti, B. H. Saga, Hedy Gusmawan. (2021). "Synthesis of Composite Membrane Based Biopolymer Chitosan With Silica From Rice Husk Ash For Direct Methanol Fuel Cell Application". *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 830 012021.
- Mochammad Purwanto, Agus Abdul Rahmat Fadila, Liza Apriliani Chaniago, Nurul Widiastuti. (2022). "Polymer electrolyte membrane-based chitosan-vanillin/polyethylene glycol for direct methanol fuel cell applications". *AIP Conference Proceedings* 2638, 080004.
- Mochammad Purwanto, Lukman Atmaja, Mohamad Azuwa Mohamed, M. T. Salleh, Juhana Jaafar, A. F. Ismail, Mardi Santoso, Nurul Widiastuti. (2016). "Biopolymer-based electrolyte membranes from chitosan incorporated with montmorillonite crosslinked GPTMS for direct methanol fuel cells". *The Royal Society of Chemistry Adv.*, 6, 2314.
- Mochammad Purwanto, Lukman Atmaja, M.T. Salleh, Mohamad Azuwa Mohamed, Juhana Jaafar, Ahmad Fauzi Ismail, Mardi Santoso, Nurul Widiastuti. (2017). "Correlation Between Proton Conductivity, Hydrophilicity, and Thermal Stability of chitosan/Montmorillonite Composite Membrane Modified GPTMS and Their Performance in Direct Methanol Fuel Cell". *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, Vol 21 No 3: 675 – 689.
- Mochammad Purwanto, Nurul Widiastuti, Adrian Gunawan. (2021). "Preparation and Properties of Chitosan/Montmorillonite Supported Phosphotungstic Acid Composite Membrane for Direct Methanol Fuel Cell Application". *Materials Research Society of Korea*.
- Mohammad Biswas, Tabbi Wilberforce. (2023). "Dynamic thermal model development of direct methanol fuel cell". *International Journal of Thermofluids* 2666-2027/The Author(s). Published by Elsevier Ltd
- Mohy Eldin MS, AbdElmageed MH, Omer AM, Tamer TM, Yossuf ME, Khalifa RE. (2016). "Novel proton exchange membranes based on sulfonated cellulose acetate for fuel cell applications: preparation and characterization". *Int J Electrochem Sci.* 11:10150–10171.
- Mohy Eldin MS, Omer AM, Tamer TM, AbdElmageed MH, Youssef ME, Khalifa RE. (2017). "Novel aminated cellulose acetate membranes for direct methanol fuel cells (DMFCs)". *Int J Electrochem Sci.* 12:4301–4318.
- Mustafiah, Darnengsih, Zakir Sabara, Rafdi Abdul Majid. (2018). "Pemanfaatan Kitosan dari Limbah Kulit Udang Sebagai Koagulan Penjernih Air". *Journal Of Chemical Process Engineering* Vol.03, No.01.
- Noëlla Evano, Rochdi El Abdi, Marcel Poulain. (2016). "Lifetime modeling of silica optical fiber in static fatigue test". *Journal of Applied Research and Technology* Volume 14, Issue 4, Pages 278-285.
- Nugraeni CD, Hayati N, Santoso M, Kusumawati Y, Atmaja L. "Preparation of proton exchange membrane based on chitosan phthaloyl and chitosan blend for direct methanol fuel cell application". *AIP Conf Proc.* 2018;2049:020077 (6 pp).
- Nurul Widiastuti, M. Faqri Fahrozi Huzein, Taufik Qodar Romadiansyah. (2021). "Preparasi dan Karakterisasi Membran Gabungan PSf/PEG dengan Variasi Pengisi KTZ dan KTZ Teroksidasi untuk Aplikasi pada Larutan Kristal Violet". *Akta Kimindo* Vol. 6(2), 136-152.
- P.U. Nzereogu, A.D. Omah, F.I. Ezema, E.I. Iwuoha, A.C. Nwanya. 2023. "Silica extraction from rice husk: Comprehensive review and applications". Department of Metallurgical and Materials Engineering, University of Nigeria, Nsukka, Nigeria. Department of Physics and Astronomy, University of Nigeria, Nsukka, Nigeria. African Center of Excellence, ACE-SPED, University of Nigeria, Nsukka, Nigeria. SARChI Chair for NanoElectrochemistry and Sensor Technology, University of the Western Cape, Bellville, Cape Town, South Africa. Volume 4, 100111.
- Pasini Cabello SD, Mollá S, Ochoa NA, Marchese J, Giménez E, Compañ V. "New bio-polymeric membranes composed of alginate-carrageenan to be applied as polymer electrolyte membranes for DMFC". *J Power Sources.* 2014;265:345–355.
- Prisma Trida Hardani, Dewi Perwito, Nadia Aisah Mayzika. (2021). "Review Artikel: Isolasi Kitin dan Kitosan dari Berbagai Sumber Bahan Alam". *Prosiding Seminar Nasional Hasil Riset dan Pengabdian III*.
- S.Norsuraya, H.Fazlena, R.Norhasyimi. (2016). "Sugarcane Bagasse as a Renewable Source of Silica to Synthesize Santa Barbara Amorphous-15 (SBA-15)". *Procedia Engineering* 148: 839 – 846.

Ayu Oktari Rahman, Umi Sholikah, Mochammad Purwanto  
m.purwanto@lecturer.itk.ac.id : Optimasi Filler Polivinil Alkohol Membran Elektrolit Berbasis Biopolimer Kitosan Untuk Aplikasi Sel Bahan Bakar

- Shaari N, Kamarudin SK. "Performance of crosslinked sodium alginate/ sulfonated graphene oxide as polymer electrolyte membrane in DMFC application: RSM optimization approach". *Int J Hydrogen Energy*. 2018;43:22986–23003.
- Shirdast A, Sharif A, Abdollahi M. "Effect of the Incorporation of sulfonated chitosan/sulfonated graphene oxide on the proton conductivity of chitosan membranes". *J Power Sources*. 2016;306:541–551.
- Thareny Ravichandrana, Juhana Jaafara, Hamid Ilbeygi, Mochammad Purwanto. (2021). "Review on The Development of Fuel Cells and Future Prospects". *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)* 83:3 75–84.
- Tiago D.O. Gadim, Francisco J.A. Loureiro, Carla Vilela, Nataly Rosero-Navarro, Armando J.D. Silvestre, Carmen S.R. Freire, Filipe M.L. Figueiredo. 2017. "Protonic conductivity and fuel cell tests of nanocomposite membranes based on bacterial cellulose". Aveiro Institute of Materials, Department of Materials and Ceramic Engineering, University of Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal. *Electrochimica Acta* 233 (2017) 52–61.
- Tipsotanaiyana, N., L. Jarupan, S. Noppankudilograf, (2015), "Enhancement of flexographic print quality on bleached kraft liner using nano-silica from rice husk", *Progress in Organic Coatings*, 87: p. 232-241.
- Ufuk Abaci, Esra Çoban, H. Yuksel Guney, B. Şebnem Şimşiroğlu, Julide Hizal, Mesut Yılmazoğlu. 2023. "Dielectric behavior and proton conductivity of ultrasound-assisted graphene oxide/sulfonated poly(ether ether ketone) composite electrolytes". *Diamond and Related Materials*. Volume 140, Part A, 110486. Kocaeli University, Ford Otosan Ihsaniye Automotive Vocational School, 41680 Golcuk, Kocaeli, Turkey.
- Vijayalekshmi V, Khastgir D. "Chitosan/partially sulfonated poly(vinylidene fluoride) blends as polymer electrolyte membranes for direct methanol fuel cell applications". *Cellulose*. 2018;25:661–681.
- Xu X, Li R, Tang C, et al. "Cellulose nanofiber-embedded sulfonated poly(ethersulfone) membranes for proton exchange membrane fuel cells". *Carbohydr Polym*. 2018;184:299–306.
- Yang Yang, Yongjian Su, Xun Zhu, Dingding Ye, Rong Chen, Qiang Liao. (2022). "Flexible enzymatic biofuel cell based on 1, 4-naphthoquinone/ MWCNT-Modified bio-anode and polyvinyl alcohol hydrogel electrolyte". Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing, 400030, China.
- Zhou, T., Shao, R., Chen, S., He, X., Qiao, J., & Zhang, J. (2015). A review of radiation-grafted polymer electrolyte membranes for alkaline polymer electrolyte membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 293, 946–975. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.06.026>