

Pengaruh Penambahan Massa Filler SiO₂ pada Membran PEMFC Berbasis Nano Chitosan Oligosaccharida-Polyvinyl Alcohol

Wishnu Yudha Baretta, Yuli Setyorini, dan Azzah Dyah Pramata
Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: yuli_setyo@mat-eng.its.ac.id

Abstrak—Ancaman terbesar yang dihadapi negara-negara saat ini adalah perubahan iklim yang terjadi karena penggunaan bahan bakar fosil secara eksklusif. Oleh karena itu, mitigasi atau peralihan ke sumber energi terbarukan dan berkelanjutan diperlukan untuk menghentikan hal ini. Salah satu upaya transisi energi yang digunakan yaitu pemanfaatan hidrogen dengan *fuel cell* sebagai moda transportasi. *Fuel cell* adalah suatu perangkat yang secara langsung mengubah bahan bakar kimia menjadi tenaga listrik tanpa adanya pembakaran. *Fuel cell* memiliki beberapa jenis seperti, PEMFC, AFC, DMFC, PAFC, MCFC, dan SOFC. Dari jenis sel bahan bakar tersebut, PEMFC muncul sebagai yang terdepan, hal ini dikarenakan PEMFC memiliki berbagai kelebihan. Komponen utama pada PEMFC merupakan *membran electrode assembly* (MEA) yang terdiri dari membran penukar proton dengan *catalyst layer* serta *gas diffusion layer* di tiap sisi. Bagian utama MEA merupakan membran yang berperan untuk transfer proton. Membran yang biasanya digunakan pada saat ini adalah nafion. Namun, nafion memiliki beberapa kekurangan seperti, harganya yang mahal, tidak *biodegradable*, serta tidak dapat beroperasi pada kondisi temperatur yang tinggi. Maka dari itu, akan dilakukan penelitian penambahan *filler* SiO₂ pada membran PEMFC berbasis nano COS-PVA. Yang diharapkan dapat menggantikan membran nafion dengan sifatnya yang *biodegradable*, biaya manufaktur yang murah, dan mampu beroperasi pada temperatur tinggi. Pada penelitian ini menggunakan variasi penambahan kandungan silika (SiO₂) pada komposisi membran nano COS sebanyak 8 %, 10 %, dan 12 %. Membran kemudian diuji karakterisasi menggunakan FTIR, XRD, Konduktivitas (EIS), TGA, *water uptake*, *swelling ratio*, dan pengujian tarik. Didapatkan bahwa membran nano COS *shrimp* dengan penambahan kandungan silika sebanyak 12% dapat bekerja maksimal dengan nilai *water uptake*, *swelling ratio*, dan konduktivitas sebesar 28.787%; 26.468%; 0.471259 S/cm.

Kata Kunci—Biodegradable, Membran, Nafion, Nano COS, PEMFC, PVA, Silika.

I. PENDAHULUAN

A NCAMAN terbesar yang dihadapi negara-negara saat ini di abad ke 21 adalah perubahan iklim. Dampak perubahan iklim sangat mengancam keberlangsungan makhluk hidup, karena akan menghancurkan keanekaragaman hayati, mengurangi ketahanan pangan, mendorong penyebaran penyakit, dan membawa berbagai bencana alam [1]. Peningkatan suhu dan perubahan curah hujan adalah tanda-tanda perubahan iklim. Misalnya, temperatur rata-rata di Indonesia dari tahun 1981-2010 adalah 26.6 °C, sedangkan temperatur rata-rata pada tahun 2021 adalah 27 °C [2]. Penggunaan bahan bakar fosil secara eksklusif adalah salah satu hal yang berkontribusi terhadap perubahan iklim. Bahan bakar fosil, termasuk batu bara dan

minyak bumi berkontribusi lebih dari 85% sumber energi dunia saat ini. Oleh karena itu, mitigasi atau peralihan ke sumber energi terbarukan dan berkelanjutan diperlukan untuk menghentikan hal ini [3]. Salah satu upaya transisi energi yang digunakan yaitu pemanfaatan hidrogen dengan *fuel cell* sebagai moda transportasi. Hidrogen merupakan unsur yang paling melimpah di bumi dimana 75% berbentuk sebagai molekul dan 90% berbentuk sebagai atom. Gas hidrogen pada sistem *fuel cell* akan menghasilkan air murni sebagai produk sampingan, serta tidak mengeluarkan karbon dioksida [4].

Fuel cell adalah suatu perangkat yang secara langsung mengubah bahan bakar kimia menjadi tenaga listrik tanpa adanya pembakaran. Sel bahan bakar memiliki efisiensi yang baik berkisar antara 40-50%. *Fuel cell* memiliki beberapa kelebihan, diantaranya perakitan yang sederhana serta pengoprasian yang tidak menimbulkan getaran. Secara umum, *fuel cell* dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan suplai bahan bakar, elektrolit, suhu, dan aplikasi yakni alkaline *fuel cell* (AFC), proton exchange membrane *fuel cell* (PEMFC), direct methanol *fuel cell* (DMFC), phosphoric acid *fuel cell* (PAFC), molten carbonate *fuel cell* (MCFC), dan solid oxide *fuel cell* (SOFC). dari jenis sel bahan bakar tersebut, PEMFC muncul sebagai yang terdepan, hal ini dikarenakan PEMFC memiliki berbagai kelebihan seperti efisiensi operasional pada rentang temperatur yang luas, ketahanan sistem, dan densitas daya tinggi [5]. Komponen utama pada PEMFC merupakan *membran electrode assembly* (MEA) yang terdiri dari membran penukar proton dengan *catalyst layer* serta *gas diffusion layer* di tiap sisi. Pada komponen ini tercipta produksi arus listrik melalui reaksi elektrokimia serta distribusi proton [6]. Bagian utama MEA merupakan membrane yang berperan untuk transfer proton dari anoda ke katoda, isolator terhadap pergerakan electron ke sirkuit eksternal, memisahkan katoda serta anoda untuk pergerakan ion, serta membatasi tercampurnya reaktan [7].

Membran elektrolit yang banyak digunakan terbuat dari bahan polimer. Penggunaan membran polimer sebagai penghantar proton (H⁺) harus memenuhi beberapa syarat diantaranya, resistansi rendah, memiliki konduktivitas proton yang baik, kestabilan mekanis yang baik, bahan baku mudah didapatkan, dan ramah lingkungan. Meningkatnya mobilitas proton dapat meningkatkan nilai dari konduktivitas proton sehingga akan mempengaruhi kinerja dari sel bahan bakar itu sendiri. Nafion, merupakan sebuah polimer *sulfonat tetrafluoroetilena* yang telah lama diakui sebagai bahan standar dalam industri ini karena ketahanannya yang baik terhadap oksidasi dan kemampuannya untuk mengkonduksi proton dengan baik. Namun, ada beberapa kekurangan yang

Tabel 1.
Mix design

Kode Sample	Kitosan (gram)	PVA (gram)	Kandunga Silika (%)	GA (ml)	Air (ml)
KPS8			8		
KPS10			10		
KPS12			12		
UPS8			8		
UPS10	6	4	10	0,6	30
UPS12			12		
BPS8			8		
BPS10			10		
BPS12			12		

Tabel 2.
Hasil perhitungan nilai ukuran kristal membran nano COS

Sampel	FWHM (rad)	2θ (°)	Ukuran Kristal (nm)
KPS8	0.1171	27.024	69.773
KPS10	0.09	28.9325	91.160
KPS12	0.2342	27.3643	34.912
UPS8	0.09	27.6297	41.226
UPS10	0.09	27.6297	90.899
UPS12	0.09	26.6992	90.899

Tabel 3.
Hasil pengujian konduktivitas proton membran nano COS

Sampel	Konduktivitas (S/cm)
KPS8	0.130047
KPS10	0.221117
KPS12	0.130047
UPS8	0.180928
UPS10	0.317557
UPS12	0.471259
BPS8	0.0404162
BPS10	0.0982426
BPS12	0.0343055

terdapat pada nafion, seperti harganya yang mahal, serta tidak dapat beroperasi pada kondisi temperatur yang tinggi [8]. Selain itu, nafion juga tidak ramah lingkungan karena adanya kandungan unsur flour sehingga tidak dapat terurai secara alami di lingkungan [9].

Saat ini material alternatif pengganti nafion terus diteliti untuk memenuhi kebutuhan membran yang ideal. Polimer alami seperti kitosan merupakan salah satu material alternatif pengganti nafion sebagai membran sel bahan bakar. Kitosan dapat diperoleh dari limbah kulit udang, cangkang rajungan, dan cangkang maggot. Kitosan memiliki sifat konduktif yang baik, mudah terbiodegradasi, serta memiliki struktur kimia yang teratur. Akan tetapi, kitosan memiliki keterbatasan terhadap daya tahan pada temperatur tinggi. Konduktivitas kitosan akan menurun saat temperatur operasi dinaikan. Untuk mengatasi hal tersebut biasanya kitosan dikombinasikan dengan bahan lain seperti *Poly Vinyl Alcohol* (PVA). PVA memiliki titik leleh sekitar 228-256 °C, sehingga memungkinkan untuk dapat beroperasi pada temperatur yang tinggi [10]. Salah satu cara untuk menggabungkan kitosan dengan PVA adalah menggunakan *crosslink agent*. *Crosslinking* merupakan reaksi yang dapat membuat struktur polimer mengalami perluasan membentuk struktur jaringan dengan mengubungkan rantai-rantai polimer sehingga polimer yang awalnya cair menjadi gel atau padat [11]. Salah satu *crosslink agent* dapat digunakan untuk menggabungkan kitosan dengan PVA adalah gultraldehida (GA). Pada penelitian yang dilakukan Baroudi *et al.*, (2018) menginformasikan beberapa aspek positif dari penambahan GA pada kitosan, diantaranya dapat meminimalisir *sweelling* dari membran, mendorong sifat mekanik membran untuk

mengalami peningkatan, dapat memperbaiki struktur, hingga memodifikasi penyerapan. Penggunaan *filler* anorganik seperti silika juga dapat ditambahkan sebagai aditif pada campuran membran polimer untuk meningkatkan sifat fisikokimia matriks inang seperti, sifat mekanik dan konduktivitas proton dari membran polimer elektrolit [12]. Pada penelitian yang dilakukan Rosli *et al.*, (2021) melaporkan bahwa penambahan *filler* SiO₂ dengan variasi (0.5-10 wt.%) pada membran *N-methylene phosphonic chitosan/poly vinyl alcohol* (NMPC/PVA) dapat meningkatkan konduktivitas proton dari 8.76 x 10⁻⁵ S/cm menjadi 5.08 x 10⁻⁴ S/cm. Oleh karena itu, berdasarkan uraian sebelumnya akan dilakukan penelitian tentang *filler* SiO₂ pada membran PEMFC berbasis *nano oligosaccharides chitosan-poly vinyl alcohol* (*nano* COS-PVA) untuk mengetahui karakteristik membran yang sesuai kebutuhan aplikasi PEMFC.

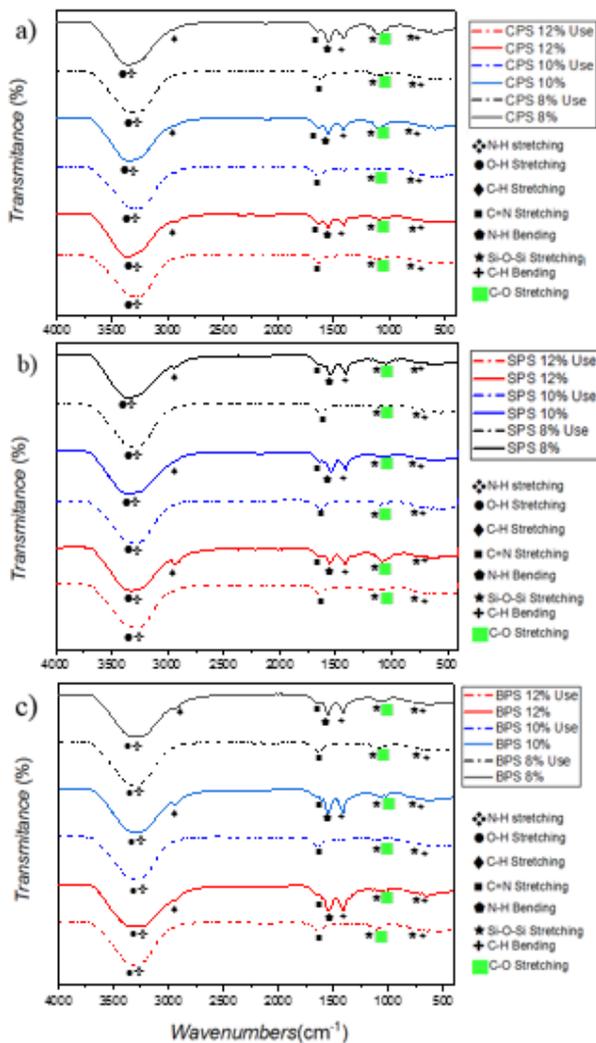
II. METODE PENELITIAN

A. Material dan Alat Penelitian

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah *Aquades*, Polivinil Alkohol (PVA), Glutaraldehida (GA), Kitosan, dan Silika. Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah Gelas *Beaker*, Gelas ukur, Neraca Digital, Spatula, *Stirring Plate*, Cetakan Membran, Alat uji FTIR, Alat uji XRD, Alat uji EIS, dan Alat uji Tarik.

B. Proses Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat beberapa tahapan proses yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan



Gambar 2. Hasil FTIR membran nano COS: a) crab, b) shrimp, c) BSF.

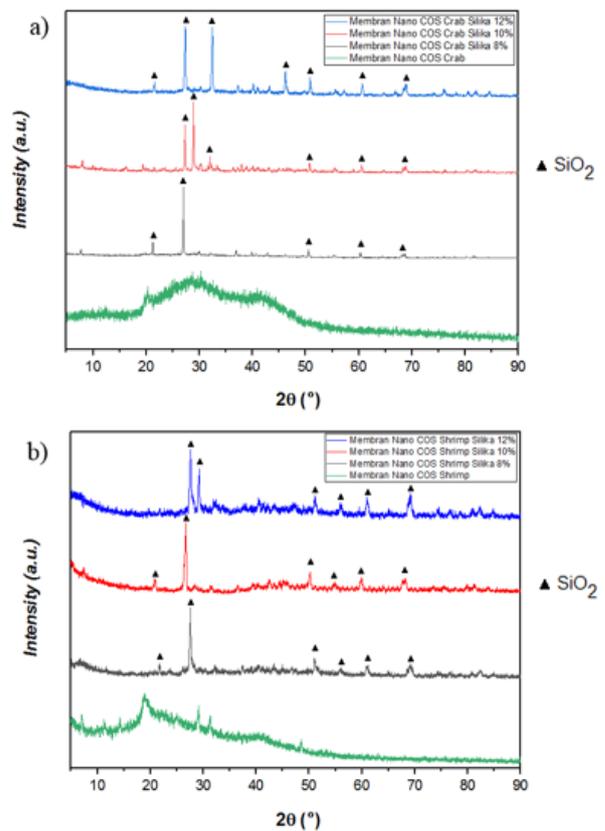
massa *filler* SiO₂ pada membran PEMFC berbasis nano chitosan oligosaccharida-polyvinyl alcohol. Beberapa tahapan yang dilakukan adalah persiapan alat dan bahan, pembuatan mix design komposisi membran, pembuatan membran, dan pengujian sampel membran.

C. Perancangan Mix Design

Perancangan *mix design* digunakan untuk menentukan jumlah masing-masing bahan yang diperlukan dalam suatu campuran membran. *Mix design* pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi penambahan silika terhadap membran PEMFC berbasis nano kitosan oligosakarida dan polivinil alkohol yang disusun pada Tabel 1.

D. Pembuatan Membran

Pembuatan membran dilakukan dengan menambahkan kitosan ke dalam 30 ml *Aquades* sebanyak 2 gram, dalam keadaan diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 10 menit dengan kecepatan pengadukan 130 rpm dan *temperature* 60°C, menambahkan *crosslink* glutaraldehid sebanyak 0,6 gram dalam keadaan diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 2 menit, Melarutkan PVA sebanyak 6 gram. Sehingga rasio PVA dan kitosan adalah 3:1, Mengaduk larutan dengan *magnetic stirrer* selama 1 jam dengan kecepatan pengadukan 140 rpm dan *temperature* 140 °C, Menambahkan silika berdasarkan perhitungan mix design dalam keadaan diaduk



Gambar 1. Hasil XRD membran nano COS a) crab dan b) shrimp.

menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan pengadukan 140 rpm dan *temperature* 70 °C selama 1 jam, Menuangkan ke cetakan *silicon* dan dibiarkan selama 1 hari dalam temperatur kamar yang tidak banyak terkontaminasi.

E. Pengujian

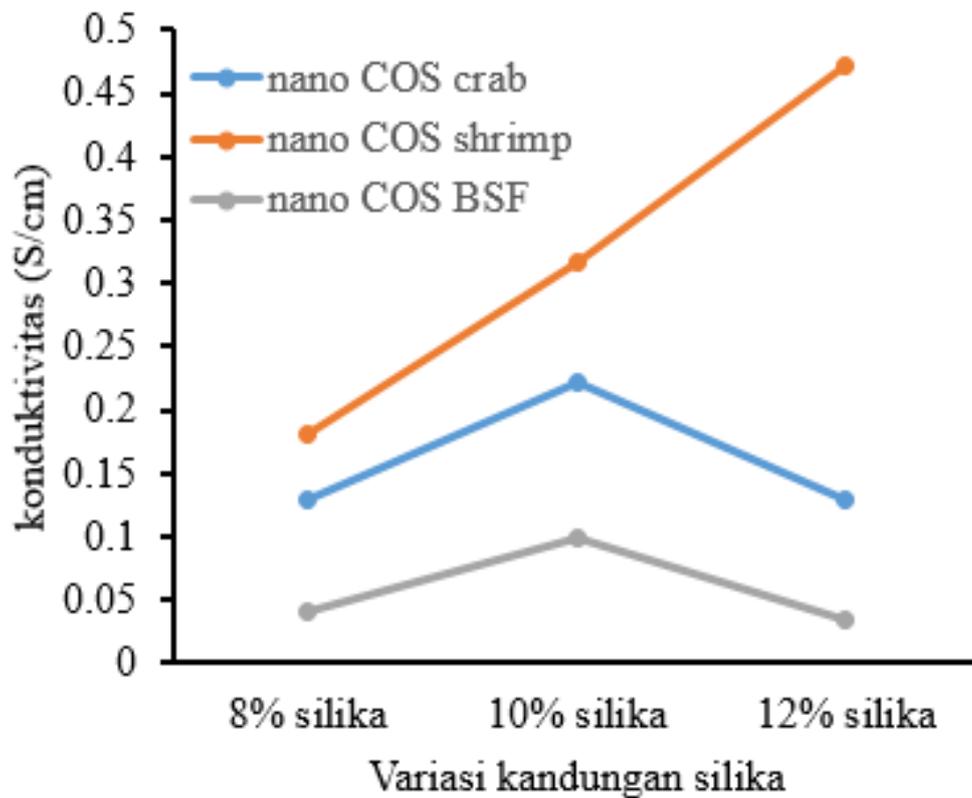
Terdapat beberapa pengujian yang dilakukan untuk membantu menganalisis data dari penelitian ini. Pengujian FTIR diperlukan untuk mengidentifikasi senyawa serta mendeteksi gugus fungsi dari sampel membran. Pengujian XRD pada penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi struktur kristal pada membran hasil penelitian. Pengujian EIS digunakan untuk menentukan impedansi pada membran. Pengujian *water uptake* dan *swelling ratio* digunakan untuk mengetahui penyerapan dan rasio pembengkakan pada membran. Pengujian tarik digunakan untuk menentukan bagaimana perilaku material di bawah beban tarik.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian FTIR

Pada hasil FTIR membran nano COS pada gambar Gambar 1. terdapat *peak* pada *wavenumbers* 3351 cm⁻¹ yang menunjukkan gugus O-H *stretching* yang tumpang tindih dengan N-H *stretching*, 2935 cm⁻¹ adalah gugus C-H *stretching*, 1645 cm⁻¹ merupakan gugus C=N *stretching*, 1550 cm⁻¹ merupakan vibrasi N-H *bending*, 1412 cm⁻¹ adalah gugus C-H *bending*, 1075 cm⁻¹ adalah gugus Si-O-Si *stretching* yang tumpang tindih dengan C-O *stretching*, 783 cm⁻¹ adalah gugus C-H *bending* yang tumpang tindih dengan gugus Si-O-Si *stretching* dari molekul SiO₂.

Selain itu, juga dilakukan pengujian FTIR pada membran nano COS yang telah dilakukan pengujian *Electrochemical*



Gambar 3. Perbandingan konduktivitas membran nano COS.

Impedance Spectroscopy (EIS). Dari hasil pengujian FTIR membran nano COS yang telah di uji EIS terdapat beberapa gugus fungsi yang hilang seperti gugus C-H *stretching* pada *wavenumbers* 2935 cm^{-1} , gugus N-H *bending* pada *wavenumber* 1550 cm^{-1} , serta gugus C-H *bending* pada *wavenumber* 1412 cm^{-1} . Adanya H_2SO_4 yang kuat bisa menyebabkan reaksi kimia dengan komponen membran, terutama pada ikatan C-H. Sehingga mengubah atau memutuskan ikatan C-H. Selain itu, H_2SO_4 yang sangat asam dapat menyebabkan degradasi polimer seperti PVA dan chitosan. Degradasi ini dapat menghilangkan gugus C-H melalui pemutusan rantai polimer atau perubahan struktur molekul. Pada *peak wavenumber* 1645 cm^{-1} terjadi naiknya intensitas gugus fungsi C=N *stretching* dikarenakan penggunaan H_2SO_4 dalam EIS yang dapat mempengaruhi struktur kimia dari membran. Asam sulfat dapat memprotonasi gugus amina ($-\text{NH}_2$) pada chitosan, yang kemudian dapat berinteraksi lebih kuat dengan glutaraldehid dan membentuk lebih banyak gugus imina (C=N), sehingga meningkatkan intensitas pada puncak tersebut.

B. Hasil Pengujian XRD

Berdasarkan Gambar 2 membran nano COS *crab* menunjukkan puncak yang khas pada posisi $2\theta = 27.0240^\circ$, 50.654° , 60.521° , dan 68.415° untuk SiO_2 yang mengindikasikan bahwa SiO_2 pada membran nano COS tersebar dan melekat dengan merata. Variasi silika yang terlalu banyak menyebabkan adanya puncak baru seperti pada $2\theta = 28.933^\circ$ dan 32.461° . Puncak pada posisi $2\theta = 28.933^\circ$ mengindikasikan adanya kuarsa, dimana kuarsa memiliki puncak difraksi yang kuat pada sekitar sudut ini. Sedangkan adanya puncak difraksi pada $2\theta = 32.461^\circ$ disebabkan karena penambahan silika yang banyak mengakibatkan perubahan strain atau tegangan dalam kristal. Tegangan ini dapat

mengubah jarak antar bidang kristal sehingga menggeser posisi puncak difraksi. Kemudian untuk membran nano COS *shrimp* juga menunjukkan puncak yang khas pada posisi $2\theta = 27.629^\circ$, 51.112° , 55.904° , 60.697° , dan 69.926° untuk SiO_2 . Pada variasi membran nano COS *shrimp* 12% silika memiliki sedikit perbedaan dimana adanya puncak pada $2\theta = 29.239^\circ$ yang menunjukkan adanya kuarsa. Adanya puncak kuarsa silika ini diakibatkan karena jumlah variasi silika yang ditambahkan terlalu banyak, nilai dari ukuran kristal pada membran ditunjukkan pada Tabel 2.

Nilai ukuran kristal dipengaruhi oleh FWHM, dimana semakin besar nilai FWHM maka semakin kecil ukuran kristal. Semakin kecil ukuran kristal maka akan berpengaruh pada luas permukaan yang semakin besar.

C. Hasil Pengujian Konduktivitas

Preparasi pengujian konduktivitas dilakukan dengan menghidrasi membran ke dalam larutan *aquades* kemudian di uji menggunakan alat *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS) dengan larutan H_2SO_4 . Data hasil pengukuran kemudian diolah dengan *software* CorrTest. Dari Gambar 3 dan Tabel 3, dapat dilihat bahwa nilai konduktivitas proton terbesar pada membran nano COS *shrimp* dengan variasi silika 12% yaitu sebesar 0.471259 S/cm . Karena tingginya konsentrasi gugus fungsi mengakibatkan konduktivitas membran menjadi meningkat sehingga yang mempermudah perpindahan muatan. Konduktivitas proton pada membran nano COS BSF sedikit lebih rendah di banding dengan membran nano COS *crab* dan *shrimp* hal ini ditunjukkan pada hasil FTIR nano COS BSF yang memiliki gugus hidroksil yang lebih kuat yang ditunjukkan pada *peak wavenumbers* 3522 cm^{-1} yang lebar. Gugus hidroksil yang terlalu kuat dapat mengikat proton secara berlebihan sehingga menghambat transport proton

Tabel 4.
Hasil pengujian *water uptake* dan *swelling ratio* membran nano COS

Sample	Water uptake (%)	Swelling ratio (%)
KPS8	13.948	12.620
KPS10	9.678	7.742
KPS12	7.699	7.075
UPS8	30.267	28.969
UPS10	29.375	28.684
UPS12	28.787	26.468
BPS8	20.151	19.319
BPS10	25.689	26.560
BPS12	19.223	19.284

Tabel 5.
Hasil pengujian tarik membran nano COS

Sample	Tensile Strength (Mpa)	Modulus Young (Mpa)	Elongation (%)
KPS8	0.39	0.1	48.22
KPS10	0.22	0.12	45.70
KPS12	0.09	0.31	39.94
UPS8	0.14	0.01	56.05
UPS10	0.14	0.1	52.05
UPS12	0.08	0.41	49.07

melalui membran. Akibatnya, nilai konduktivitas proton dapat berkurang [13].

D. Hasil Pengujian Water Uptake dan Swelling Ratio

Presentase nilai *water uptake* dan *swelling ratio* pada membran nano COS dapat dilihat pada Tabel 4.

Diketahui bahwa kemampuan *water uptake* terbesar terjadi pada membran nano COS *shrimp* dengan variasi silika 8% dengan persentase 30.267 %. Sementara kemampuan *water uptake* terkecil terjadi pada membran nano COS *crab* dengan variasi silika 12% dengan persentase 7.699 %. Pengaruh penambahan silika dapat menurunkan presentase *water uptake* dengan bertambahnya kandungan silika pada membran nano COS karena interaksi yang kuat pada matriks membran. Bertambahnya kandungan silika pada membran menyebabkan struktur membran menjadi padat serta mengurangi gugus -OH pada PVA.

Presentase *swelling ratio* juga menurun dengan naiknya jumlah kandungan silika yang ditambahkan. Diketahui bahwa kemampuan *swelling ratio* terbesar terjadi pada membran nano COS *shrimp* dengan variasi silika 8% dengan persentase 28.969 %. Sementara kemampuan *swelling ratio* terkecil terjadi pada membran nano COS *crab* dengan variasi silika 12% dengan persentase 7.075 %. Hal ini berbanding lurus dengan kemampuan *water uptake* pada membran dimana *swelling ratio* besar yang disebabkan karena kemampuan *water uptake* yang besar.

E. Hasil Pengujian Tarik

Nilai sifat mekanik hasil pengujian tarik membran nano COS disajikan pada Tabel 5.

Dapat dilihat bahwa penambahan silika menyebabkan *tensile strength* yang cenderung semakin menurun. Hal tersebut dikarenakan penambahan silika yang semakin banyak dapat membuat membran semakin getas sehingga juga menyebabkan turunnya nilai *elongation* pada membran nano COS. Turunnya *elongation* pada membran disebabkan karena berkurangnya porositas pada membran yang menjadi lebih kecil sehingga membran menjadi lebih padat [12]. Penambahan silika juga meningkatkan *modulus young* pada membran nano COS. Dimana kekuatan mekanik dapat ditingkatkan melalui interaksi antara gugus -OH pada PVA dan gugus -NH₂ pada kitosan. Selain itu, Sifat hard ceramic

silika yang ditambahkan memungkinkan matrik untuk menahan beban dan mencegah permukaan terdeformasi.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil data dan diskusi dari penelitian ini, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut: membran nano COS dapat diterapkan untuk aplikasi membran fuel cell menggantikan nafion yang cenderung tidak ramah lingkungan. Hal tersebut ditunjukkan dengan performa membran yang baik seperti konduktivitas proton, *water uptake*, dan *swelling ratio*. Nilai konduktivitas proton terbaik pada membran nano COS *shrimp* dengan variasi kandungan silika 12% sebesar 0.471259 S/cm. Kemudian nilai *water uptake* terbesar pada membran nano COS *shrimp* sebesar 30.267% dan nilai *swelling ratio* terbaik pada membran nano COS *crab* sebesar 7.075%.

Pengaruh penambahan silika pada membran nano COS dapat meningkatkan kekuatan mekanik serta konduktivitas proton pada membran. Sifat hard ceramic silika yang ditambahkan memungkinkan matrik untuk menahan beban dan mencegah permukaan terdeformasi hal ini dapat dilihat dari nilai *elongation* tertinggi pada membran yang tidak diberi penambahan silika sebesar 464.66% dan setelah diberi penambahan silika menjadi 39.94% pada penambahan silika sebanyak 12%. Hal tersebut menunjukkan berkurangnya porositas pada membran sehingga membran menjadi lebih padat. Selain itu, silika memiliki kapasitas retensi air yang besar dan mampu menahan air dalam kondisi suhu tinggi sehingga dapat meningkatkan konduktivitas proton pada membran dengan membentuk jalur alternatif konduktivitas proton. Nilai konduktivitas membran sebelum diberi penambahan silika sebesar 0.09 S/cm dan setelah diberi penambahan silika menjadi 0.4712 S/cm pada penambahan kandungan silika sebanyak 12%

DAFTAR PUSTAKA

- [1] X. Fan, C. Miao, Q. Duan, C. Shen, and Y. Wu, "Future climate change hotspots under different 21st century warming scenarios," *Earth's Futur.*, vol. 9, no. 6, 2021.
- [2] R. Kurniawan, "Dampak perubahan iklim dan cuaca ekstrem terhadap sistem dan transisi energi," *Buletin Pertamina Energy Institute*, vol. 8, no. 3, 2022.
- [3] Q. Abbas, M. Mirzaeian, M. R. Hunt, P. Hall, and R. Raza, "Current

- state and future prospects for electrochemical energy storage and conversion systems," *Energies*, vol. 13, no. 21, 2020.
- [4] L. Fan, Z. Tu, and S. H. Chan, "Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review," *Energy Reports*, vol. 7, 2021.
- [5] B. Ozigi, O. Odi, and S. Amiebenomo, "Efficiency analysis of hydrogen fuel cell power systems for off-grid applications," *Int. J. Eng. Adv. Technol. Stud.*, vol. 11, no. 1, pp. 37--54, 2023.
- [6] A. Baroutaji, J. Carton, J. Stokes, and A.-G. Olabi, "Design and development of proton exchange membrane fuel cell using open pore cellular foam as flow plate material," *J. Energy Challenges Mech.*, vol. 1, no. 7, 2014.
- [7] T. K. Maiti, J. Singh, J. Majhi, and A. Ahuja, "Advances in polybenzimidazole based membranes for fuel cell applications that overcome Nafion membranes constraints'," *Polymer (Guildf)*, vol. 255, 2022.
- [8] K. A. Mauritz and R. B. Moore, "State of understanding of nafion," *Chem. Rev.*, vol. 104, no. 10, pp. 4535--4586, 2004.
- [9] M. Bygd, "Microbial Degradation of Polyfluorinated Chemicals and Detection of Fluoride via a Colorimetric Assay," Biological Sciences Department: University of Minnesota, 2022.
- [10] I. Noezar, "Membran PVA-chitosan crosslinked untuk pemisah campuran etanol-air secara pervaporasi," *J. Tek. Kim. Indones.*, vol. 7, no. 1, pp. 724--730, 2008.
- [11] A. K. Mitra, D. Kwatra, and A. D. Vadlapudi, *Drug Delivery*. Burlington: Jones & Bartlett Publishers, 2014. ISBN: 978-444-5000
- [12] Y. Ying, S. Kamarudin, and M. Masdar, "Silica-related membranes in fuel cell applications: An overview," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 33, 2018.
- [13] F. K. Sari and N. Widiastuti, "The Addition of Polyetherimide in Composite Membran Chitosan/Zeolite-a for Increase Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Pemfc)," Department of Chemistry: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.