

Analisis Pengaruh Variasi Tekanan *Hot Press Decal Transfer* terhadap Morfologi *Membrane Electrode Assembly* dan Performa Elektrokimia *PEM Fuel cell*

Berlian Aulia Rachman, Lukman Noerochim dan Agung Purniawan
Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: lukmanits@gmail.com

Abstrak—Saat ini, bahan bakar fosil yang memenuhi 80% kebutuhan energi dunia memiliki keterbatasan dan cepat atau lambat akan habis. *Proton Exchange Membrane Fuel cell* (PEMFC) dapat menjadi solusi untuk masalah ini karena efisiensinya yang tinggi dan ramah lingkungan. Namun terdapat beberapa kendala, seperti kinerja, daya tahan, dan efektivitas biaya, sehingga pengembangan *Membrane Electrode Assemblies* (MEA) yang merupakan tempat terjadinya reaksi elektrokimia harus dioptimalkan. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis pengaruh perubahan tekanan *hot press* terhadap morfologi dan kinerja elektrokimia *fuel cell* selama proses transfer decal. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah fabrikasi MEA dengan variasi tekanan *hot press* 5, 6, dan 7 MPa. Berdasarkan hasil SEM didapatkan bahwa pengaruh tekanan terhadap morfologi adalah porositas terus menurun linier dengan penambahan tekanan *hot press*. Morfologi yang terbentuk untuk sampel 5, 6, dan 7 MPa yaitu berupa struktur karbon tipikal yang terdiri dari partikel karbon primer yang teraglomerasi dengan diameter 58-61 nm, dan pori-pori yang terdistribusi secara acak. Berdasarkan hasil pengujian performa elektrokimia didapatkan bahwa *fuel cell* dengan variasi tekanan 6 MPa merupakan sampel yang memiliki performa paling baik diantara variasi lainnya yaitu memiliki *power density* sebesar 8,21 mW/cm² dan R_{Total} yang terkecil sebesar 101,5 ohm.

Kata Kunci—*Decal Transfer, Fuel Cell, Hot Press, MEA, Porositas.*

I. PENDAHULUAN

BERDASARKAN *Paris Agreement*, negara-negara sepakat untuk membatasi kenaikan temperatur global rata-rata jauh di bawah 2°C selama 10 tahun ke depan dan mencapai nol bersih sekitar pertengahan abad. Di tingkat global, mencapai *net-zero emissions* berarti menyeimbangkan emisi antropogenik (yang disebabkan oleh manusia) dan serapan gas rumah kaca dalam jangka waktu tertentu. Dalam praktiknya, *net-zero emissions* berarti mengurangi emisi antropogenik seperti yang berasal dari kendaraan dan pabrik berbahan bakar fosil sedekat mungkin ke nol. Di sisi lain, bahan bakar fosil yang memenuhi 80% dari kebutuhan energi dunia saat ini memiliki batas dan cepat atau lambat akan habis juga menyebabkan masalah lingkungan yang cukup serius, seperti pemanasan global, perubahan iklim, mencairnya lapisan es, naiknya permukaan laut, hujan asam, polusi, penipisan lapisan ozon, tumpahan minyak[1].

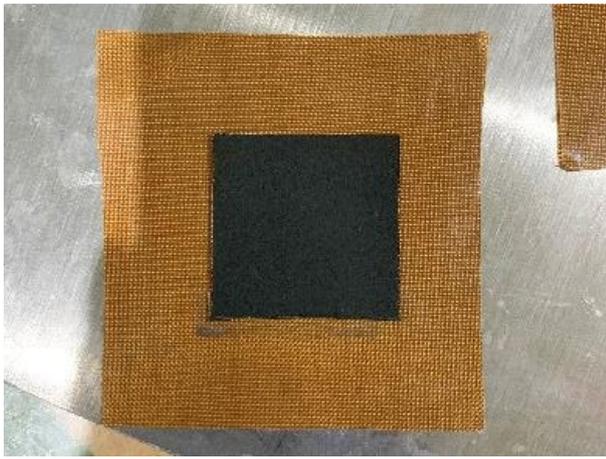
Hidrogen telah dianggap sebagai energi masa depan yang menjanjikan yang dapat menggantikan bahan bakar fosil.

Oleh karena itu, banyak perhatian telah diberikan pada *Proton Exchange Membrane Fuel cell* (PEMFC) yang memanfaatkan energi hidrogen karena keunggulan dan potensinya yang unik seperti efisiensinya yang tinggi, temperatur pengoperasian yang rendah, dan sifat ramah lingkungan[2].

Meskipun kemajuan yang signifikan telah dicapai baru-baru ini di bidang teknologi PEMFC, masih ada sejumlah kekurangan yang perlu diselesaikan sebelum komersialisasi berhasil. Untuk mendapatkan daya tahan dan kinerja yang tinggi serta mengurangi biaya produksi untuk aplikasi komersial, pengembangan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) yang merupakan tempat reaksi elektrokimia berlangsung harus dioptimalkan. Sebagai jantung PEMFC, MEA terdiri dari *Proton Exchange Membrane*, lapisan katalis, dan *Gas Diffusion Layers* (GDL). Reaksi elektrokimia dapat terjadi hanya pada *triple-phase boundaries* pada lapisan katalis. Pengendalian struktur berpori selama fabrikasi lapisan katalis merupakan tantangan utama. Salah satu metodenya yakni menggunakan teknik decal transfer dan *hot press*.

Meskipun terdapat sejumlah studi tentang struktur dan kinerja lapisan katalis, hubungan antara struktur berpori mikroskopis dan kinerja sel makroskopik masih belum jelas. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Yim dkk yang menyatakan bahwa semakin kecil tekanan *hot press* (0,98 MPa) maka nilai porositas meningkat menjadi 0,644 dan menghasilkan performa sel yang lebih tinggi [3]. Namun dalam penelitian tersebut tidak memperhatikan hambatan pada interfacial antara membran dan katalis karena lemahnya tekanan *hot press*. Sementara penelitian yang dilakukan oleh Liang dkk juga Shahgaldi dkk berfokus pada transfer katalis dan performa *fuel cell* yang optimum dengan *power density* sebesar 0,68W/cm² namun dengan rentang variasi tekanan *hot press* yang terlalu besar (2-10 MPa), dan tidak meninjau morfologi dan nilai porositas [4-5]. Untuk itu, kondisi optimal untuk parameter tekanan *hot press* harus diteliti lebih lanjut untuk pengembangan MEA dengan performa yang lebih tinggi.

Dalam penelitian ini dilakukan variasi tekanan pada proses decal transfer untuk menganalisis morfologi dan performa MEA untuk aplikasi PEMFC. Manfaat dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam melakukan metode decal transfer untuk aplikasi *fuel cell* selanjutnya dan rekomendasi pengembangan penelitian lebih lanjut.



Gambar 1. Lapisan katalis yang telah terdeposisi pada teflon.



Gambar 2. Sampel MEA setelah proses decal transfer.

II. METODOLOGI

Pada artikel ini membahas terkait pengaruh penambahan tekanan *hot press* terhadap morfologi *membrane electrode assembly* dan performa elektrokimia PEM *Fuel cell* dengan proses *decal transfer*. Material katalis yang digunakan adalah Pt/C.

A. Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Membran Nafion 115 (Dupont *Fuel cell*), katalis 20% wt Pt/C (*Fuel cell grade*), 5 %wt Nafion solution - Alcohol based 1100 EW (D521, Dupont), etilen glikol (purity 99,5%), isopropyl Alcohol (IPA) (6551-04, Fulltime), deionized Water (HI70436, Hanna Instrument), carbon paper (GDS1120, AvCarb).

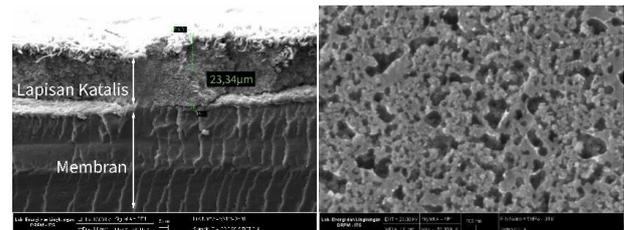
B. Preparasi dan Deposisi Tinta Katalis

Proses pembuatan tinta katalis dimulai dengan pencampuran katalis Pt/C dengan isopropyl alcohol (IPA), 5%wt larutan nafion, etilen glikol, dan deionized water. Penambahan larutan pelarut pada tinta katalis berdasarkan carbon-to-solvent weight ratio (CSWR) sebesar 0.09. Proses pencampuran ini dilakukan dengan ultrasonic cleaner selama 10 menit pada temperatur ruangan untuk mendapatkan tinta katalis yang homogen

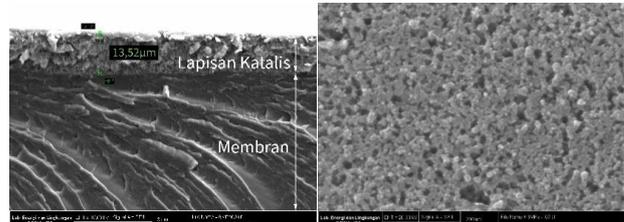
Setelah proses pencampuran selesai, tinta katalis dilapiskan pada substrat teflon dengan doctor blade ukuran 25µm. Setelah substrat terlapisi oleh tinta katalis, decal film dikeringkan di vacuum oven pada temperatur 100°C selama 4 jam. Setelah kering, lapisan katalis siap untuk di *hot press* dengan membran nafion.

C. Proses Decal Transfer

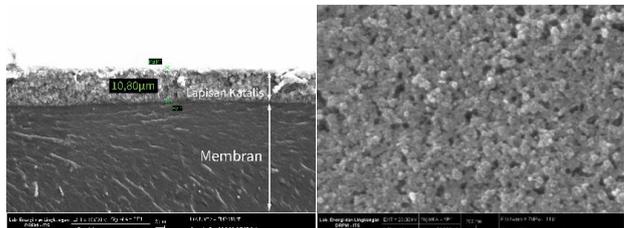
Selanjutnya substrat decal yang telah dilapisi tinta katalis disusun dengan mengapit membran Nafion untuk dilakukan proses *hot press*. Proses *hot press* dilakukan dengan



Gambar 3. Hasil SEM MEA 5MPa perbesaran, (a) *Cross section* 3000x, (b) 50.000x.



Gambar 4. Hasil SEM MEA 6MPa perbesaran, (a) *Cross section* 3000x, (b) 50.000x.



Gambar 1. Hasil SEM MEA 7MPa perbesaran, (a) *Cross section* 3000x, (b) 50.000x.

temperatur 120°C dan waktu holding selama 3 menit. Tekanan yang diterapkan telah ditentukan dalam penelitian ini yakni 5, 6, dan 7 MPa. Setelah proses *hot press* selesai, substrat decal dilepas dari dua sisi elektroda hingga tersisa MEA. Setelah substrat decal dikupas, margin MEA ditutup dengan Kapton tape untuk membentuk area reaksi 25cm², yang meningkatkan keketatan udara MEA hingga tingkat yang besar. Untuk mendapatkan transfer yang lengkap, seluruh proses *hot peeling* dioperasikan pada *hot plate* dengan temperturnya yang dipertahankan pada 120°C. Selanjutnya, setelah didapatkan MEA yang sudah kering, dilakukan proses analisis menggunakan SEM dan disusun menjadi *single cell* untuk diuji performa elektrokimia.

D. Karakterisasi dan Pengujian Material

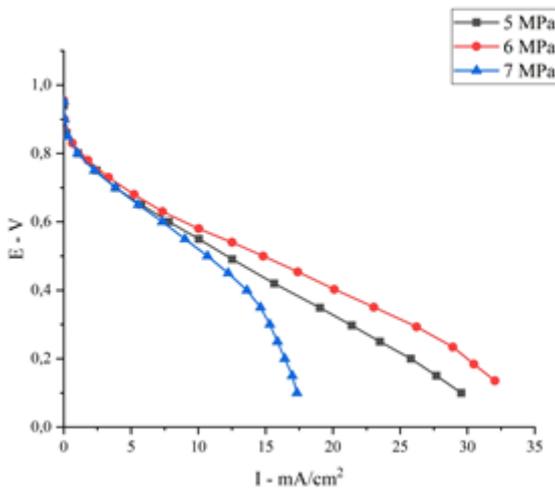
Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian morfologi material dan performa elektrokimia. Pengujian SEM-EDX dilakukan untuk mengetahui morfologi dan adhesi antara lapisan katalis dan membran elektrolit. Pengujian performa elektrokimia dilakukan DC Electronic Load dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy*.

1. Pengujian SEM

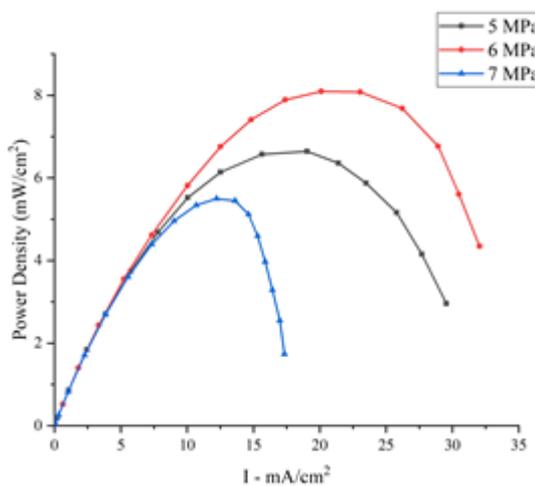
Pengamatan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) ini memberikan informasi mengenai morfologi (bentuk dan ukuran porositas). Pengujian ini dilakukan menggunakan instrumen FEI INSPECT S50. Dimensi spesimen yang digunakan sebesar 1 cm x 1 cm x 1 cm.

2. DC Electronic Load

Pengujian ini dilakukan menggunakan instrumen PRODIGIT 3111 DC Electronic Load (80V, 70A, 350W)



Gambar 6. Hasil Pengujian DC Electronic Load variasi tekanan 5 MPa, 6 MPa, dan 7 MPa.



Gambar 7. Hasil Power density variasi tekanan 5 MPa, 6 MPa, dan 7 Mpa.

bertempat di Laboratorium Kimia Material Departemen Teknik Material FT-IRS ITS.

3. Electrochemical Impedance Spectroscopy

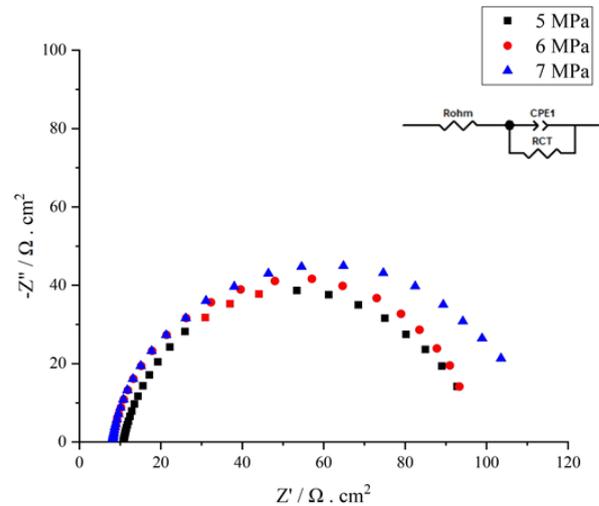
Pengujian EIS dilakukan menggunakan instrumen CS350 Potentiostat/Galvanostat bertempat di Laboratorium Korosi dan Kegagalan Departemen Teknik Material FT-IRS ITS.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Fabrikasi Membrane Electrode Assembly

Tinta katalis yang telah berhasil dibuat dengan pencampuran katalis Pt/C dengan *isopropyl alcohol* (IPA), 5%wt larutan nafion, dan *deionized water* menggunakan *ultrasonic cleaner* selama 10 menit. Setelah proses pencampuran, tinta katalis di deposisikan ke substrat decal lembaran teflon dengan ukuran 3,2 x 3,2 cm ditampilkan pada Gambar 1. Selanjutnya dikeringkan menggunakan *vacuum oven* selama 4 jam dengan temperatur 100°C.

Setelah proses pengeringan selesai, kemudian lapisan katalis tersebut di transfer ke membran elektrolit yang telah di pre-treatment melalui proses *hot press* dengan variasi tekanan menghasilkan *membrane electrode assembly* (MEA) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Nyquist plot sampel 5 MPa, 6 MPa, dan 7 MPa.

Pada Gambar 2 tampak bahwa lapisan katalis telah tertransfer 100% dari substrat decal ke membran elektrolit. Sampel MEA yang terbentuk selanjutnya diamati morfologinya melalui SEM dan disusun menjadi *single cell fuel cell* untuk dilakukan pengujian performa elektrokimia menggunakan *DC Electronic Load* dan EIS.

B. Pengujian SEM Membrane Electrode Assembly

Pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui perbedaan morfologi dari sampel MEA PEMFC hasil dari variasi tekanan *hot press*. Hasil pengujian SEM ditampilkan pada Gambar 3,4 dan 5.

Gambar penampang melintang MEA mengungkapkan bahwa lapisan katalis tipis dan seragam terbentuk dengan kontak yang baik dengan membran elektrolit. Lapisan katalis yang dilapiskan ke substrat decal memiliki ketebalan 25µm (ketebalan sebelum proses *hot press*), Ketebalan lapisan katalis tanpa *hot press* ditunjukkan pada 0 MPa pada Gambar 6 sebagai referensi. Ketebalan akhir lapisan katalis setelah dilakukan proses *hot press* ke membran berkurang menjadi 10-23 µm. Ketebalan lapisan katalis menurun secara bertahap dengan meningkatnya tekanan *hot press*, menunjukkan lapisan katalis menjadi lebih padat saat tekanan *hot press* meningkat.

Berdasarkan nilai ketebalan lapisan katalis yang didapatkan dari SEM, porositas lapisan katalis dapat dihitung, dan nilainya ditampilkan dalam Tabel 1 dan Gambar 6. Didapatkan bahwa porositas menurun dari 70,5% untuk sampel 5 MPa, 49,1% untuk sampel 6 MPa dan menjadi 36,25% pada sampel 7 MPa. Dengan demikian, ketika tekanan *hot press* meningkat, lapisan katalis menjadi lebih tipis dan lebih padat, yang mengarah pada porositas yang lebih rendah. Nilai porositas (36,2% - 70,5%) berada dalam kisaran porositas lapisan katalis PEMFC pada umumnya (30%-60%), menunjukkan bahwa lapisan katalis yang dibuat sesuai untuk diaplikasikan pada MEA PEMFC [6].

Lapisan katalis yang diperbesar pada penampang MEA Gambar. 3(b), 4(b), dan 5(b) mengungkapkan struktur karbon tipikal yang terdiri dari partikel karbon primer yang teraglomerasi dengan diameter 58-61 nm melalui pengamatan *ImageJ Particle Analyzer* ditampilkan pada tabel

2, dan pori-pori yang terdistribusi secara acak. Ukuran aglomerat ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Malekian dkk pada tahun 2019 yang menjelaskan ukuran aglomerat karbon pada lapisan katalis *fuel cell* dalam range 50-300nm [7].

Pori-pori yang lebih kecil cenderung akan mengalami penurunan kinerja sel karena resistensi difusi oksigen yang parah, terutama di daerah *current density* yang tinggi. Namun dalam lapisan katalis yang mengandung pori-pori lebih besar cenderung akan tidak terlalu memiliki masalah difusi oksigen akibat akumulasi air dan menunjukkan kinerja sel yang lebih baik[3].

C. Hasil Pengujian Performa Elektrokimia (DC Electronic Load)

Pada penelitian ini dilakukan pengujian *DC Electronic Load* terhadap PEMFC dengan katalis yang terbuat dari material Pt/C di rangkai dalam bentuk *single cell*. *Single cell* ini tersusun atas *end plate*, *current collector*, *bipolar plate*, anoda (GDL dan lapisan katalis), membran elektrolit yaitu Nafion 115, dan katoda (GDL dan lapisan katalis). Selama pengujian, anoda diumpankan dengan hidrogen lembap (dengan *flow rate* 500ml/min pada 65°C), dan katoda diumpankan dengan udara lembap (dengan *flow rate* 1.500 ml/min pada 65°C). Temperatur PEMFC dipertahankan pada temperatur ruangan dan tekanan operasional ditetapkan pada 0,4 bar. Prosedur aktivasi MEA dilakukan sebelum pengujian dengan menyuplai *fuel cell* dengan gas reaktan sesuai yang sudah ditulis di atas selama minimal 6 jam. Hal ini dilakukan agar melembapkan membran yang menjadi kering karena proses hot press saat fabrikasi MEA. Hasil dari pengujian ini akan menghasilkan kurva polarisasi (kurva I-V). Kurva polarisasi merupakan gambaran standar untuk mengevaluasi kinerja *fuel cell* dan berupa kurva yang menunjukkan hubungan antara tegangan dan rapat arus yang dihasilkan saat terhubung pada suatu beban (*load*). Tegangan *versus current density*, biasanya ditampilkan dengan membandingkan dengan area elektroda geometris, sehingga hasilnya dapat dibandingkan di antara sel-sel berukuran berbeda.

Gambar 6 menggambarkan diagram I-V untuk berbagai spesimen MEA yang dibuat dengan tekanan *hot press* yang berbeda. Tampak hubungan antara voltase dan *current density* memiliki dependensi dengan tekanan *hot press* pada masing-masing sampel. Semua MEA menunjukkan kinerja yang sangat mirip di daerah *current density* rendah di bawah 10 mA/cm², sedangkan kesenjangan kinerja terlihat pada *current density* tinggi (>15mA/cm²). Tegangan sel yang sama pada *current density* rendah menunjukkan bahwa semua sampel memiliki activation dan *ohmic losses* yang serupa, terutama karena nilai ECSA (*Electrochemical Surface Area*) yang serupa pada semua sampel hasil dari variasi tekanan *hot press* seperti yang telah diamati oleh Sassin dkk pada tahun 2017 [8].

Sampel 6 MPa memiliki kemiringan garis paling landai yang menjelaskan bahwa sampel MEA ini mengalami kehilangan voltase yang paling sedikit diantara sampel lainnya. Sedangkan sampel 5 MPa memiliki kemiringan garis yang lebih curam daripada sampel 6 MPa karena resistensi ohmik pada ionomer. Konektivitas karbon dan ionomer dalam antarmuka lapisan katalis dan/atau lapisan katalis dengan PEM tidak mencukupi pada tekanan *hot press* rendah

Tabel 1.
Nilai ketebalan, rasio kompresi dan porositas diperoleh dari visualisasi SEM (εS)

Tekanann <i>Hot Press</i> (Mpa)	Ketebalan	Porositas %
5	23,34	70,5
6	13,52	49,1
7	10,8	36,3

Tabel 2.
Ukuran aglomerat Pt/C dari masing-masing sampel

Tekanann <i>Hot Press</i> (Mpa)	Rata-rata Diameter Aglomerat (nm)
5	58,265
6	61,228
7	60,715

Tabel 3.
Pengaruh tekanan *hot press* terhadap nilai R_Ω dan R_{CT}

Tekanann <i>Hot Press</i> (Mpa)	R _Ω (ohm)	R _{CT} (ohm)	R _{Total} (ohm)
5	10,804	92,777	103,581
6	8,214	93,324	101,538
7	8,096	103,56	111,656

[9]. Kehilangan kinerja yang tajam pada *current density* tinggi juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Yim dkk pada tahun 2011 dijelaskan dengan terhambatnya transportasi massa oksigen ke tempat reaksi aktif, dan masalah difusi menjadi lebih parah untuk lapisan katalis dengan porositas yang rendah seperti pada sampel 7 MPa. Sampel dengan tekanan tertinggi ini mempunyai porositas terendah diantara semua sampel yang berdampak performa yang rendah pada daerah *mass transport losses*.

Gambar 7 menunjukkan bahwa *power density* maksimum sebesar 8,1 mW/cm² dicapai pada tingkat tekanan *hot press* 6 MPa, kemudian diikuti oleh tekanan *hot press* 5 dan 7 MPa. Maksimum *power density* yang dihasilkan oleh sampel 6 MPa lebih besar dibanding dengan sampel 5 MPa dikarenakan proses *hot press* dengan tekanan 6 MPa dapat meningkatkan kontak antara membran dan elektroda atau dengan kata lain mengurangi hambatan kontak pada interface sehingga mendapatkan *power density* yang tinggi [9]. Namun saat tekanan naik sebesar 7 MPa, maksimum *power density* turun menjadi 5,5 mW/cm² dikarenakan peningkatan tekanan *hot press* berlebih dapat menurunkan porositas dan laju perpindahan massa di elektroda yang menyebabkan peningkatan resistensi difusi. Hal ini menyebabkan elektroda menjadi lebih kompak di bawah tekanan *hot press* yang besar[3].

D. Hasil Pengujian EIS

Untuk lebih memahami kurva polarisasi pada Gambar 6 serta untuk mengetahui nilai impedansi pada *fuel cell*, pengujian *electrochemical impedance spectroscopy* dilakukan pada MEA, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.

Data EIS untuk variasi tekanan *hot press* dapat di-fitting kedalam bentuk *equivalent circuit model* yang terdiri atas hambatan ohmik (R_Ω), hambatan transfer muatan (R_{CT}), dan CPE-T serta CPE-P seperti terlihat pada Gambar 8.

Pengujian ini dilakukan menggunakan *fuel cell* yang sudah di-assembly ke dalam bentuk *single cell*. Rentang frekuensi yang digunakan adalah 100 mHz – 100 kHz. Hasil menunjukkan spektrum impedansi khas di PEMFC termasuk perpotongan *semicircle* pada sumbu resistansi nyata (Z') mewakili resistansi ohmik (R_{Ω}) yang didominasi oleh resistansi membran dan diameter *semicircle* (R_{CT}).

Berdasarkan Tabel 3 penurunan resistansi ohmik dengan meningkatnya tekanan *hot press* mempengaruhi spektrum impedansi dari MEA yang diamati, yang dengan jelas ditunjukkan pada daerah frekuensi tinggi yang diperbesar untuk sampel 5, 6 dan 7 MPa. Resistansi ohmik dapat diukur menggunakan perpotongan frekuensi tinggi dari *semicircle* ke sumbu nyata (Z'), berkurang dengan meningkatnya tekanan *hot press*. R_{Ω} adalah nilai resistansi dari elektrolit (membran) yang digunakan yaitu membran Nafion 115 yang memiliki nilai R_{Ω} yang hampir sama. Namun pada sampel 5 MPa nilai R_{Ω} lebih besar daripada sampel yang lain. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Liang dkk pada tahun 2015 yang mendapatkan nilai R_{Ω} yang besar dikarenakan konektivitas antara lapisan katalis dan membran elektrolit lemah karena tekanan *hot press* yang rendah meskipun keduanya mengandung polimer yang sama. Resistansi ohmik terutama terkait dengan resistensi transpor proton dalam membran dan ionomer lapisan katalis, yang sangat dipengaruhi oleh tingkat hidrasinya, dan juga dipengaruhi oleh resistensi total elektronik dari komponen sel dan resistensi kontak36.

Berdasarkan Tabel 2 terlihat bahwa nilai R_{CT} yang paling tinggi dimiliki oleh sampel dengan tekanan *hot press* 7 MPa. Sampel ini memiliki nilai R_{CT} senilai 103,56 Ohm. Resistansi transfer muatan berhubungan erat dengan reaksi elektrokimia yang terjadi pada antarmuka membran dan katalis. Nilai R_{CT} yang besar pada sampel 7 MPa dapat dikaitkan terhadap pengurangan situs aktif katalis (batas tiga fase) yang disebabkan oleh tekanan tambahan seperti yang ditemukan oleh Liang dkk pada tahun 2015 [4]. Namun, resistansi transfer muatan tidak hanya terkait dengan area yang terkait dengan batas tiga fase tetapi juga dengan resistansi transfer massa, memperkuat gagasan bahwa perubahan pada porositas, tortuositas dari difusi oksigen, dan lapisan katalitik terjadi.

Perubahan pada transportasi massa gas reaktan memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap performa elektrokimia dibanding dengan konektivitas antara lapisan katalis dan membran elektrolit. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Liang dkk tahun 2015 yang mana sampel dengan hambatan yang lebih besar pada R_{CT} akan mempengaruhi penurunan *power density* yang lebih besar pula dibandingkan dengan pengaruh R_{Ω} yang lebih tinggi dikarenakan tingkat konektivitas yang lemah antara lapisan katalis dan membran elektrolit mengalami penurunan *power density* yang lebih sedikit.

Dari penelitian Liang dkk tahun 2015 juga dinyatakan bahwa terdapat *trade-off* (menerima kekurangan untuk mendapatkan manfaat) antara keuntungan dan kerugian dari tekanan *hot-press* [4]. Untuk MEA yang dibuat menggunakan tekanan 4 MPa, kehilangan ohmik (R_{Ω}) adalah alasan utama penurunan kinerja sel. Konektivitas karbon dan ionomer dalam gaantarmuka lapisan katalis dan/atau lapisan katalis/PEM tidak mencukupi pada tekanan *hot press* rendah

yang menyebabkan rendahnya konduktivitas proton. Ketika tekanan di atas 7 MPa, resistansi ohmik sedikit berubah, dan resistansi perpindahan massa (R_{CT}) menjadi faktor utama yang mempengaruhi kinerja sel. Hasil ini menunjukkan bahwa difusivitas gas menurun dengan meningkatnya tekanan *hot-press*, mengungkap bahwa struktur berpori di lapisan katalis secara signifikan mempengaruhi kinerja sel. Untuk menghindari dua kekurangan tersebut maka tekanan 6 MPa dipilih menjadi tekanan yang optimal karena menghasilkan elektroda katalis yang menguntungkan yang disebabkan aksesibilitas reaktan yang tepat ke daerah reaksi digambarkan dengan R_{CT} yang rendah, dan dapat meningkatkan kontak antara membran dan elektroda atau dengan kata lain mengurangi hambatan kontak pada *interface* digambarkan dengan rendahnya R_{Ω} , sehingga kinetika reaksi dapat berjalan lebih baik untuk pemanfaatan katalis yang maksimal dan konsisten.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian dan analisa data, maka dapat ditarik kesimpulan: (1) Pengaruh tekanan *hot press* terhadap bentuk porositas dan aglomerat yang terbentuk adalah untuk variasi 5 MPa terbentuk porositas yang cukup besar dengan nilai 70,5 % dan terus menurun linier dengan penambahan tekanan *hot press*. Morfologi yang terbentuk untuk sampel 5, 6, dan 7 MPa yaitu berupa struktur karbon tipikal yang terdiri dari partikel karbon primer yang teraglomerasi dengan diameter 58-61 nm, dan pori-pori yang terdistribusi secara acak. (2) PEM *fuel cell* dengan lapisan katalis Pt/C dengan variasi tekanan 6 MPa memiliki performa elektrokimia yang paling tinggi dibandingkan variasi lainnya yaitu memiliki *power density* sebesar 8,21 mW/cm² dan memiliki hambatan total yang paling kecil pula sebesar 101,5 ohm. Hal ini dapat diperoleh karena aksesibilitas reaktan yang tepat ke daerah reaksi didukung dengan porositas yang cukup. Hambatan yang kecil juga dipengaruhi oleh antarmuka yang baik antara membran dan lapisan katalis sehingga meningkatkan konduktivitas proton dan kinetika reaksi dapat berjalan lebih baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Pertamina yang telah membiayai penelitian yang bekerja sama dengan ITS dengan topik Pengembangan *Fuel cell* dengan Menggunakan Elektroda Carbon Nano Tubes (CNTs) atau Platinum Coating dan Pengembangan Produksi Hidrogen tahun 2020-2021 dengan nomor kontrak No.001/G20420/2020-S0.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Martins, C. Felgueiras, M. Smitkova, and N. Caetano, "Analysis of fossil fuel energy consumption and environmental impacts in european countries," *Energies*, vol. 12, no. 6, pp. 1–11, 2019, doi: 10.3390/en12060964.
- [2] P. Costamagna and S. Srinivasan, "Quantum jumps in the PEMFC science and technology from the 1960s to the year 2000," *J. Power Sources*, vol. 102, no. 1–2, pp. 253–269, 2001, doi: 10.1016/S0378-7753(01)00808-4.
- [3] S. Yim *et al.*, "Fabrication of microstructure controlled cathode catalyst layers and their effect on water management in polymer electrolyte fuel cells," *Electrochim. Acta*, vol. 56, no. 25, pp. 9064–9073, Oct. 2011,

- doi: 10.1016/j.electacta.2011.05.123.
- [4] X. Liang, G. Pan, L. Xu, and J. Wang, "A modified decal method for preparing the membrane electrode assembly of proton exchange membrane fuel cells," *Fuel*, vol. 139, no. 2011, pp. 393–400, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2014.09.022.
- [5] S. Shahgaldi, I. Alaefour, and X. Li, "Impact of manufacturing processes on proton exchange membrane fuel cell performance," *Appl. Energy*, vol. 225, no. May, pp. 1022–1032, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.086.
- [6] Hamnett, A., "The components of an electrochemical cell", in: *Handbook of Fuel Cells*. John Wiley & Sons, Ltd, 2010, doi:10.1002/9780470974001.f101001.
- [7] A. Malekian, S. Salari, J. Stumper, N. Djilali, and M. Bahrami, "Effect of compression on pore size distribution and porosity of PEM fuel cell catalyst layers," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 41, pp. 23396–23405, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.07.036.
- [8] M. B. Sassin, Y. Garsany, B. D. Gould, and K. E. Swider-Lyons, "Fabrication method for laboratory-scale high-performance membrane electrode assemblies for fuel Cells," *Anal. Chem.*, vol. 89, no. 1, pp. 511–518, 2017, doi: 10.1021/acs.analchem.6b03005.
- [9] T. Suzuki, H. Tanaka, M. Hayase, S. Tsushima, and S. Hirai, "Investigation of porous structure formation of catalyst layers for proton exchange membrane fuel cells and their effect on cell performance," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 44, pp. 20326–20335, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.09.078.