

Fabrication of Copper Nanocomposite Polypropylene Matrix by Chemistry Methode as Material for Bipolar Plate in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Application

Muhammad Fitrullah⁽¹⁾; Akhmad Herman Yuwono⁽²⁾; Sari Katili⁽²⁾

⁽¹⁾Metallurgy of Manufacture Laboratory - Jurusan Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa; Jl. Jenderal Sudirman Km 3 Cilegon, Banten 42435, Indonesia
Telp: 081314036547; 0254-395502; 376712; , Fax: 0254-395440

⁽²⁾ Departemen Metalurgi dan Material (DMM), Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Kampus Baru – UI Depok Jawa Barat 16424, Indonesia
fitrullah@ft-untirta.ac.id.
ahyuwono@metal.ui.ac.id.
sari@metal.ui.ac.id

Abstrak

The objective of this research is to obtain the correlation between synthesis parameters, nano/microstructure, and performance of inorganic-organic nanocomposites containing copper nanoparticles in polypropylene matrix. Besides, this project is aimed at getting an optimum composition and dispersion of copper nanoparticles in polypropylene matrix. For these purposes, the research were carried out into one stages. The stage is fabricating nanocomposites by adding copper nanoparticles (0; 0.1; 1; 1.5; and 2 wt%) into polypropylene matrix. This Cu-PP nanocomposites were characterized by UV-spectroscopy, electric conductivity, melt flow rate, scanning electron microscope, and thermal gravity analysis test. The result of research indicates that an optimum composition of Cu-PP nanocomposites were obtained on 2 wt%, resulting in a lowest band gap energy is 3.78 eV, the highest critical temperature of 338⁰C, and MFR value of 91.09 g/10 min. These values can fulfill the spesification to produce the bipolar plate by injection molding process.

Keywords: PEM fuel cell, bipolar plate, Cu nanocomposite, polypropylene matrix, chemistry methode.

Makalah ini merupakan hasil dari penelitian tahap pertama terhadap pembuatan salah satu komponen fuel cell yaitu pelat bipolar yang berasal dari bahan komposit bermatrik polimer. Dimana, Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan korelasi parameter dalam proses sintesis, struktur mikro/nano, dan performa bakalan nanokomposit inorganik-organik dari partikel nano tembaga di dalam matrik polipropilena. Selain itu, juga bertujuan untuk memperoleh komposisi optimum dan dispersitas/distribusi sebaran yang merata dari partikel tembaga di dalam matrik polipropilena

METODOLOGI

Untuk mencapai tujuan di atas, dilakukan satu tahapan proses. Tahapan tersebut meliputi fabrikasi bakalan nanokomposit dengan penambahan nanopartikel tembaga (0; 0,5; 1; 1,5; dan 2 wt%) ke dalam matriks polipropilena. Bakalan nanokomposit tembaga ini dikarakterisasi melalui uji UV-Spektroskopi,

uji konduktivitas listrik, uji *melt flow rate* (MFR), uji *scanning electron microscope* (SEM), dan uji *thermal gravity analysis* (TGA).

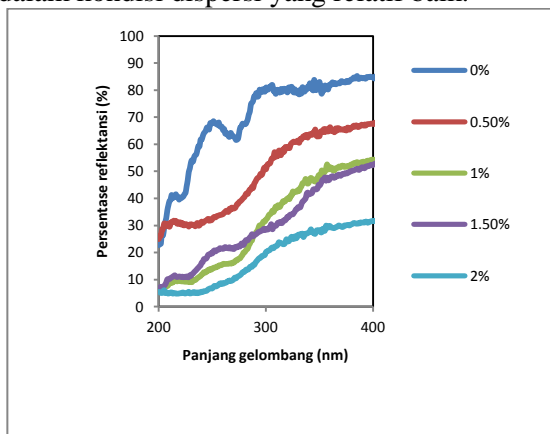
HASIL & PEMBAHASAN

1. Hasil Pengujian UV-Spektrofotometer

Gambar 1 memberikan hasil spektrum reflektansi UV-Vis sampel nanokomposit tembaga dalam matrik PP dengan variasi 0, 0.5, 1.0, 1.5, dan 2 wt%. Dari gambar tersebut dapat terlihat bahwa tingkat reflektansi sampel mengalami penurunan sejalan dengan meningkatnya pengisian nanopartikel Cu di dalam PP.

Hasil di Gambar 1. dapat dipahami karena secara visual tampilan sampel dengan kandungan nanopartikel hingga 2% berwarna lebih gelap dibandingkan dengan sampel dengan kandungan nanopartikel Cu yang lebih rendah atau bahkan sampel PP murni tanpa partikel pengisi sama sekali (0 wt%). Hal menarik lain yang dapat diamati dari Gambar 1

adalah bahwa pinggiran reflektansi (*reflectance edge*) dari spektrum bergeser dari panjang gelombang rendah menuju lebih tinggi (*red shift*). Hal ini memberikan indikasi bahwa sampel nanokomposit yang difabrikasi mampu memberikan efek kuantum (*quantum effect*), yaitu perubahan sifat-sifat elektronik material sejalan dengan mengecilnya ukuran partikel hingga skala nanometer. Ini merupakan ciri khas suatu sistem material yang di dalamnya terdapat material inorganik oksida semikonduktor atau logam yang berada dalam rentang nanometer maka efek pergeseran sisi absorpsi menjadi sangat signifikan. Dengan hasil yang ditunjukkan oleh Gambar 1, maka ini menunjukkan indikasi positif bahwa nanopartikel-nanopartikel tembaga (Cu) berada dalam kondisi dispersi yang relatif baik.



Gambar 1. Reflektansi spektrum nanokomposit tembaga (Cu) dengan variasi tingkat pengisian fasa inorganik Cu di dalam matrik PP sebesar 0, 0.5, 1, 1.5, dan 2 wt%.

Berdasarkan perhitungan dengan menggunakan persamaan Kubelka-Munk, maka didapatkan hasil besarnya energi absorpsi (dalam eV) dari sampel nanokomposit 0, 0.5, 1, 1.5, dan 2% dan juga nilai Kubelka-Munk (KM). Sedangkan nilai KM merupakan perbandingan antara kuadrat dari sisa persen reflektansi terhadap nilai ganda dari persen reflektansi itu sendiri ($KM = [1-R]^2/2R$; R adalah nilai reflektansi). Lebih lanjut dapat dijelaskan terkait dengan energi celah pita yang didapatkan pada Tabel 1, menunjukkan adanya indikasi pengaruh tingkat pengisian nanopartikel tembaga di dalam matrik PP, terhadap level nilai KM.

Indikasi pengaruh tingkat pengisian nanopartikel tembaga di dalam matrik PP, akan terlihat jelas ketika penentuan kecenderungan garis pada masing-masing grafik. Bersama dengan itu, kecenderungan garis ini akan memudahkan perkiraan energi celah pita (*band gap energi*) yang merupakan parameter penting

sifat-sifat listrik maupun termal dari bakalan nanokomposit yang difabrikasi. Untuk itu, sebelum memperkirakan sifat-sifat listrik dan termal dalam kebutuhan analisis suatu material, penting dicari persamaan garis dengan mengumpulkan data-data pengukuran UV-vis.

Energi celah pita merupakan indikasi proses eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Dalam hal ini, apabila kecenderungan garis kepada spektrum energi yang rendah, maka energi yang dibutuhkan oleh elektron untuk proses eksitasi menuju pita konduksi semakin kecil. Artinya, semakin kecil energi celah pita suatu bahan, maka akan semakin mudah elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi. Terkait dengan hal ini, energi celah pita dapat ditentukan dengan menarik garis lurus sampai berpotongan dengan sumbu x (energi absorpsi) pada masing-masing grafik energi absorpsi terhadap nilai Kubelka-Munk. Atau dengan kata lain, nilai energi celah pita merupakan titik energi absorpsi dari suatu material ketika nilai KM mencapai nol dari kecenderungan garis lurus pada grafik energi absorpsi terhadap nilai Kubelka-Munk.

Adapun energi celah pita dari masing-masing sampel nanokomposit tembaga 0, 0.5, 1, 1.5, dan 2 wt% ditunjukkan oleh Tabel 1

Tabel 1. Energi celah pita nanokomposit tembaga 0, 0.5, 1, 1.5, dan 2 wt%.

Tingkat pengisian nanopartikel Cu (wt%)	Energi celah pita(eV)
0.0	5.80
0.5	3.81
1.0	4.38
1.5	4.47
2.0	3.78

Pada Tabel 1, memperlihatkan besarnya energi celah pita (eV) dari sampel nanokomposit tembaga (Cu). Hal ini memperlihatkan bahwa secara umum semakin besar tingkat pengisian partikel nanotembaga di dalam matrik PP, akan memperkecil nilai energi celah dari bakalan nanokomposit yang dihasilkan. Ini terlihat dari perubahan energi celah pita PP yang semula 5.8 eV, setelah ditambah nanopartikel Cu sebesar 0.5 wt% turun menjadi 3.81. Begitu juga ketika ditambahkan 1, 1.5, sampai 2 wt% nanopartikel tembaga, energi celah pita turun menjadi masing-masing 4.38, 4.47 dan 3.78 eV. Dari data ini, didapatkan bahwa energi celah pita terkecil ditunjukkan pada persentase pengisian 2 wt% nanotembaga. Energi celah pita yang

semakin kecil dapat dijelaskan karena apabila semakin banyak nanopartikel Cu yang dimasukkan ke dalam matrik PP, maka jarak antar *cluster* menjadi semakin dekat dan hal ini membawa implikasi kepada transfer electron dari satu *cluster* ke *cluster* yang lain, yang pada akhirnya memberikan perbedaan pada nilai konduktivitas material.

2. Hasil Pengujian Konduktivitas Listrik

Tabel 2. adalah hasil pengukuran konduktivitas listrik pada bakalan nanokomposit tembaga. Sedangkan Gambar 13, merupakan grafik yang dihasilkan dari data pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai rata-rata nilai konduktivitas listrik nanokomposit Cu

Sampel	PP	0,5%	1%	1,5%	2%
Nilai Konduktivitas (S/cm)	7.54 4E-08	5.45 3E-08	1.44 3E-07	1.35 2E-07	9.30 6E-08

Tabel 2 memperlihatkan peningkatan konduktivitas listrik secara umum dengan adanya penambahan nanopartikel tembaga dalam matrik PP. Ini dapat dimengerti karena dispersi partikel dan bentuk jaringan kontinyu dari bahan pengisi konduktif yang akan mempengaruhi sifat konduktivitas. Hal yang menarik dari Tabel 2 adalah nilai konduktivitas listrik nanokomposit tembaga 1 wt% mencapai nilai maksimum yaitu sebesar 1.443×10^{-7} S/cm; sedangkan nilai minimum dicapai pada 0.5 wt% nanotembaga dengan nilai konduktivitas hanya mencapai 5.453×10^{-8} S/cm. Kemudian berturut-turut turun pada 1.5 wt% dengan nilai sebesar 1.352×10^{-7} S/cm; 2 wt% dengan konduktivitas 9.306×10^{-7} S/cm.

Ketidakteraturan kecenderungan dari nilai konduktivitas listrik dalam penelitian ini, lebih disebabkan ketidaksempurnaan dalam proses fabrikasi pada pembuatan sampel untuk uji konduktivitas ini. Hal ini bisa dijelaskan dengan hasil dari foto struktur mikro dengan menggunakan instrumen SEM, dimana struktur mikro dari nanokomposit tembaga memperlihatkan jumlah porositas yang relatif bervariasi. Porositas yang cukup banyak terlihat pada nanokomposit tembaga 0.5 wt%, hal ini disebabkan karena pembuatan sampel untuk dengan metode serbuk, artinya serbuk nanokomposit mengalami proses kompaksi dingin kemudian selanjutnya dipanaskan (*sintering*) dalam oven dengan temperatur 200°C selama satu jam. Dan tidak bisa dipungkiri bahwa ciri produk dari metalurgi serbuk ini akan selalu menghasilkan porositas.

Ini sejalan dengan yang dijelaskan oleh Lenel yang menerangkan bahwa porositas biasa terjadi pada saat pemadatan ketika dilakukannya proses kompaksi. [Lenel, Fritz. V, 1980]

Sedangkan pada penelitian ini, nanokomposit tembaga 1 wt% memperlihatkan kuantitas dan kualitas porositas yang relatif kecil dibanding sampel nanokomposit tembaga lainnya, artinya banyaknya jumlah porositas pada nanokomposit tembaga 1 wt% relatif lebih sedikit dengan ukuran yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan nanokomposit tembaga 0.5 wt%.

Callister menjelaskan bahwa porositas merupakan gas atau udara yang terjebak dalam struktur mikro bahan. Adanya porositas akan mempengaruhi sifat mekanis dan elektrik dari komposit matrik polimer. Secara umum, struktur berpori akan mengakibatkan penurunan sifat mekanik jika dibandingkan dengan struktur yang lebih padat. Lebih lanjut Callister menjelaskan, porositas juga sangat menurunkan konduktivitas elektrik karena akan menghambat gerakan-gerakan aliran elektron yang mentransmisikan energi listrik. [Callister WD., 2007]

Sejalan dengan hal itu, Lenel menerangkan porositas bisa diakibatkan oleh penyusutan atau oleh gas yang terperangkap. Penyusutan yang terjadi pada saat pemadatan ketika dilakukannya proses kompaksi. [Lenel, Fritz. V, 1980] Dan akibat temperatur transisi material yang merupakan sumber utama pembentukan porositas, hal ini dihasilkan dari pengurangan volume yang diikuti oleh pemadatan akibat kompaksi. Sedangkan porositas akibat gas, dihasilkan dari perubahan temperatur dalam struktur mikro bahan.

4 Hasil pengujian *thermal gravimetry analysis* (TGA)

Hasil pengujian TGA, didapatkan perbandingan persen berat terhadap temperatur. Pada penelitian ini, memperlihatkan besarnya kehilangan berat yang sangat drastis pada rentang temperatur tertentu. Kehilangan berat dimulai dengan penurunan persentase berat nanokomposit tembaga. Persen berat nanokomposit tembaga 1 wt% yang hilang pada temperatur 351°C mencapai 0.98%, ini ditunjukkan dengan persen berat yang masih tersisa yaitu sebesar 99.02%. Persen berat nanokomposit tembaga 1.5 wt% yang hilang pada temperatur 351°C adalah 0.94%, sebab persen berat yang masih tersisa adalah 99.04%. Adapun untuk nanokomposit tembaga 2 wt%, kehilangan berat pada temperatur 391°C mencapai 1%. Hal ini ditunjukkan dengan persen berat yang masih tersisa yaitu sebesar 99% pada

Selain hal di atas, informasi penting yang dapat diambil dari pengujian TGA adalah temperatur dimana mulai kehilangan berat dari masing-masing nanokomposit tembaga 0,5, 1, 1,5 dan 2 wt%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nanokomposit 0,5 wt% mulai kehilangan berat pada temperatur 234⁰C. Sedangkan mulai temperatur kehilangan berat dari masing-masing nanokomposit tembaga 1, 1,5, dan 2 wt% adalah 269, 234, dan 338⁰C.

Temperatur dimana mulainya kehilangan berat dari suatu bahan komposit bermatrik polimer, dapat menjadi informasi penting untuk memperkirakan sifat termal bahan. Hal ini sangat beralasan karena dalam aplikasi sel bahan bakar, bahan-bahan ini akan mendapatkan tegangan termal (*thermal stress*) akibat temperatur operasi. Khusus untuk PEM sel bahan bakar, suatu pelat bipolar harus memiliki stabilitas panas sampai temperatur 120⁰C. [Robberg K, dkk; 2002] Sedangkan hasil penelitian ini menunjukkan bahwa temperatur terendah kehilangan berat dari nanokomposit tembaga adalah 234⁰C yaitu persen pengisian 0,5 wt% nanotembaga. Sebaliknya, temperatur tertinggi dicapai pada persen pengisian 2 wt% nanotembaga dengan nilai 338⁰C. Hal ini dapat dijelaskan karena dengan tingkat pengisian nanotembaga yang semakin tinggi, akan terjadi penghalang dalam pergerakan aliran matrik PP yang terdekomposisi akibat panas. Dan ini dapat dijelaskan dengan hasil penelitian Scholta J at al yang mengkombinasikan grafit dengan resin termoset yang menunjukkan stabilitas suhu yang stabil. [Scholta J, at all; 1999]

5 Hasil pengujian *melt flow rate* (MFR)

Tabel 3, merupakan hasil pengujian *Melt Flow Rate* (MFR) pada bakalan nanokomposit tembaga.

Tabel 3. Hasil pengujian *Melt Flow Rate* (MFR) nanokomposit 0,5,1, 1,5, dan 2 wt%.

Bakalan Komposit	0 %	0,5 %	1 %	1,5 %	2 %
MFR (gram/10menit)	28,5	35,31	35,0	43,7	91,0

Pengujian MFR sangat diperlukan untuk mengetahui karakteristik aliran dari bakalan

nanokomposit tembaga. Karakteristik tersebut, dapat dihubungkan dengan kemampuan nanokomposit untuk diproduksi dalam jumlah yang besar (masal). Ini sangat terkait dengan komersialisasi dari pelat bipolar yang berasal dari material nanokomposit, dengan menggunakan metode *injection molding*. Di samping itu, nilai MFR menunjukkan kemampuan suatu bahan untuk mengisi bagian terkecil dan terjauh dalam suatu cetakan. Ini berarti, semakin besar nilai MFR suatu bahan, maka kemampuan dia membentuk suatu geometri yang tipis dan rumit akan semakin baik. Demikian juga sebaliknya, semakin kecil nilai MFR, maka akan sangat sulit aliran lelehan bahan itu untuk mengisi bagian yang terkecil dan terjauh dalam cetakan.

Sehubungan dengan hal di atas, nilai MFR minimal yang umum dipakai di industri sebagai syarat untuk produksi massal dengan alat *injection molding* adalah 10 gram/10 menit. [PT. Tripolita Indonesia, 2007] Dari pengujian MFR ini, diperoleh hasil yang menunjukkan bahwa sampel nanokomposit tembaga mengalami kenaikan nilai MFR ketika komposisi nanotembaga dinaikkan. Berturut-turut nilai MFR dari nanokomposit tembaga dari persen pengisian 0,5, 1, 1,5, dan 2 wt% adalah 28.51 g/10 menit; 35.31 g/10 menit; 35.05 g/10 menit; 43.72 g/10 menit; dan 91.09 g/10 menit.

Penelitian ini menunjukkan bahwa semakin besar persentase nanotembaga yang ditambahkan dalam matrik polipropilena, maka akan semakin memperbesar kecepatan aliran lelehan dari nanokomposit tembaga. Hal ini dapat dijelaskan bahwa penambahan tembaga ikut membantu proses pelumasan atau sliding di dalam material PP. Sehingga ketika PP mulai terdegradasi dan terkomposisi, nanopartikel tembaga ikut memberikan andil dalam mempercepat *sliding* yang terjadi. Hal ini sejalan fungsi grafit dalam penelitian Robberg et alyang membuat pelat bipolar dengan kombinasi grafit dan resin polimer dengan metode *compression molding*. Robberg menjelaskan bahwa grafit dapat membantu mempermudah proses *compression molding* akibat efek pelumasan pada saat pelelehan. [Robberg K,2003] Akibatnya, tingkat kekentalan dari lelehan menjadi rendah karena terbentuknya lelehan PP yang demikian besar dan cepat. Dengan kekentalan yang rendah ini, maka laju aliran lelehan PP semakin tinggi. Pada akhirnya, akan mempengaruhi kecepatan aliran lelehan tiap satuan waktu.

KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Fabrikasi **Nanokomposit tembaga**, menunjukkan indikasi positif pada perubahan sifat-sifat elektronik dengan penambahan nanotembaga di dalam matrik polipropilena.
2. Komposisi optimum untuk fabrikasi nanokomposit sebagai material sel bahan bakar dengan metode kimiawi basah dicapai pada tingkat pengisian inorganik nanotembaga sebanyak 2 wt%. Pada komposisi ini, nilai energi celah pita mencapai titik yang minimum sampai 3.78 eV.

DAFTAR PUSTAKA

- US Fuel Cell Council. *Fuel Cell for Power Generation*. Draft guidelines, materials & components working group. 2004.
- O'Hayre R, Cha S, Colella W, et al. *Fuel cell principles. In: Fuel cells fundamentals*. New York: John Wiley & Sons, 2006. p. 3-19.
- Anonymous. *Fuel cell. In: Fuel cell handbook*. Sixth edition. EG & G technical services, Inc. Science applications international corporation. 2002.
- Anonymous. *This week 50 years ago in New Scientist*, 28 April, 2007, p. 15.
- Søvnsen B. *Hydrogen and Fuel Cells Emerging Technologies and Applications*. London: Elsevier Academic Press, 2005.
- King JM, O'Day MJ. *Applying fuel cell experience to sustainable power products*. J of power sources 2000; 86: 16-22.
- Davies DP, Adcock PL, Turpin M, Rowen SJ. *Bipolar plate materials for solid polymer fuel cells*. J of Applied Electrochemistry 2000; 30(1): 101-5.
- Larminie J, Dicks A. *Fuel cell systems explained*, Wiley, West Sussex, UK, 2000.
- Wang Y. *Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membran Fuel Cells (PEMFC)*. A thesis presented to the University of Waterloo. Canada, 2006. Available at: <http://etd.uwaterloo.ca/etd/y74wang2006.pdf>
- US. Fuel Cell Council, *Fuel Cell Glossary*, 1999, August 19.
- Savado O, J. *New Mater. Electrochem. Syst.*, 1998; 1: 47.
- Bar-On I, Kirchain R, Roth R. *Technical cost of analysis for PEM fuel cells*. J of power source 2002; 109(1): 71-75.
- Ajersch MJ, Fowler MW. *Fuel cell science, engineering and technology*. 2003.
- Mehta V, Cooper JS. *Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing*. J of power sources 2003; 114: 32-53.
- Hermann A, Chaudhuria T, Spagnol P. *International journal of hydrogen energy* 2005; 30: 1297-1302.
- Busick D, Wilson M. In: Doughty DH, Nazar LF, Arakawa M, et al. *New materials for batteries and fuel cells*. Material research society symposium proceedings. Pennsylvania: Material research society, 2000. p. 247-51.
- Robberg K, Trapp V. In: Vielstich W, Gasteiger HA, Lamm A, editors. *Handbook of fuel cells-fundamentals, technology and applications*. Vol. 3. Fuel cell technology and applications. New York: Wiley and sons, 2003. p. 286-93.
- Kumar A, Reddy RG. *Fundamentals of advanced materials for energy conversion*. In: Chandra D, Bautista RG, editors. TMS: warrendale, 2002. p. 41.
- Hung Y, El-Khatib KM, Tawfik H. *Corrosion-resistant lightweight metallic bipolar plates for PEM fuel cells*. J of applied electrochemistry 2005; 35: 445-7.
- Hou Y, Zhang M, Rong M. *Improvement of conductive network quality in carbon black-filled polymer blends*. J of allp polym sci 2002; 84: 2768-75.
- Besmann TM, Klett JW, Burchellet TD. *Carbon/carbon composite bipolar plate for proton exchange membran fuel cell*. J of elec sod 2000; 147(11): 4083-6.
- Hornung R, Kappelt G. *Bipolar plate materials development using Fe-based alloys for solid polymer fuel cells*. J. Power Sources 1998; 72: 20.
- Davies DP, Adcock PL, Turpin M, et al. *Stainless steel as bipolar plate material for solid polymer fuel cells*. J. of Power Sources 2000; 86: 237.
- Makkus RC, Janssen AHH, de Bruijn FA, et al. *Use of stainless steel for cost competitive bipolar plates in the SPFC*. J. of Power Sources 2000; 86: 274.
- Wind J, LaCroix A, Braeuninger S, et al. In: Vielstich W, Gasteiger HA, Lamm A, editors. *Handbook of Fuel Cells—Fundamentals, Technology and Applications*, vol. 3: Fuel Cell Technology and Applications. Willey & sons: New York, 2003. p. 294 – 307.
- Baird DG, Huang JH, McGrath JE. *Plastic Engineering* 2003; 59 (12): 46-55.

- Woodman AS, Anderson EB, Jayne KD, et al. **Development of Corrosion Resistant Coatings for Fuel Cell Bipolar Plates**. American Electroplaters and Surface Finishers Society. AESF SUR/FIN '99 Proceedings. 1999.
- Lee S, Huang C, Chen Y, et al. *J. of Fuel Cell Science and Technology* 2005; 2: 291.
- Vasiliev VV, Morozov EV. **Advanced Mechanics of Composite Materials**. Amsterdam: Elsevier Ltd, 2007. p. 18.
- Surdia T, Saito S. **Pengetahuan Bahan Teknik Cet. ke-2**. Jakarta: Pradnya Paramita, 1992. h. 173–213.
- Callister WD. **Materials Science dan Engineering: An Introduction, 7th Edition**. New York: John Wiley & Sons, 2007. p. 504.
- US Fuel Cell Council. **Electrical conductivity testing protocols task force**. Draft guidelines, materials & components working group. 2003.
- Caulfield DF, et al. **Wood Thermoplastic Composites Handbook of Wood Chemistry and Wood Composite, Chap. 13. USA**: Taylor and Francis, 2005. p. 4–5.
- Ohring M. **The Materials Science of Thin Films**. San Diego: Academic Press, 1991. p. 439–43.
- Kim JK, Mai YW. **Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites**. Elsevier Science Ltd, 1998. p. 5–8.
- Matthew FL, Rawlings RD. **Composite Materials: Engineering and Science**. London: Chapman and Hall, 1994. p. 12–4.
- Jang BZ. **Advanced Polymer Composites**. USA: ASM International, 1994. p. 3 – 4.
- Hull D, Clyne TW. **An Introduction to Composite Materials 2nd Edition**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. p. 134–5.
- Muccio EE. **Plastics Processing Technology**. USA: ASM International, 1994. p. 37.
- Klyosov AA. **Wood Plastic Composites**. New York: John Willey & Sons, 2007. p.161–73.
- Crawford RJ. **Plastics Engineering, Third Edition**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998. p. 8–9.
- Heinzel A, et al. **Injection molded low cost bipolar plates for PEM fuel cells**. Available at: <http://www.zbt-duisburg.de/downloads/Grove2003-ZBT-Bipolar.pdf>. Cited on October 24th 2009.
- Wang Y. **Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)**. Thesis Master of Applied Science, Chemical Engineering University of Waterloo, Ontario Kanada, 2006. p. 1 – 4.
- Roiter Y, Minko S. **AFM Single Molecule Experiments at the Solid-Liquid Interface: In Situ Conformation of Adsorbed Flexible Polyelectrolyte Chains**. Journal of the American Chemical Society 2005; 127(45): 15688-15689
- Painter PC, Coleman MM. **Fundamentals of Polymer Science: an Introductory Text**. CRC Press 1997: 1.
- McCrum NG, Buckley CP, Bucknall CB. **Principles of Polymer Engineering**. Oxford University Press, 1997. p. 1.
- IUPAC** definition **IUPAC** Polymer
- Lenntech water treatment & air purification holding BV. Polypropylene. 2008. Available at: <http://www.lenntech.com>. Cited on: July 15th 2009.
- Kleinschmidt R et al. **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical** 2000; 157: 83–90
- Tripathi D. **Practical Guide to Polypropylene**. Shawbury: Rapra Technology Ltd, 2002. p. 9–10.
- Anonymous. **Polypropylene**. Available at: <http://www.pslc.ws/mactest/pp.htm>. Cited on October 26th 2009.
- Masaru I. **Polypropylene structure and toughness**. Polymer applications 2003; 52(10): 460-5.
- Song et al. **Polypropylene**. *Macromol. Symp* 2004; 213; 173-185
- Mercandelli P et al. **Polypropylene**. *Journal of Organometallic Chemistry* 2007; 692: 4784–4791
- "Researchers raise alarm after chemical leak found in common plastic"**. Available at: <http://www.theglobeandmail.com>. Retrieved on 2008-11-10.
- Anonymous. **Polypropylene**. Available at: <http://www.seratsource.com/f-tutor/olefin.htm> Rug serats
- USAF Flying Magazine. Safety. Nov. 2002** Available at: <http://www.wasteonline.org.uk/resources/InformationSheets/Plastics.htm>
- Zhao J, Cameron J. **Polypropylene matrix composites reinforced with pre-stressed glass serats**. Polymer composites 1998; 19: 218-24.
- Mukhopadhyay S, Deopura BL, Alagiruswamy R. **Interface behaviour in polypropylene composites**. Journal of Thermoplastic Composite Materials 2003; 16(6):479-95
- Malkapuram R, Kumar V, Negi YS. **Recent development in natural serat reinforced polypropylene composites**. Journal of Reinforced Plastics and Composites 2009;

- 28(10): 1169-1189.
- Zweifel H, Editor. *Plastics Additives Handbook 5th Edition*. Munich: Hanser Publishers, 2001. p. 4-6.
- Huang J, Baird DG, McGrath JE. *Development of fuel cell bipolar plates from graphite filled wet-lay thermoplastic composite materials*. J of power sources 2005; 150: 110-9
- Robberg K, Trapp V. In: Vielstich W, Gasteiger HA, Lamm A, editors. *Handbook of fuel cells-fundamentals, technology and applications*. Vol 3. Fuel cell technology and applications. New York: Wiley and sons, 2003. p. 308-14.
- Kuan H, Ma CM, Chen KH, et al. *Preparation, electrical, mechanical and thermal kandunganes of composite bipolar plate for a fuel cell*. J of power sources 2004; 134: 7-17.
- Mighri F, Huneault MA. *Electrically conductive thermoplastic blends for injection and compression molding of bipolar plates in the fuel cell application*. Polimer engineering and science 2004; 44(9): 1755-65.
- Wolf H, Willert-Porada M. *Electrically conductive LCP-carbon composite with low carbon content for bipolar plate application in polymer electrolyte membran fuel cell*. J of power sources 2006; 153: 41-6.
- Muccio EE. *Plastics Processing Technology*. USA: ASM International, 1994. p. 37.
- Anonymous. Carbons. Available at: <http://www.asbury.com/Carbons.html>. Cited on October 21st 2009.
- Anonymous. *Synthetic graphite*. Available at: <http://www.asbury.com/Synthetic-Graphite.html>. Cited on diakses October 22nd 2009.
- Scholta J, Rohland B, Trapp V. *Investigation on novel low-cost graphite composite bipolar plate*. J. of Power Source 1999; 84: 231-4.
- VerWeyst BE, Tucker CL, Foss PH, et al. *Fiber Orientation in 3-D Injection Molded Features: Prediction and Experiment*. Int. Polymer Pro 1999; 14: 409.
- Blunk RHJ, Tucker CL, Yeong-Eun Y, et al. *Fuel cell separator plate Having Controlled Serat Orientation and Method of Manufacture,*” U.S. Patent Application No. USSN 09/871, 189 (filed 2001)
- Song L, Xiao m, Li X, et al. *Short carbon fiber reinforced electrically conductive aromatic polydisulfide/expanded graphite nano-composite*. Materials Chemistry and Physics 2005; 93: 122–8.
- Chu KJ. *Polypropylene*. Eur Polym 1998; 34(¾): 577-580
- Clingerman ML, Weber EH, King JA, et al. *Development of an Additive Equation for Predicting the Electrical Conductivity of Carbon-Filled Composites*. J. of Appl. Polym. Sci 2003; 88: 2280- 99.
- Jing X, Zhao W, Lan L. J. Mater. Sci. Lett. 2000; 19: 377.
- Yi JY, Choi GM. J. Electroceram. 1999; 3: 361.
- Blunk RHJ, Lisi DJ. *Enhanced conductivity of fuel cell plate through controlled carbon Fiber orientation*. AICHE Journal 2003; 49: 1.
- Zou Y, Zhang J, He J, et al. *A Study of a composite bipolar plate for PEMFC*. New Carbon Materials 2004; 19: 303-307.
- Zhang J, Zou Y, He J. *Influence of graphite particle size and its shape on performance of carbon composite bipolar plate*. J of Zhejiang University science 2005; 6A(10): 1080-3.
- Cunningham N, Lefevre M. *Measuring the through-plane electrical resistivity of bipolar plates (apparatus and methods)*. J. of power sources 2005; 143: 93-102.
- Mishra V, Yang F, Pitchumani R. *Measurement and Prediction of Electrical Contact Resistance Between Gas Diffusion Layer and Bipolar Plate for Applications to PEM Fuel Cells*. J. of Fuel Cell Science and Technology 2004; Vol. 1 / 3.
- Lenel, Fritz. V, "Powder Metallurgy, Principles and Application", Metal Powder Industries Federation Pricenton, New Jersey, 1980 Borup, R.L., Vanderborgh, N.E., 1995. Design and testing criteria for bipolar plate materials for PEM fuel cell application. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 393:151-155.
- Anonymous. *Physical Properties & Homopolymer Grades*. Sheet Product list Tri Polyta Indonesia, tbk for Polypropylene Manufacturer. 2007.
- Scienzagiovene B. *The Photovoltaics Effect*. December 2006. Available at: <http://www.scienzagiovene.unibo.it>. Cited on November 3rd 2009.
- Anonymous. *Kubelka-Munk Function*. Available at: http://www.chemistry.nmsu.edu/studntres/chem45/Manuals/Cary_100. Cited on November 5th 2009.

Anonymous. *Functional Polymers Coupling*

Agent. Available at:

<http://www.specialchem.com/adhesion%20Promoters%20Center-Functional>

Polymers/coupling%20agent%20mechanism_file

s. Cited on November 5th 2009.