

Pemetaan dan Analisis
Penelitian Pengurangan Tebal Lapisan Film pada Lapisan Difusi Gas PEM Fuel Cell
Mapping and Analysis
Experiment on Film Thickness Reducing in Gas Diffusion Layers of PEM Fuel Cell

Ramli Sitanggang^{a*}

^a *Integrated Laboratory Department and Chemical Engineering Department, FTI, UPN "Veteran" Yogyakarta, 55764, Indonesia*

Artikel histori :

Diterima 9 Oktober 2018
Diterima dalam revisi 15 Oktober 2018
Diterima 25 Oktober 2018
Online 31 Oktober 2018

ABSTRAK: Salah satu cara untuk mengurangi biaya pembuatan PEM *Fuel Cell* adalah mengurangi tebal lapisan. Lapisan terletak diantara GDL dengan elektrode PEMFC. Lapisan ini, untuk menyanggah elektrode yang dinyatakan dengan tebal, porositas, diameter pori, luas permukaan aktif. Pada kertas kerja ini, dilakukan pemetaan hasil hasil penelitian lapisan tipis yang sudah dilaporkan dan hasil pengujian untuk mengetahui karakteristik pengurangan ketebalan lapisan tipis tersebut. Hasil pemetaan dan analisis didapatkan pada ketebalan berkisar 250 μm . Dalam pengujian ketebalan 250 μm masih dapat dikurangi dengan mesin sepray sekitar 145 μm dengan densitas karbon sekitar 2 mg cm^{-2} , tetapi prestasi PEMFC lebih kecil dari prestasi tebal 250 μm .

Kata Kunci: lapisan tipis GDL; pengurangan lapisan; carbon density; ukuran lapisan; prestasi lapisan tipis

ABSTRACT: One way to reduce the cost of making PEM Fuel Cells is to reduce the thickness of the layer. The layer is located between GDL and PEMFC electrode. This layer, to refute the electrode, is expressed with thickness, porosity, pore diameter, active surface area. In this working paper, the results of the thin film research results have been mapped and the results of the tests are to determine the characteristics of the thin layer thickness reduction. The mapping and analysis results were obtained at thicknesses ranging from 250 μm . In testing the thickness of 250 μm can still be reduced by a spray machine of 145 μm with a carbon density of about 2 mg cm^{-2} , but PEMFC's performance is smaller than the achievement of 250 μm thick.

Keywords: GDL thin layer; layer reduction; carbon density; layer size; thin layer performance

1. Pendahuluan

Pengembangan PEMFC telah lama dilakukan sebagai upaya mengurangi ukuran PEMFC melalui penelitian Lim and Wang (2004). Hasil penelitian menjadi salah satu cara untuk mendapatkan kinerja yang maksimal tetapi ukuran PEMFC berkurang sehingga biaya pembuatannya semakin murah. Secara teoritis batasan penelitian, pengembangan dan penerapan untuk mengurangi ukuran dapat memberi keseragaman kecepatan aliran gas keadaan mantap dan kondisi ini mudah dicapai. Dapat menghasilkan suhu PEMFC yang seragam dan campuran H_2 dan H_2O mendekati keadaan optimal (Monanteras and Frangopoulos 1999) (Lee, Zee, and Murthy 2003; D. Chu and Jiang 1999; Ermete Antolini, Passos, and Ticianelli 2002; Ceraolo, Miulli, and Pozio 2003) (Paulus et al. 2002; Sui et al. 1999). Selain itu, kelembapan hidrogen dan udara tidak menyebabkan terjadi dehidrasi atau hidrasi berlebihan pada membrane PEMFC (Wang et al. 2003; Jen, Yan, and Chan 2003; Yamada et al. 2003) dan air yang terhasil pada

katoda tidak menyumbat pori-pori (You and Liu 2002; Gasteiger, Panels, and Yan 2004; Berning, Lu, and Djilali 2002; Janssen and Overvelde 2001). Dalam pengembangan tersebut ada yang menganggap bahwa keadaan tercapai apabila pori pori lapisan homogen (Ceraolo, Miulli, and Pozio 2003; Ge and Yi 2003; Thampan et al. 2001; Gurau, Barbir, and Liu 2000). Permeabilitas gas dan uap air lebih merata (Sui et al. 1999; Marr and Li 1999). Pertimbangan yang lain adalah fasa gas mengikuti hukum Bruggeman, Knudsen, Darcy (Mirzazadeh, Saievar-Iranizad, and Nahavandi 2004; Amphlett et al. 1995; Grujicic et al. 2003). Banyak kasus yang berkembang pada penelitian terutama adanya perbedaan kerataan konsentrasi bahan pada lapisan, kerataan permukaan dan keretakan lapisan. Ukuran lapisan-lapisan tidak sama (Nam and Kaviany 2003; Johnson 2001; Pathapati, Xue, and Tang 2005; O'hayre et al. 2002). Diameter pori dan porositas lapisan tidak sesuai untuk distribusi uap air dan penguapan air pada katoda sehingga terjadi penyumbatan pori (Kalk et al. 2000; Um, Wang, and Chen 2000; Daud et al. 2004; Shi Chao, Lan,

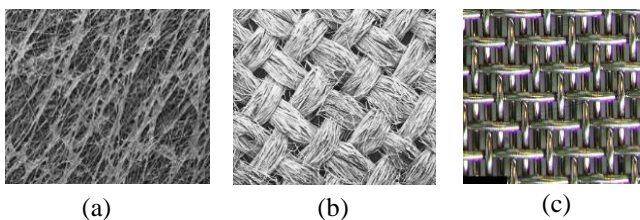
*Corresponding Author:
Email:ramlisitanggang@yahoo.com

and Jinhua 2011)(J. Chen, Matsuura, and Hori 2004; Chan and Wang 2004) dan sangat mempengaruhi rintangan listrik dalam PEMFC (Fuller and Newman 1993) (Baschuk and Li 2000; H. S. Chu, Yeh, and Chen 2003). Berbagai metode penelitian sudah dilakukan dan berkembang terus baik tinjauan dari makrostruktur maupun mikrostruktur MEA (Ge and Yi 2003; Yoshitake et al. 2002). Dalam kertas kerja ini dilakukan pemetaan dan analisis penelitian ukuran lapisan film GDL pada PEMFC untuk mengetahui ketebalan, porositas, diameter pori dan luas permukaan aktif. Selain itu melakukan penelitian kemungkinan mengurangkan ketebalan lapisan tipis dipermukaan GDL.

2. Landasan Teori

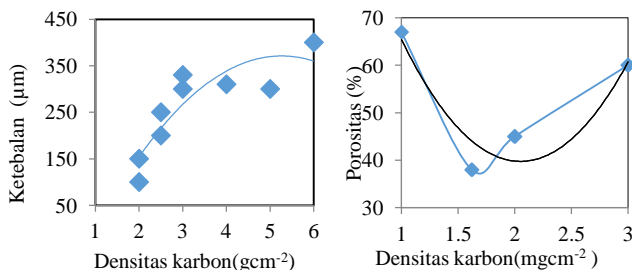
2.1. Mengatasi Penyumbatan Pori

Salah satu penyumbatan pori terdapat pada lapisan difusi gas (GDL). Lapisan berfungsi untuk mengalirkan elektron dari lapisan tipis dipermukaan GDL ke plat dwi-kutub dan memindahkan massa aliran reaktan dari *flowfield*. Masalah konvensional terjadinya perubahan tenaga kinetik aliran air menjadi tenaga potensial karena gaya adhesi pada permukaan pori-pori sehingga air yang mengembun meyumbat pori GDL. Solusi yang sudah umum dilakukan para peneliti digunakannya bahan hidropobik menutupi permukaan seluruh serat penyanggah lapisan GDL seperti terlihat Gambar 1 (a,b,c) (Lim and Wang 2004).



Gambar 1. SEM Gas Diffusion Layer : (a). Toray Carbon Paper 260,(b) Carbon Cloth 15% teflon, (c) metal wire cloth structure (Oedegaard at all, 2003)

Dengan cara tersebut di atas, lapisan makroporous akan berfungsi sebagai distributor gas, dapat mengurangi terjadinya akumulasi embunan air pada GDL.

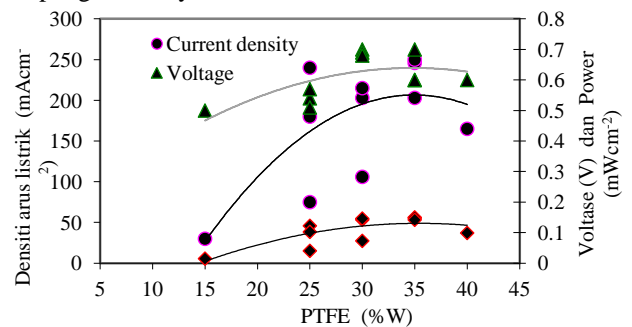


Gambar 2. Pemetaan lapisan tipis pada permukaan GDL: (a)Ketebalan dengan densitas karbon, (b) porositas dengan densitas karbon

Cara yang sama juga dilakukan pada pembuatan lapisan lapisan tipis mikroporous diatas permukaan GDL. Lapisan ini berfungsi sebagai distributor gas dari GDL ke katalis dan sebagai penyanggah lapisan film katalis. Gambar 2(a),(b), menunjukkan laporan 9 jurnal hubungan antara ketebalan dan porositas dengan densitas karbon yang digunakan pada lapisan tipis tersebut. Pada Gambar 2(a) tebal 100-400 µm diperlukan densitas karbon sekitar 2 sampai 6 mgcm⁻² (Nakayama et al. 1997; Bessette et al. 2001; Moreira, Havranek, and Sames 2001; Shimizu et al. 2004; Gamburgzev and Appleby 2002; Park, Lee, and Popov 2012; Baldauf and Preidel 1999; Litster and McLean 2004; Ermete Antolini, Passos, and Ticianelli 2002). Hubungan tebal dengan densitas karbon pada Gambar 2(a) dinyatakan dengan *trendline* polinomial orde 2 sehingga jelas pengurangan pembuatan lapisan dapat dimulai dari nilai tebal sekitar 150 µm, dengan kebutuhan densitas karbon sekitar 2 mgcm⁻². Pada Gambar 2(b) lapisan memerlukan porositi 40-70% untuk perpindahan massa dengan keperluan densiti karbon sekitar 1-3 mgcm⁻² (Cindrella et al. 2009; Wilson et al. 1993; Eisman 1990; Gamburgzev and Appleby 2002). Jika digunakan pendekatan yang sama pada Gambar 2(b) terdapat titik minimum pada 2 mgcm⁻² dengan porositas sekitar 40%. Daerah pada sisi sebelah kiri titik, ditemukan densitas karbon semakin kecil dapat menghasilkan porositas semakin tinggi dan sebaliknya. Dengan pendekatan ini untuk mencegah penyumbatan pori dan melakukan perpindahan massa tebal lapisan tipis sekitar 150 µm dengan porositas lebih besar dari 40%.

2.2. Pendekatan Sifat Elektronik

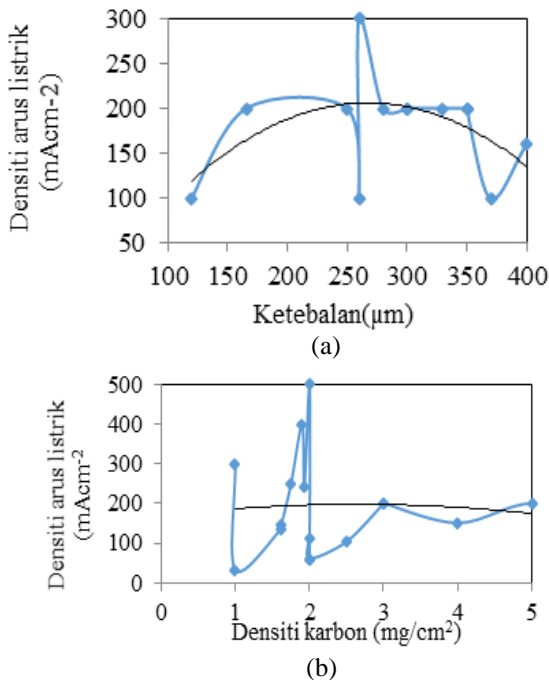
Pada tinjauan ini, PTFE sebagai bahan hidrofobik akan mempengaruhi daya hantar listrik.



Gambar 3. Prestasi Penggunaan bahan hidropobik (PTFE)

Sebagai bahan hidrofobik, kadar PTFE dalam lapisan berlebihan akan mengakibatkan densiti arus listrik PEMFC menurun dan kadar PTFE yang terlalu kecil juga akan menurunkan arus listrik PEMFC sebab pori-pori lapisan tipis cenderung tersumbat. Perlu menggunakan ukuran kadar hidrofobik yang sangat tepat. Gambar.3, menunjukkan peta kadar PTFE pada lapisan tipis GDL (Lu et al. 2001; O'hayre et al. 2002; Rowe and Li 2001; Pozio et al. 2002; Haug et al. 2002; Lim and Wang 2004; Prasanna et al. 2004; Gülzow et al. 2000; Kong et al. 2002; Yoon et al. 2001; Escudero et al. 2002; Frey and Linardi 2004; Moreira, Havranek, and Sames 2001; Nakayama et al. 1997; Oedegaard et al. 2004; Lindermeir et al. 2004). Lapisan tipis menggunakan agregat karbon sekitar 30 nm

dengan desain seperti ditunjukkan Fig.5(b). Jika pada Gambar.3 dilakukan pendekatan prestasi PTFE dengan *trendline options (polynomial)* orde 2 maka, ukuran kadar PTFE pada hubungan antara % PTFE dengan arus listrik berkisar 15-40%. Sedangkan sifat elektronik yang terbaik menggunakan hipotesis kadar PTFE sekitar 30%. Pada kadar tersebut tegangan sekitar 0,6 volt akan menghasilkan arus listrik dari 150 sehingga 200 mAcm⁻². Selanjutnya, pada Gambar 4 ditunjukkan *mapping* prestasi arus listrik dengan tebal dalam interval 100–400µm. Pada tegangan stabil 0,6-0,7 Volt, arus listrik PEMFC bervariasi terhadap tebal dan densitas karbon lapisan.



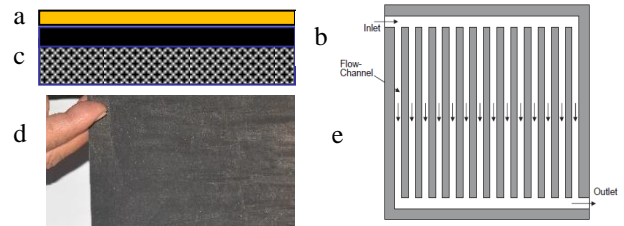
Gambar 4. Prestasi listrik lapisan tipis :(a) densitas listrik dengan tebal, (b) densitas listrik dengan densitas karbon

Apabila dibuat pendekatan *trendline options (polynomial)* dengan orde 2 pada Gambar 4(a) (Cindrella et al. 2009; Liu and S. Smotkin 2002; P., S., and E. 1997; Frey and Linardi 2004; E Antolini, Passos, and Ticianelli 2002; Pozio et al. 2002; Park, Lee, and Popov 2008; Eisman 1990; Nakayama et al. 1997; Bessette et al. 2001; Moreira, Havranek, and Sames 2001; Gamburzev and Appleby 2002; Park, Lee, and Popov 2012; Baldauf and Preidel 1999; Litster and McLean 2004; Ermete Antolini, Passos, and Ticianelli 2002; Lindermeir et al. 2004) dan Gambar 4(b) (Chang et al. 2007; Owejan et al. 2006; Lin, He, and Van Nguyen 2004; Owejan et al. 2007; Nguyen, Berning, and Djilali 2004; Matsuura, Kato, and Hori 2006; Gamburzev and Appleby 2002; Litster and McLean 2004; Park, Lee, and Popov 2012; Benziger et al. 2005; J. Chen, Matsuura, and Hori 2004; Sinha and Wang 2008; Krüger et al. 2011) maka, prestasi listrik yang tinggi terletak pada tebal berkisar 250 µm dengan densiti karbon sekitar 2 mgcm⁻². Dalam pengujian dengan mesin spray, lapisan tersebut masih dianggap tebal. Ketebalan 250 µm masih

mungkin dikurangi sekitar 150 µm pada densitas karbon sekitar 2 mgcm⁻² dengan menggunakan kadar PTFE 30%

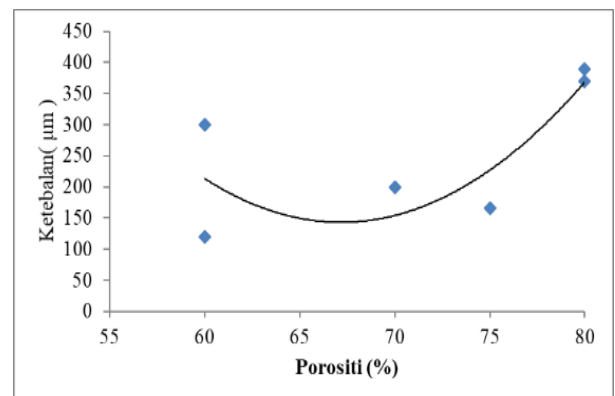
2.3. Konsep Pengurangan Ketebalan Lapisan

Letak pengurangan lapisan tipis antara lapisan GDL dengan lapisan elektrode seperti ditunjukkan Gambar 5(b). Dalam pengurangan lapisan dari 250 µm menjadi 150 µm, permukaan perlu dibuat halus dan merata seperti ditunjukkan Fig.5(b,d) agar distribusi perpindahan panas dan gas reaktan merata pada permukaan katalisator. Dengan hal tersebut prestasi PEMFC masih meningkat.



Gambar 5 :(a) Lapisan film katalis, (b) lapisan tipis permukaan GDL,(c) Lapisan carbon paper, (d) Permukaan lapisan tipis, (e) plat dwikutub Jenis Pin

Peningkatan prestasi terutama disebabkan tahanan lapisan yang lebih tipis. Akan tetapi, apabila ketebalan lapisan semakin tipis maka densitas arus listrik akan turun karena lapisan yang sangat tipis tidak mempunyai kekuatan mekanik yang cukup untuk menahan pemampat plat dwikutub seperti ditunjukkan Gambar 5(e). Pemampat ini menyebabkan kerusakan makro dan mikroporous terutama di bawah dan sekitar tebing Plat dwikutub sehingga porositas menurun.



Gambar 6. Pemetaan ketebalan dengan dengan porositas lapisan tipis pada permukaan GDL

Gambar 6 menunjukkan peta hubungan antara ketebalan dengan porositi (L. Chen et al. 2012; Gostick et al. 2007; Bazylak 2009; Sinha and Wang 2008; Benziger et al. 2005; Matsuura, Kato, and Hori 2006). Apabila pendekatan pengurangan ketebalan melalui *trendline* polinomial orde 2 maka hipotesis lapisan paling tipis dipermukaan GDL sekitar 150 µm karena porositas masih terpenuhi. Dari

pendekatan ini ada dua kemungkinan yang terjadi pada pembuatannya yaitu semakin tinggi porositas, ketebalan lapisan tipis semakin besar atau sebaliknya tergantung metode pembuatannya.

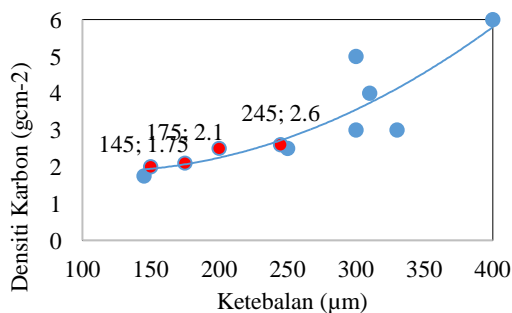
3. Penelitian

Gambar 5 (a), (b), (c) menunjukkan GDL. Gambar 5(a) menunjukkan GDL yang mendistribusikan gas hidrogen ke lapisan tipis Gambar 5(b) sebelum masuk ke lapisan elektrod (D. Chu and Jiang 1999). Lapisan yang akan dikurangi pada permukaan GDL adalah Gambar 5(b). Material lapisan Gambar 5(b) yang digunakan adalah karbon hitam Vulkan XC-72R. Campuran material terdiri dari campuran karbon hitam, aditif, 30% PTFE dan 89 % propil alkohol sebagai larutan medium. Bahan-bahan ini dicampur dengan pengaduk ultrasonic vibra-cell selama 10 menit. Alat yang digunakan untuk membuat lapisan tipis pada permukaan GDL adalah mesin Spray. Campuran serbuk karbon dan PTFE tersuspensi secara merata diatas permukaan GDL. GDL dikeringkan dari kandungan air pada suhu 280°C untuk membentuk porous dan lapisan dipanaskan pada 330°C untuk menghilangkan *volatile matter* sehingga membentuk lapisan mikropori dan mesopori yang kuat. Sebelum digunakan, GDL dibersihkan dengan bahan kimia dan diikuti dengan pemanasan. Membran yang digunakan adalah nafion 117. Pembuatan elektrokatalis diatas lapisan tipis GDL dilakukan dengan menggunakan mesin Spray dengan tinta elektroda campuran Pt/C(20%), Nafion (5%), dan propil alkohol (89%). Alat untuk membuat MEA menggunakan mesin tekanan hidrolik pada tekanan 20 atm dan suhu 120°C. Pengujian ukuran lapisan menggunakan mikrometer, porosimetri, BET dan alat test Arbin. Pendekatan analisis data menggunakan *trendline* polinomial orde 2.

4. Hasil dan pembahasan pemetaan penelitian

4.1 Densitas karbon terhadap pengurangan ketebalan

Gambar 5(c) menunjukkan pori kertas karbon yang diisi dengan partikel karbon untuk membuat makropori GDL. Di atas permukaan lapisan makropori GDL dibuat lapisan tipis mikropori seperti pada Gambar 5(b). Lapisan Gambar 5(c) berfungsi sebagai distributor gas pada lapisan Gambar 5(b). Gambar 5(b) sebagai penyanggah lapisan tipis elektrode.

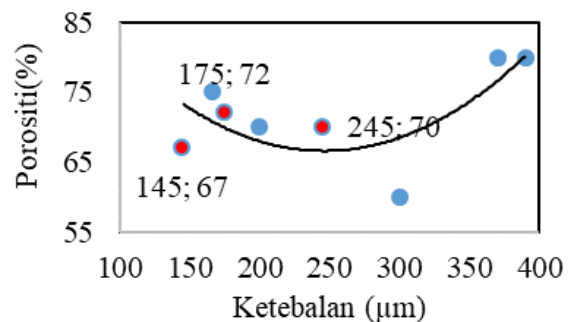


Gambar 7. Densitas karbon vs ketebalan

Gambar 7 menunjukkan *trendline* pemetaan untuk keperluan densitas karbon terhadap pengurangan tebal. Tiga data label pada gambar warna merah menunjukkan hasil pengujian dengan mesin spray. Pada Gambar 7, pengurangan tebal dari 250 dapat dilakukan sampai sekitar 145µm. Keperluan karbon karbon pada pemetaan sekitar 2 gcm⁻² sedangkan pada percobaan 1,75gcm⁻². Prestasi pengurangan karbon lapisan ini tergantung nilai porositas lapisan tipis diatas permukaan GDL. Apabila porositas meningkat maka keperluan karbon akan lebih sedikit. Dengan kata lain ketebalan yang sama dapat terjadi perbedaan karbon ditinjau dari porositas.

4.2. Porositas pada pengurangan ketebalan

Pembentukan porositas lapisan fidi GDL pada ketebalan tertentu digunakan untuk memastikan reaktan meresap ke lapisan katalis dan menghantarkan elektron dari lapisan katalis ke badan GDL (Daud et al. 2004; Lufano et al. 2001).

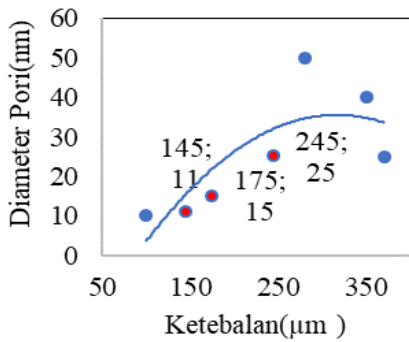


Gambar 8. Porositas lapisan terhadap ketebalan

Selain itu, porositas untuk mempertahankan kelembapan untuk keperluan hidrasi membran. Pembentukan porositas mikropori dilakukan dengan proses pemanasan pada tekanan tertentu. Bahan aditif sebagai pembentuk mikroporous dan PTFE sebagai hidrofobik (Shi Chao, Lan, and Jinhua 2011). Melalui proses panas, bahan aditif akan berubah menjadi fasa gas dan membangun pori pori. Selama pemanasan bahan PTFE akan berubah menjadi fasa serat. Gambar 8 menunjukkan data pemetaan laporan terdahulu dan data hasil percobaan. Data label warna merah menunjukkan hasil percobaan dan warna biru data pemetaan jurnal terdahulu. Pengurangan ketebalan dilakukan dari 245 µm sampai 145 µm. Pada ketebalan 145µm porositas lapisan sebesar 67 % dan jika digunakan *trendline* polinomial order 2 pada seluruh data bahwa pembentukan porositas pada lapisan mungkin sudah maksimal.

4.3. Diameter pori pada pengurangan Ketebalan

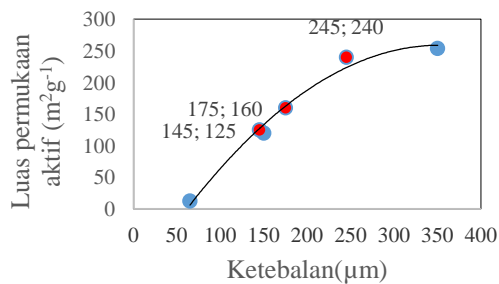
Gambar 9, menunjukkan hubungan diameter pori dengan ketebalan pada pemetaan dan percobaan. Data label warna merah menunjukkan hasil percobaan. Apabila pendekatan dilakukan dengan *trendline* polinomial orde 2 pada seluruh data, menunjukkan diameter pori semakin kecil pada ketebalan yang semakin kecil.



Gambar 9. Hubungan diameter pori dengan ketebalan.

Dalam Gambar 9, diameter pori percobaan berwarna merah terletak dibawah *trendline*. Hal ini menunjukkan menggunakan metode mesin Spray menghasilkan diameter pori kecil tetapi porositas lebih hampir sama seperti ditunjukkan Gambar 8. Pada pengurangan ketebalan lapisan mendekati 150 µm yaitu 145 µm di dapatkan diameter pori sekitar 11 nm dengan porositas dibawah 67%.

4.4. Luas permukaan aktif terhadap ketebalan



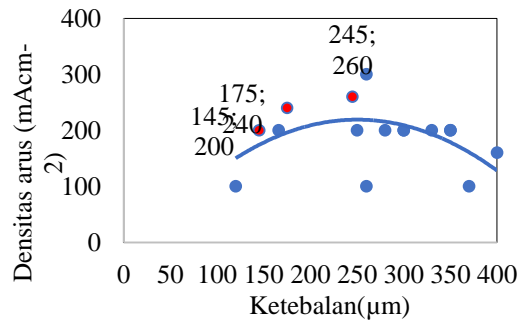
Gambar 10. Luas permukaan aktif terhadap Ketebalan

Gambar 10, menunjukkan hubungan luas permukaan aktif terhadap pengurangan ketebalan dengan menggunakan alat analisis BET. Data labels warna merah pada gambar menunjukkan hasil percobaan. Dengan pendekatan *trendline options* linear, pengurangan ketebalan diikuti dengan pengurangan luas permukaan aktif lapisan tipis. Peta dari data hasil percobaan terletak di atas *trendline*. Hal ini menunjukkan pengurangan ketebalan 245 µm sampai 145 µm memiliki Luas permukaan aktif percobaan mendekati dari data hasil pemetaan jurnal. Dengan luas permukaan aktif (m^2g^{-1}) yang mendekati maka dapat disimpulkan distribusi penyebaran reaktan ke katalisator akan homogen seperti penelitian lainnya.

4.5. Densitas arus terhadap pengurangan tebal

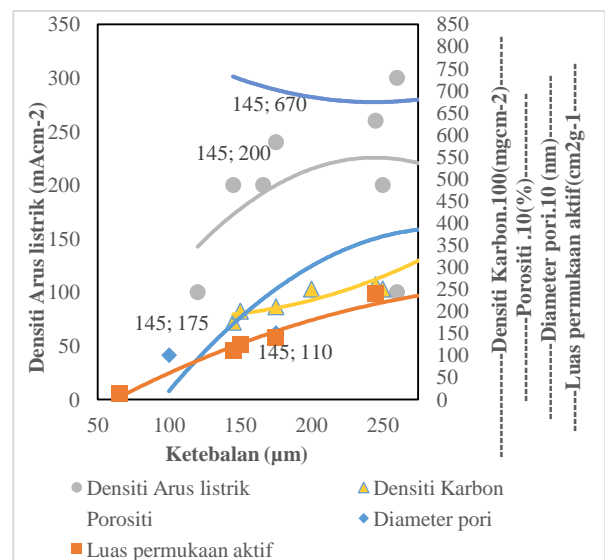
Gambar 11 menunjukkan pendekatan penurunan ketebalan. Data label warna merah menunjukkan data percobaan melalui metode mesin sepray dan proses pengeringan dan *hot press*. Apabila dikenakan pendekatan *trendline option* polinomial orde 2, peta hasil percobaan ada yang berada diatas garis. Kondisi ini menunjukkan prestasi penurunan ketebalan lapisan tipis masih dapat dilakukan. Pada

ketebalan sekitar 145µm mendapatkan arus sekitar 200 $mAcm^{-2}$.



Gambar 11. Hubungan Densitas arus dengan ketebalan

Gambar 12 menunjukkan karakteristik pengurangan ukuran lapisan tipis diatas permukaan GDL. Setiap *trendline* terdapat data labels 1 titik yang menunjukkan hasil percobaan pada ketebalan 145 µm. Apabila ditentukan ketebalan maka ukuran lapisan dapat ditentukan baik keperluan karbon, porositas, diameter pori dan luas permukaan aktif.



Gambar 12. Karakteristik Pengurangan Ketebalan

Dari gambar, korelasi parameter ini memiliki hubungan yang saling mempengaruhi. Pendekatan hubungan parameter menggunakan *trendline option* polinomial orde 2. Dari gambar pengurangan tebal dari 250 µm sampai sekitar 145µm didapati porositas 67% sampai 72%. Pendekatan ini sangat mendukung Gambar 2(a,b) bahwa ketebalan sekitar 100 sampai 400 µm didapati porositas sekitar 40-70%.

5. Kesimpulan

Dari pemetaan dan analisis pengurangan lapisan tipis di atas permukaan GDL dapat dimulai dari nilai ketebalan sekitar 150 µm, dengan kebutuhan karbon karbon sekitar

2 mgcm⁻². Tebal sekitar 150 µm, masih dapat menghasilkan porositas yang lebih besar dari 40%. Ini berarti ketebalan 250 µm masih dapat dikurangi hingga sekitar 145 µm untuk density karbon sekitar 2 mgcm⁻².

Referensi

- Amphlett, J.C., R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge, and A. Rodrigues. 1995. "Practical PEM Fuel Cell Model for Simulating Vehicle Power Sources." In *Proceedings of the Annual Battery Conference*.
- Antolini, E, R.R Passos, and E.a Ticianelli. 2002. "Effects of the Carbon Powder Characteristics in the Cathode Gas Diffusion Layer on the Performance of Polymer Electrolyte Fuel Cells." *Journal of Power Sources* 109 (2): 477–82. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00112-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00112-X).
- Antolini, Ermete, Raimundo R. Passos, and Edson A. Ticianelli. 2002. "Electrocatalysis of Oxygen Reduction on a Carbon Supported Platinum-Vanadium Alloy in Polymer Electrolyte Fuel Cells." *Electrochimica Acta* 48 (3): 263–70. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(02\)00644-8](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(02)00644-8).
- Baldauf, M., and W. Preidel. 1999. "Status of the Development of a Direct Methanol Fuel Cell." *Journal of Power Sources* 84 (2): 161–66. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00332-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00332-8).
- Baschuk, J.J, and Xianguo Li. 2000. "Modelling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells with Variable Degrees of Water Flooding." *Journal of Power Sources* 86 (1): 181–96. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00426-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00426-7).
- Bazylak, A. 2009. "Liquid Water Visualization in PEM Fuel Cells: A Review." *International Journal of Hydrogen Energy* 34 (9). Elsevier Ltd: 3845–57. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.02.084>.
- Benziger, Jay, James Nehlsen, David Blackwell, Tom Brennan, and Johannah Itescu. 2005. "Water Flow in the Gas Diffusion Layer of PEM Fuel Cells." *Journal of Membrane Science* 261 (1–2): 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.03.049>.
- Berning, T., D.M. Lu, and N. Djilali. 2002. "Three-Dimensional Computational Analysis of Transport Phenomena in a PEM Fuel Cell." *Journal of Power Sources* 106 (1): 284–94. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)01057-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)01057-6).
- Bessette, Russell R, Maria G Medeiros, Charles J Patrissi, Craig M Deschenes, and Christopher N Lafratta. 2001. "Development and Characterization of a Novel Carbon @ Ber Based Cathode for Semi-Fuel Cell Applications." *Journal of Power Sources* 96: 240–44.
- Ceraolo, M., C. Miulli, and A. Pozio. 2003. "Modelling Static and Dynamic Behaviour of Proton Exchange Membrane Fuel Cells on the Basis of Electro-Chemical Description." *Journal of Power Sources* 113 (1): 131–44. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00565-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00565-7).
- Chan, S. H., and H. M. Wang. 2004. "Thermodynamic and Kinetic Modelling of an Autothermal Methanol Reformer." *Journal of Power Sources* 126 (1–2): 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.08.016>.
- Chang, Paul, Gwang Soo Kim, Keith Promislow, and Brian Wetton. 2007. "Reduced Dimensional Computational Models of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Stacks." *Journal of Computational Physics* 223 (2): 797–821. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2006.10.011>.
- Chen, Jinhua, Toyooki Matsuura, and Michio Hori. 2004. "Novel Gas Diffusion Layer with Water Management Function for PEMFC." *Journal of Power Sources* 131 (1–2): 155–61. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.01.007>.
- Chen, Li, Hui-Bao Luan, Ya-Ling He, and Wen-Quan Tao. 2012. "Pore-Scale Flow and Mass Transport in Gas Diffusion Layer of Proton Exchange Membrane Fuel Cell with Interdigitated Flow Fields." *International Journal of Thermal Sciences* 51. Elsevier Masson SAS: 132–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.08.003>.
- Chu, Deryn, and Rongzhong Jiang. 1999. "Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell PEMFC Stacks Part I. Evaluation and Simulation of an Air-Breathing PEMFC Stack." *Journal of Power Sources* 83: 128–33. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00285-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00285-2).
- Chu, Hsin S., Chung Yeh, and Falin Chen. 2003. "Effects of Porosity Change of Gas Diffuser on Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell." *Journal of Power Sources* 123 (1): 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00605-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00605-5).
- Cindrella, L., A. M. Kannan, J. F. Lin, K. Saminathan, Y. Ho, C. W. Lin, and J. Wertz. 2009. "Gas Diffusion Layer for Proton Exchange Membrane Fuel Cells-A Review." *Journal of Power Sources* 194 (1): 146–60. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.04.005>.
- Daud, Wan R W, Abu Bakar, Abdul Amir, H Kadhum, Rachid Chebbi, and Sunny E Iyuke. 2004. "Performance Optimisation of PEM Fuel Cell during MEA Fabrication" 45: 3239–49. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.01.011>.
- Eisman, G.A. 1990. "The Application of Dow Chemical's Perfluorinated Membranes in Proton-Exchange Membrane Fuel Cells." *Journal of Power Sources* 29 (3–4): 389–98. [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(90\)85012-2](https://doi.org/10.1016/0378-7753(90)85012-2).
- Escudero, M. J., E. Hontañón, S. Schwartz, M. Boutonnet, and L. Daza. 2002. "Development and Performance Characterisation of New Electrocatalysts for PEMFC." *Journal of Power Sources* 106 (1–2): 206–14. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)01040-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)01040-0).
- Frey, Th, and M. Linardi. 2004. "Effects of Membrane Electrode Assembly Preparation on the Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Performance." *Electrochimica Acta* 50 (1): 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.07.017>.
- Fuller, Thomas F., and John Newman. 1993. "Water and Thermal Management in Solid-Polymer-Electrolyte Fuel Cells." *Electrochemical Society* 140 (5): 1218–

- 25.
- Gamburzev, Sergei, and A. John Appleby. 2002. "Recent Progress in Performance Improvement of the Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)." *Journal of Power Sources* 107 (1): 5–12. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00970-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00970-3).
- Gasteiger, H. A., J. E. Panels, and S. G. Yan. 2004. "Dependence of PEM Fuel Cell Performance on Catalyst Loading." *Journal of Power Sources* 127 (1–2): 162–71. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.09.013>.
- Ge, Shan Hai, and Bao Lian Yi. 2003. "A Mathematical Model for PEMFC in Different Flow Modes." *Journal of Power Sources* 124 (1): 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(03\)00584-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00584-6).
- Gostick, Jeff T., Marios A. Ioannidis, Michael W. Fowler, and Mark D. Pritzker. 2007. "Pore Network Modeling of Fibrous Gas Diffusion Layers for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells." *Journal of Power Sources* 173 (1): 277–90. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.04.059>.
- Grujicic, M., J. R. Saylor, D. E. Beasley, W. S. DeRosset, and D. Helfritsch. 2003. "Computational Analysis of the Interfacial Bonding between Feed-Powder Particles and the Substrate in the Cold-Gas Dynamic-Spray Process." *Applied Surface Science* 219 (3–4): 211–27. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00643-3](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00643-3).
- Gülzow, E, M Schulze, N Wagner, T Kaz, R Reissner, G Steinhilber, and A Schneider. 2000. "Dry Layer Preparation and Characterisation of Polymer Electrolyte Fuel Cell Components." *Journal of Power Sources* 86 (1–2): 352–62. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00451-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00451-6).
- Gurau, Vladimir, Frano Barbir, and Hongtan Liu. 2000. "An Analytical Solution of a Half-Cell Model for PEM Fuel Cells." *Electrochemical Society* 147 (7): 2468–77.
- Haug, Andrew T., Ralph E. White, John W. Weidner, and Wayne Huang. 2002. "Development of a Novel CO Tolerant Proton Exchange Membrane Fuel Cell Anode." *Journal of The Electrochemical Society* 149 (7): A862. <https://doi.org/10.1149/1.1479726>.
- Janssen, G. J M, and M. L J Overvelde. 2001. "Water Transport in the Proton-Exchange-Membrane Fuel Cell: Measurements of the Effective Drag Coefficient." *Journal of Power Sources* 101 (1): 117–25. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00708-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00708-X).
- Jen, Tien Chien, Tuanzhou Yan, and Shih Hung Chan. 2003. "Chemical Reacting Transport Phenomena in a PEM Fuel Cell." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (22): 4157–68. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00253-9](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00253-9).
- Johnson, R. 2001. "Performance of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack." *International Journal of Hydrogen Energy* 26 (8): 879–87. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(01\)00020-9](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00020-9).
- Kalk, Th, F Mahlendorf, O Niemzig, A Trautmann, and J Roes. 2000. "Portable PEFC Generator with Propane as Fuel," 166–72.
- Kong, Chang Sun, Do Young Kim, Han Kyu Lee, Yong Gun Shul, and Tae Hee Lee. 2002. "Influence of Pore-Size Distribution of Diffusion Layer on Mass-Transport Problems of Proton Exchange Membrane Fuel Cells." *Journal of Power Sources* 108 (1–2): 185–91. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00028-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00028-9).
- Krüger, Ph, H. Markötter, J. Haußmann, M. Klages, T. Arlt, J. Banhart, Ch Hartnig, I. Manke, and J. Scholta. 2011. "Synchrotron X-Ray Tomography for Investigations of Water Distribution." *Journal of Power Sources* 196 (12): 5250–55. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.042>.
- Lee, W, J W Van Zee, and M Murthy. 2003. "ORIGINAL RESEARCH PAPER A Method for Characterizing CO Transients in a PEMFC," no. 1: 52–58. <https://doi.org/10.1002/fuce.200331102>.
- Lim, Chan, and C. Y. Wang. 2004. "Effects of Hydrophobic Polymer Content in GDL on Power Performance of a PEM Fuel Cell." *Electrochimica Acta* 49 (24): 4149–56. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.04.009>.
- Lin, Guangyu, Wensheng He, and Trung Van Nguyen. 2004. "Modeling Liquid Water Effects in the Gas Diffusion and Catalyst Layers of the Cathode of a PEM Fuel Cell." *Journal of The Electrochemical Society* 151 (12): A1999. <https://doi.org/10.1149/1.1808633>.
- Lindermeir, A., G. Rosenthal, U. Kunz, and U. Hoffmann. 2004. "On the Question of MEA Preparation for DMFCs." *Journal of Power Sources* 129 (2): 180–87. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.11.002>.
- Litster, S., and G. McLean. 2004. "PEM Fuel Cell Electrodes." *Journal of Power Sources* 130 (1–2): 61–76. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.12.055>.
- Liu, Renxuan, and Eugene S. Smotkin. 2002. "Array Membrane Electrode Assemblies for High Throughput Screening of Direct Methanol Fuel Cell Anode Catalysts." *Journal of Electroanalytical Chemistry* 535 (1–2): 49–55. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(02\)01144-0](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(02)01144-0).
- Lu, Jian, Wenhao Huang, Zhimin Ping, and Precision Machinery. 2001. "Preparation of Thick PZT Film by Electrostatic Spray Deposition (ESD) for the Application in Micro-System Technology." *Departement of Precision Machinery and Instrum, Univ of Sci and Tech of China*. 184 (1882): 200–201.
- Lufrano, F, I Gatto, P Staiti, V Antonucci, and E Passalacqua. 2001. "Sulfonated Polysulfone Ionomer Membranes for Fuel Cells," 0–4.
- Marr, Curtis, and Xianguo Li. 1999. "Composition and Performance Modelling of Catalyst Layer in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell." *Journal of Power Sources* 77 (1): 17–27. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(98\)00161-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(98)00161-X).

- Matsuura, Toyooki, Megumi Kato, and Michio Hori. 2006. "Study on Metallic Bipolar Plate for Proton Exchange Membrane Fuel Cell." *Journal of Power Sources* 161 (1): 74–78. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.04.064>.
- Mirzazadeh, J., E. Saievar-Iranizad, and L. Nahavandi. 2004. "An Analytical Approach on Effect of Diffusion Layer on ORR for PEMFCs." *Journal of Power Sources* 131 (1–2): 194–99. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.11.096>.
- Monanteras, Nectarios C, and Christos A Frangopoulos. 1999. "Towards Synthesis Optimization of a Fuel-Cell Based Plant" 40.
- Moreira, R., M. Havranek, and D. Sames. 2001. "New Fluorogenic Probes for Oxygen and Carbene Transfer: A Sensitive Assay for Single Bead-Supported Catalysts." *Journal of the American Chemical Society* 123 (17): 3927–31. <https://doi.org/10.1021/ja003786+>.
- Nakayama, T., H. Matsuda, K. Kimura, and H. Ino. 1997. "Mössbauer Spectroscopy and Electrical Conductivity of Fe-Doped β -Rhombohedral Boron." *Journal of Solid State Chemistry* 133 (1). <https://doi.org/10.1006/jssc.1997.7544>.
- Nam, Jin Hyun, and Massoud Kaviani. 2003. "Effective Diffusivity and Water-Saturation Distribution in Single- and Two-Layer PEMFC Diffusion Medium." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (24): 4595–4611. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00305-3](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00305-3).
- Nguyen, Phong Thanh, Torsten Berning, and Ned Djilali. 2004. "Computational Model of a PEM Fuel Cell with Serpentine Gas Flow Channels." *Journal of Power Sources* 130 (1–2): 149–57. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.12.027>.
- O'hayre, Ryan, Sang Joon Lee, Suk Won Cha, and Fritz B. Prinz. 2002. "A Sharp Peak in the Performance of Sputtered Platinum Fuel Cells at Ultra-Low Platinum Loading." *Journal of Power Sources* 109 (2): 483–93. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00238-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00238-0).
- Oedegaard, A., C. Hebling, A. Schmitz, S. Møller-Holst, and R. Tunold. 2004. "Influence of Diffusion Layer Properties on Low Temperature DMFC." *Journal of Power Sources* 127 (1–2): 187–96. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.09.015>.
- Owejan, J. P., T. A. Trabold, D. L. Jacobson, M. Arif, and S. G. Kandlikar. 2007. "Effects of Flow Field and Diffusion Layer Properties on Water Accumulation in a PEM Fuel Cell." *International Journal of Hydrogen Energy* 32 (17): 4489–4502. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.05.044>.
- Owejan, J. P., T. A. Trabold, D. L. Jacobson, D. R. Baker, D. S. Hussey, and M. Arif. 2006. "In Situ Investigation of Water Transport in an Operating PEM Fuel Cell Using Neutron Radiography: Part 2 - Transient Water Accumulation in an Interdigitated Cathode Flow Field." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 (25–26): 4721–31. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.07.04>.
- P., STAITI, HOCEVAR S., and PASSALACQUA E. 1997. "ACTIVITY AND STABILITY TESTS IN PHOSPHOTUNGSTIC ACID ELECTROLYTE FUEL CELL." *JOURNAL OF POWER SOURCES* 65 (1–2): 281–82. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(97\)81549-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753(97)81549-2).
- Park, Sehkyu, Jong Won Lee, and Branko N. Popov. 2008. "Effect of PTFE Content in Microporous Layer on Water Management in PEM Fuel Cells." *Journal of Power Sources* 177 (2): 457–63. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.11.055>.
- . 2012. "A Review of Gas Diffusion Layer in PEM Fuel Cells: Materials and Designs." *International Journal of Hydrogen Energy* 37 (7): 5850–65. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.148>.
- Pathapati, P. R., X. Xue, and J. Tang. 2005. "A New Dynamic Model for Predicting Transient Phenomena in a PEM Fuel Cell System." *Renewable Energy* 30 (1): 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.05.001>.
- Paulus, U A, A Wokaun, G G Scherer, Paul Scherrer Institut, and Ch- Villigen Psi. 2002. "Oxygen Reduction on Carbon-Supported Pt - Ni and Pt - Co Alloy Catalysts," no. 41: 4181–91.
- Pozio, A, M De Francesco, A Cemmi, F Cardellini, and L Giorgi. 2002. "Comparison of High Surface Pt/C Catalysts by Cyclic Voltammetry." *Journal of Power Sources* 105 (1): 13–19. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00921-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00921-1).
- Prasanna, M., H. Y. Ha, E. A. Cho, S. A. Hong, and I. H. Oh. 2004. "Influence of Cathode Gas Diffusion Media on the Performance of the PEMFCs." *Journal of Power Sources* 131 (1–2): 147–54. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.01.030>.
- Rowe, Andrew, and Xianguo Li. 2001. "Mathematical Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells." *Journal of Power Sources* 102 (1–2): 82–96. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00798-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00798-4).
- Shi Chao, Zhang, Zhang Lan, and Yu Jinhua. 2011. "Preparation and Electrochemical Properties of Polysulfide Polypyrrole." *Journal of Power Sources* 196 (23). Elsevier B.V.: 10263–66. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.08.092>.
- Shimizu, Takahiro, Toshiyuki Momma, Mohamed Mohamedi, Tetsuya Osaka, and Srinivasan Sarangapani. 2004. "Design and Fabrication of Pumpless Small Direct Methanol Fuel Cells for Portable Applications." *Journal of Power Sources* 137 (2): 277–83. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.06.008>.
- Sinha, Puneet K., and Chao-Yang Wang. 2008. "Liquid Water Transport in a Mixed-Wet Gas Diffusion Layer of a Polymer Electrolyte Fuel Cell." *Chemical Engineering Science* 63 (4): 1081–91. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.11.007>.
- Sui, P.-C., L.-D. Chen, James P. Seaba, and Yoshinori Wariishi. 1999. "Modeling and Optimization of a

- PEMFC Catalyst Layer.” *Journal of Engines-VI08-3* 539 (1): 11. <https://doi.org/https://doi.org/10.4271/1999-01-0539>.
- Thampan, T., S. Malhotra, J. Zhang, and R. Datta. 2001. “PEM Fuel Cell as a Membrane Reactor.” *Catalysis Today* 67 (1-3): 15-32. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(01\)00278-4](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(01)00278-4).
- Um, Sukkee, C Wang, and K S Chen. 2000. “Computational Fluid Dynamics Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells” 147 (12): 4485-93.
- Wang, Lin, Attila Husar, Tianhong Zhou, and Hongtan Liu. 2003. “A Parametric Study of PEM Fuel Cell Performances.” *International Journal of Hydrogen Energy* 28 (11): 1263-72. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00284-7](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00284-7).
- Wilson, Mahlon S, Fernando H Garzon, Kurt E Sickafus, and Shimshon Gottesfeld. 1993. “Surface Area Loss of Supported Platinum in Polymer Electrolyte Fuel Cells” 140 (10): 2872-77.
- Yamada, Koji, Kazuaki Yasuda, Hirohisa Tanaka, Yoshinori Miyazaki, and Tetsuhiko Kobayashi. 2003. “Effect of Anode Electrocatalyst for Direct Hydrazine Fuel Cell Using Proton Exchange Membrane.” *Journal of Power Sources* 122 (2): 132-37. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(03\)00440-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00440-3).
- Yoon, Hee Sung, Seung Woo Choi, Dokyol Lee, and Byong Ho Kim. 2001. “Synthesis and Characterization of Gd_{1-x}Sr_xMnO₃ Cathode for Solid Oxide Fuel Cells.” *Journal of Power Sources* 93 (1-2): 1-7. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(00\)00504-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(00)00504-8).
- Yoshitake, T., Y. Shimakawa, S. Kuroshima, H. Kimura, T. Ichihashi, Y. Kubo, D. Kasuya, et al. 2002. “Preparation of Fine Platinum Catalyst Supported on Single-Wall Carbon Nanohorns for Fuel Cell Application.” *Physica B: Condensed Matter* 323 (1-4): 124-26. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(02\)00871-2](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(02)00871-2).
- You, Lixin, and Hongtan Liu. 2002. “A Two-Phase Flow and Transport Model for the Cathode of PEM Fuel Cells.” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45 (11): 2277-87. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00322-2](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00322-2).