

Pengaruh Penambahan Grafit terhadap Sifat Tarik, Stabilitas Termal dan Konduktivitas Listrik Komposit Vinil Ester/Grafit sebagai Pelat Bipolar Membran Penukar Proton Sel Bahan Bakar (*PEMFC*)

Galang Wisnu Wardana dan Hosta Ardhyana

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: hostaa@mat-eng.its.ac.id

Abstrak—Sel bahan bakar merupakan sel elektrokimia yang mampu mengkonversi bahan bakar menjadi energi listrik. Lebih dari 80% dari volume, 70% dari total berat dan 60% biaya dalam fuel cell berupa pelat bipolar. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh grafit terhadap sifat, stabilitas termal dan konduktivitas listrik komposit vinil ester/grafit. Matriks yang digunakan adalah epoxy vinil ester (EVE) dan novolac vinil ester (NVE). Filler yang digunakan adalah grafit dengan kadar grafit 20 dan 40%. Bahan campuran dimatangkan dalam furnace pada temperatur 50, 100, 150, 200, 250oC selama dua jam. Pengujian yang dilakukan yaitu FT-IR, tarik, SEM, TGA dan konduktivitas listrik. Hasil pengujian menunjukkan penambahan grafit dapat menurunkan Modulus Young, sifat tarik dan elongasi. Kekuatan tarik tertinggi EVE adalah 16.6 MPa sedangkan NVE 10.7 MPa, sedangkan 40% 3.0 MPa untuk EVE dan 2.95 MPa untuk NVE. Stabilitas thermal meningkat dengan penambahan grafit, data 40% grafit menunjukkan berat sisa pada 800^o C senilai 47% untuk EVE maupun NVE. Penambahan grafit juga dapat menaikkan konduktivitas listrik. Data tertinggi diperoleh pada komposisi 40% grafit yaitu 1,1 S.Cm-1 untuk EVE dan 0.93 untuk NVE.

Kata Kunci—Vinil Ester, Grafit, Pelat Bipolar, PEMFC.

I. PENDAHULUAN

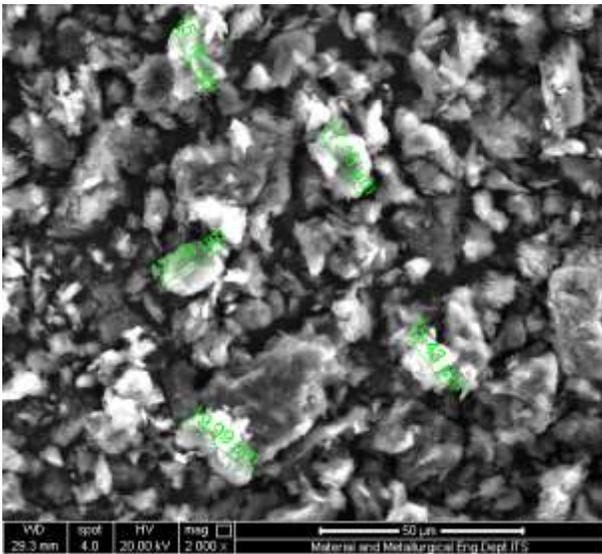
SEL bahan bakar merupakan suatu perangkat yang menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar untuk menghasilkan listrik, panas, dan air. Sel bahan bakar tidak perlu melakukan pembakaran sehingga tidak menghasilkan polusi udara yang dapat mencemari lingkungan [1]. Penggunaan sel bahan bakar ini juga diharapkan dapat meminimalisasi emisi yang dihasilkan sehingga dapat mencegah efek dari pemanasan global dan kelestarian bumi akan tetap terjaga [2].

Proton Exchange Membran *fuel cell* (PEMFC) merupakan jenis sel bahan bakar yang paling sederhana serta merupakan alternatif yang menjanjikan untuk sumber listrik. Sel bahan bakar membran penukar proton bebas emisi dan banyak memiliki keunggulan dibandingkan jenis yang lain diantaranya dapat beroperasi pada temperatur rendah yaitu

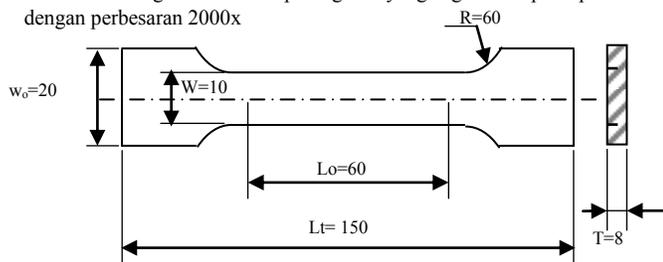
antara 60-800C, efisiensi tinggi, kerapatan daya tinggi, startup yang cepat, dan sistem ketahanan yang baik, pelat bipolar merupakan 80% dari total volume, 70% dari total berat, dan 60% dari total biaya produksi pada perangkat PEMFC [3,4].

Pelat bipolar harus mampu mendistribusikan hydrogen dan udara pada membran, mendukung pendinginan, mencegah pencampuran dari media luar dan menghantarkan arus antar sel elektrokimia [5]. Pelat bipolar pada umumnya terbuat dari grafit, logam maupun komposit. Logam yang sering digunakan adalah stainless steel terutama 316L. Stainless steel digunakan karena memiliki waktu penggunaan 6000 jam. Namun, logam lain juga pernah digunakan seperti Niobium-titanium-tungsten (Ni-Ti-W) dan Nickel-Chromium (Ni-Cr) relatif mahal namun tidak memiliki kelebihan yang signifikan. Selain Ni-Ti-W dan Ni-Cr, Aluminium pernah dicoba karena memiliki harga yang murah namun tidak tahan terhadap korosi. Pelapisan pada logam sering digunakan untuk menghambat laju korosi namun setelah dicoba pelapisan tidak cukup signifikan untuk menghambat laju korosi dan pada akhirnya menambah biaya produksi [6]. Pada aplikasinya, Grafit murni memiliki konduktivitas listrik yang baik tetapi rapuh, sedangkan logam memiliki sifat mekanik dan konduktivitas listrik yang baik tetapi tidak tahan korosi [7].

Bipolar merupakan bagian yang penting namun problematis terutama pada masalah biaya produksi pelat [8]. Karena pentingnya komponen pelat bipolar dan mahalnya biaya produksi, maka dituntut adanya inovasi untuk bahan pelat bipolar yang lebih ringan dan murah tetapi tetap memiliki sifat mekanik, konduktivitas listrik yang baik serta ketahanan terhadap korosi tinggi. Penelitian sebelumnya yang telah dilakukan menunjukkan bahwa penambahan grafit berbanding lurus dengan meningkatnya konduktivitas listrik, tetapi dapat menurunkan sifat mekanik. Oleh karena itu pada penelitian ini digunakan komposit vinil ester/grafit sebagai bahan utama pembuat pelat bipolar, Komposit yang digunakan berupa polimer vinil ester sebagai matriks serta grafit sebagai bahan penguat. Selanjutnya variasi rasio pencampuran diberikan untuk mendapatkan pelat bipolar dengan sifat optimum.



Gambar.1. Pengamatan SEM pada grafit yang digunakan pada penelitian ini dengan perbesaran 2000x



Gambar. 2. Dimensi spesimen uji tarik

II. EKSPERIMEN

Resin Epoxy Vinil Ester (EVE) dan Novolac Vinil Ester (NVE) sebagai matriks diproduksi oleh PT Justus Kimia Raya dan sebagai penguat digunakan grafit yang diproduksi CV. Multi Grafit berukuran ± 18µm dengan % berat 20 dan 40%.

Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini meliputi uji FT-IR, Uji Tarik, SEM, TGA dan Konduktivitas listrik. Pengujian tarik dilakukan dengan kecepatan tarik 1mm/min sesuai standar ASTM D638M.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

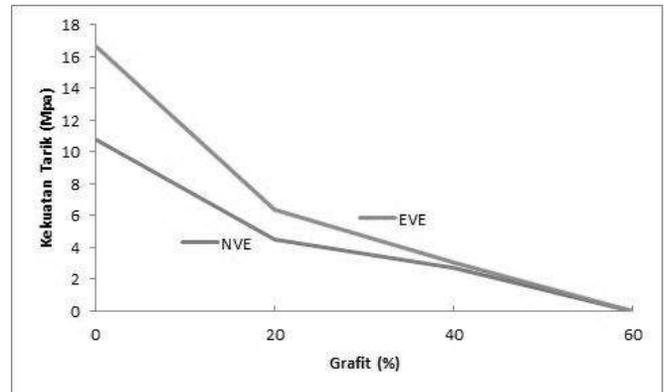
A. Sifat Tarik Komposit

Pengujian tarik dilakukan dengan tujuan mengetahui sifat mekanik pada komposit Vinil Ester/Grafit. Pengujian tarik dilakukan sesuai dengan standart ASTM D638M. Sebelum dilakukan sampel pengujian tarik di preparasi terlebih dahulu hingga permukaan rata, hal tersebut dilakukan dengan tujuan tidak ada konsentrasi tegangan ketika proses uji tarik.

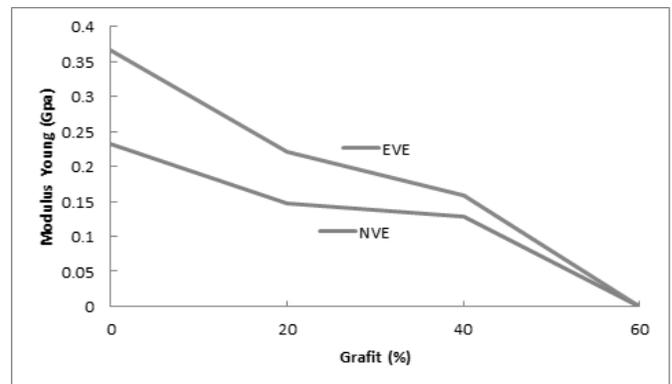
Gambar 3 menunjukkan kekuatan tarik menurun terhadap penambahan grafit, hal ini disebabkan arah orientasi yang tidak teratur dari filler. Interaksi dari filler dan matrik yang tidak sempurna, kurang sempurna pendispersian dari filler, meningkatkan gelembung diikuti dengan penambahan filler [9]. Kekuatan tarik terendah ditunjukkan pada komposit 40% grafit dengan nilai 3.04 MPa untuk EVE dan 2.95 MPa. Gambar 4 menunjukkan penurunan Modulus Young akibat

Tabel.2.

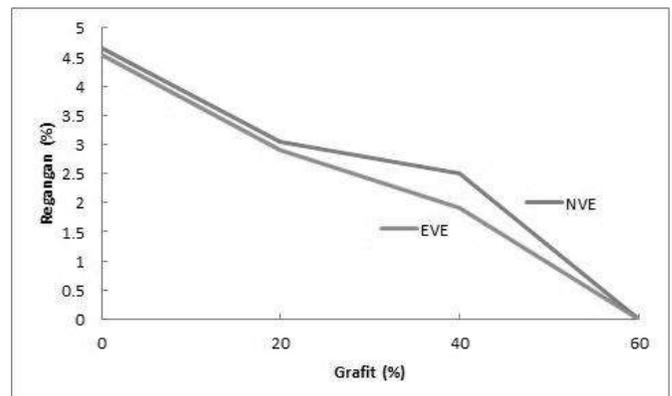
Properti tarik komposit grafit 20% Epoksi			
Kode sampel	Elongation (%)	Kekuatan Tarik (MPa)	Modulus Young (GPa)
EVE	4.54	16.63	0.37
EVE/Grafit (20)	2.89	6.40	0.22
EVE/Grafit (40)	1.92	3.04	0.16
NVE	4.65	10.77	0.23
NVE/Grafit (20)	3.04	4.14	0.15
NVE/Grafit (40)	2.51	2.95	0.13



Gambar.3. Pengaruh penambahan grafit terhadap kekuatan tarik



Gambar.4. Pengaruh penambahan grafit terhadap Modulus Young



Gambar.5. Pengaruh penambahan grafit terhadap Elongasi

penambahan grafit, hal yang sama dengan penurunan kekuatan tarik berlaku juga pada penurunan modulus young. Gambar 5 menunjukkan pengaruh penambahan grafit terhadap elongasi dari komposit, hal tersebut disebabkan sifat grafit yang lebih getas.

B. Sifat Konduktivitas Listrik Komposit

Fungsi utama dari pelat bipolar adalah menghubungkan anoda dari satu sel ke katoda sel yang lain, karena itu sifat konduktivitas listrik menjadi poin penting yang harus dimiliki oleh pelat bipolar.

Pengujian Konduktivitas Listrik ini menggunakan metode four point probe dengan adaptor sebesar 16.2 volt.

$$\rho = \frac{RA}{l} \tag{1}$$

$$\Omega = \frac{1}{\rho} \tag{2}$$

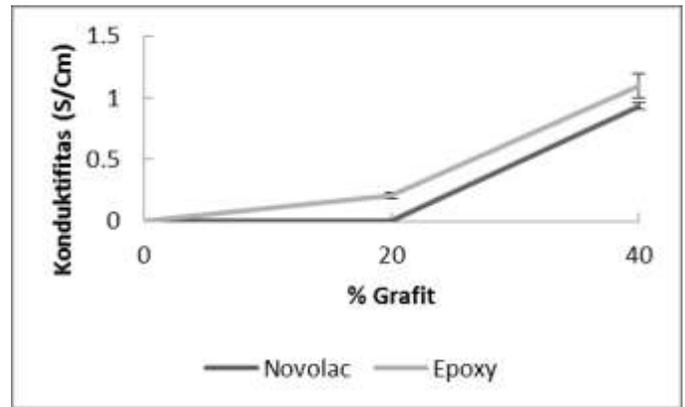
ρ merupakan perhitungan resistivitas, R adalah tahanan listrik dalam Ω hasil pengukuran, A luas penampang dalam mm² hasil pengukuran, l panjang jarak arus mengalir dalam mm dan Ω merupakan konduktivitas listrik ($\Omega.cm^{-1}$). Pengukuran diawali secara kualitatif dengan cara menghubungkan sampel komposit terhadap aliran listrik yang dilengkapi dengan lampu pijar, ketika lampu pijar menyala maka hal ini menunjukkan sampel komposit tersebut mampu menghantarkan daya elektrik.

Gambar 6 menunjukkan pengaruh penambahan grafit terhadap konduktivitas listrik. Konduktivitas listrik bertambah seiring dengan bertambahnya grafit. Nilai tertinggi ditunjukkan pada komposit dengan 40% grafit senilai 1.1 S.cm⁻¹ untuk EVE dan 0,93 S.cm⁻¹ untuk NVE. Dari hasil pengukuran, EVE memiliki nilai konduktivitas lebih tinggi. Hal tersebut dikarenakan jumlah cincin aromatic yang terdapat pada EVE lebih banyak dibandingkan NVE. Cincin aromatic merupakan salah satu struktur polimer yang bersifat konduktif [10].

Nilai konduktivitas listrik bergantung pada fraksi volume serbuk, dan kandungan minimum dari serbuk grafit, dimana serbuk grafit tersebut membentuk jaringan kerja yang bersambung, yang menentukan komposit grafit menjadi konduktif secara elektrik. Faktor-faktor penentu adalah: konduktivitas dari serbuk, fraksi volume dan karakteristik serbuk, seperti: ukuran, bentuk, luas permukaan, distribusi dan orientasi dari serbuk pengisi. Konduktivitas listrik ditentukan antara matrik dan filler. Metode fabrikasi dan kondisi pembuatan komposit memainkan peranan penting dalam konduktivitas karena mempengaruhi penyebaran, orientasi dan jarak antar serbuk di dalam matriks polimer. Parameter proses, seperti temperatur, tekanan, waktu *curing*, adalah faktor kritis terhadap keberhasilan pembuatan interkoneksi mekanik dan elektrik. Sambungan adesif konduktif bisa gagal. Karena tegangan termal yang disebabkan oleh ketidaksesuaian koefisien muai panas antara matriks dan serbuk selama siklus karakteristik komposit [11].

C. Sifat Konduktivitas Thermal Komposit

Pengujian *Thermogravimetric Analysis* (TGA) menggunakan alat *Mettler Toledo* di Laboratorium Karakterisasi Material Jurusan teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS. TGA adalah



Gambar.6. Pengaruh penambahan grafit terhadap Konduktivitas Listrik

Tabel 3. Hasil Pengujian TGA komposit Grafit/Epoksi

Sample	T (°C) 5% Loss	T (°C) 10% Loss	Berat Sisa (%wt)
Grafit	900	900	107
EVE	338	352	5
EVE/Grafit (20)	346	358	33
EVE/Grafit (40)	338	360	47
NVE	288	318	6
NVE/Grafit (20)	292	319	37
NVE/Grafit (40)	314	338	47

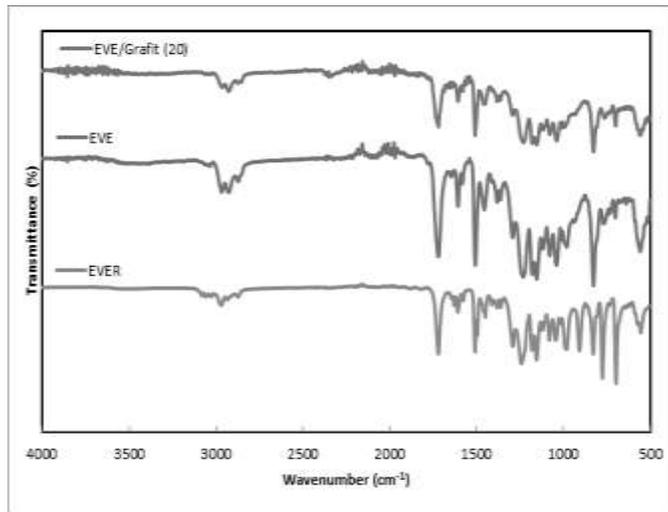
untuk mengetahui sifat termal bahan terhadap perubahan panas yang berkaitan dengan perubahan temperatur pemanasan. Dilakukan pada temperatur 40 °C sampai 800 °C. Tabel 3 menunjukkan pengurangan berat 5% EVE terjadi pada temperatur 338°C dan pada NVE terjadi pada temperatur 288°C. Berat sisa pada temperatur 800°C adalah 5% untuk EVE dan 6% untuk NVE. Grafit beraksi dengan lingkungan sehingga berat grafit ketika dipanaskan sampai temperatur 800°C bertambah menjadi 107% dari berat semula, hal ini menunjukkan grafit memiliki stabilitas thermal yang sangat baik.

Pada pengujian TGA komposit EVE/Grafit (20) pengurangan berat 5% terjadi pada temperatur 348^o C dan berat sisa sebesar 33%, sedangkan NVE/Grafit pengurangan berat 5% terjadi pada temperatur 292^oC dan berat sisa sebesar 37%. Hal ini menunjukkan penambahan serbuk grafit pada Komposit dapat meningkatkan stabilitas termal. Tabel 3 menunjukkan berat sisa yang didapatkan setelah pemanasan 800^oC, dimana pada tanpa penambahan grafit berat sisa 5% untuk EVE dan 6% untuk NVE, setelah ditambahkan serbuk grafit berat sisa bertambah menjadi 33% untuk EVE dan 37% untuk NVE.

Berdasarkan data yang didapatkan dari hasil TGA, matriks menunjukkan stabilitas *thermal* yang baik, meskipun sifat komposit sering kali didominasi oleh sifat penguat, tetapi beberapa sifat. Seperti konduktivitas thermal, konduktivitas listrik, densitas dan porositas dapat dipengaruhi oleh matriks atau proses pembentukan matriks. Sehingga sifat utama komposit bahan matriks dan prosesnya tidak dapat diabaikan [11].

D. Pengujian FT-IR Komposit Grafit/Epoksi

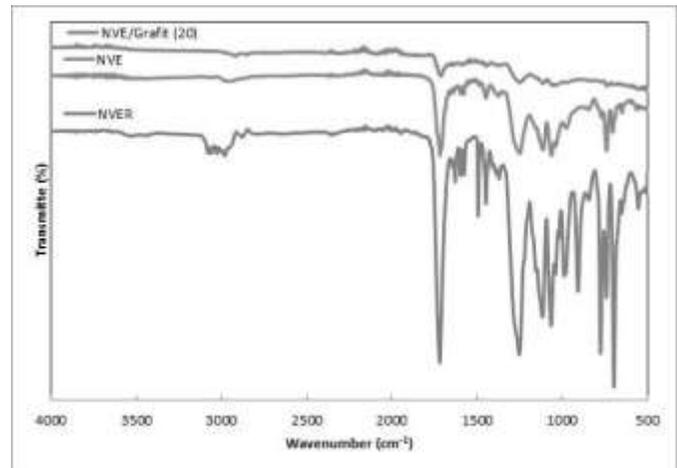
Pengujian *Fourier transform Infrared Spectroscopy* (FT-IR) menggunakan alat *Thermo Scientific* di Laboratorium



Gambar. 7. Grafik pengujian FT-IR EVE Resin (EVER), EVE , EVE/Grafit (20)

Karakterisasi Material Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS dengan sampel berbentuk padatan. Pada penelitian ini, pengujian FT-IR digunakan untuk mengetahui gugus fungsi dari vinil ester dan grafit sebelum dicampurkan dan setelah menjadi komposit grafit. Grafik hasil pengujian FTIR menghasilkan puncak grafik yang berada pada range 500-4000.

Gambar 7. Menunjukkan hasil pengujian FT-IR untuk Epoxy Vinil Ester Resin didapatkan vibrasi pada panjang gelombang 826 cm^{-1} yang merupakan puncak dari para disubstituted aromatic dan sekaligus puncak C=C dari ikatan polystyrene. Vibrasi juga terjadi pada panjang gelombang yang merupakan puncak 907 cm^{-1} C=C dari vinil ester [12]. Pengujian FTIR Epoxy Vinil Ester yang sudah dimatangkan didapatkan bahwa puncak pada panjang gelombang 907 cm^{-1} hilang. Puncak tersebut hilang karena terjadi pemutusan rantai pada C=C vinil etser dan menyatu pada C=C styrene. Penyerapan vibrasi pada panjang gelombang 1506 cm^{-1} yang merupakan daerah puncak dari aromatic hidrokarbon C_6H_6 . Komposit Epoxy Vinil Ester/Grafit juga memiliki puncak aromatic hidrokarbon pada 1507 cm^{-1} . Kemudian Epoxy Vinil Ester terdapat juga penyerapan vibrasi pada panjang gelombang 826 cm^{-1} yang menerangkan bahwa bentuk cincin aromatic dari Epoxy Vinil Ester adalah *para disubstituted aromatic* bentuk cincin tersebut merupakan ciri khas dari Epoxy Vinil Ester. Komposit Epoxy Vinil Ester/Grafit juga menyerap vibrasi pada panjang gelombang 826 cm^{-1} . Selain itu penyerapan vibrasi pada Epoxy Vinil Ester juga terjadi pada 1153 cm^{-1} yang merupakan range dari puncak ikatan C-O dalam bentuk phenil atau acyl. Komposit Epoxy Vinil Ester/Grafit juga menyerap vibrasi pada 1153 cm^{-1} . Terdapat penyerapan vibrasi Epoxy Vinil Ester pada panjang gelombang 1077 cm^{-1} yang merupakan range dari ikatan C-O dengan bentuk alkoxy. Komposit Epoxy Vinil Ester/Grafit juga menyerap vibrasi pada panjang gelombang 1077 cm^{-1} . Kemudian terjadi penyerapan vibrasi lagi pada Epoxy Vinil Ester untuk pada panjang gelombang 1719 cm^{-1} yang merupakan range dari ikatan C=O dalam bentuk ikatan acid. Komposit Epoxy Vinil Ester/Grafit juga menyerap vibrasi pada panjang gelombang 1718 cm^{-1} .

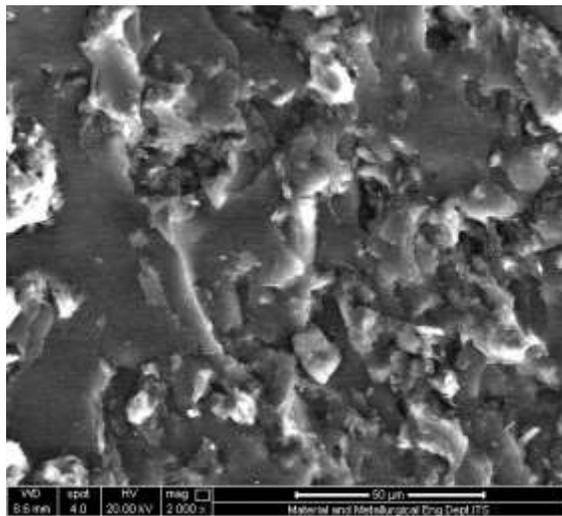


Gambar.8 . Grafik pengujian FT-IR EVE Resin (EVER), EVE , EVE/Grafit (20)

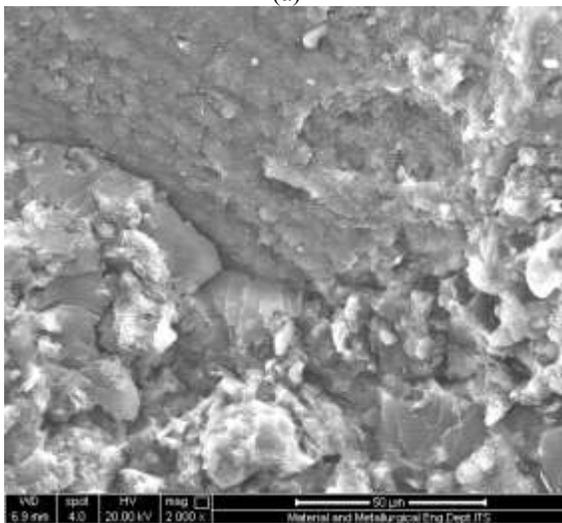
Gambar 8. menunjukkan hasil pengujian FT-IR untuk Novolac Vinil Ester Resin didapatkan vibrasi pada panjang gelombang 740 cm^{-1} yang merupakan puncak yang menunjukkan ikatan aromatic dengan bentuk *meta disubstituted aromatic*. Vibrasi pada panjang gelombang 840 cm^{-1} merupakan puncak C=C dari ikatan polystyrene. Vibrasi juga terjadi pada panjang gelombang yang merupakan puncak 907 cm^{-1} C=C dari vinil ester [12]. Pengujian FTIR Novolac Vinil Ester yang sudah dimatangkan didapatkan bahwa puncak pada panjang gelombang 907 cm^{-1} hilang. Puncak tersebut hilang karena terjadi pemutusan rantai pada C=C vinil etser dan menyatu pada C=C styrene. Penyerapan vibrasi pada panjang gelombang 1598 cm^{-1} yang merupakan daerah puncak dari aromatic hidrokarbon C_6H_6 . Komposit Novolac Vinil Ester/Grafit juga memiliki puncak aromatic hidrokarbon pada 1598 cm^{-1} . Kemudian Novolac Vinil Ester terdapat juga penyerapan vibrasi pada panjang gelombang 704 cm^{-1} yang menerangkan bahwa bentuk cincin aromatic dari Novolac Vinil Ester adalah Meta Disubstituted Aromatic bentuk cincin tersebut merupakan ciri khas dari Novolac Vinil Ester. Komposit Novolac Vinil Ester/Grafit juga yang menyerap vibrasi pada panjang gelombang 701 cm^{-1} . Selain itu penyerapan vibrasi pada Novolac Vinil Ester juga terjadi pada 1113 cm^{-1} yang merupakan range dari puncak ikatan C-O dalam bentuk phenil atau acyl. Komposit Novolac Vinil Ester/Grafit juga terjadi penyerapan vibrasi pada 1111 cm^{-1} . Kemudian penyerapan vibrasi Novolac Vinil Ester pada panjang gelombang 2950 cm^{-1} yang merupakan range dari ikatan O-H acid. Komposit Novolac Vinil Ester/Grafit juga menyerap vibrasi pada panjang gelombang 2922 cm^{-1} . Kemudian terjadi penyerapan vibrasi lagi pada Novolac Vinil Ester untuk pada panjang gelombang 1718 cm^{-1} yang merupakan range dari ikatan C=O dalam bentuk ikatan acid. Komposit Novolac Vinil Ester/Grafit yang menyerap vibrasi pada panjang gelombang 1713 cm^{-1} .

E. Pengamatan SEM Komposit Grafit/Epoksi

Pengamatan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menggunakan alat FEI INSPECT S50 dengan tegangan 20.000 kV di Laboratorium Karakterisasi Material Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS. Pada Gambar 9a dan 9b terlihat bahwa persebaran grafit pada komposit NVE/Grafit



(a)



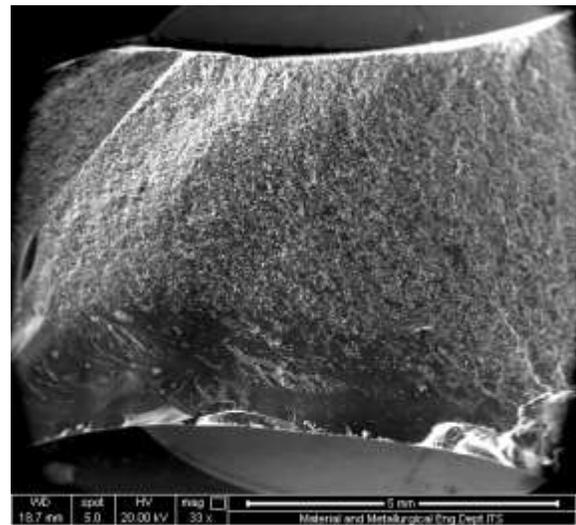
(b)

Gambar.9. Hasil pengamatan SEM NVE/Grafit (a) 20% Grafit, (b) 40% Grafit

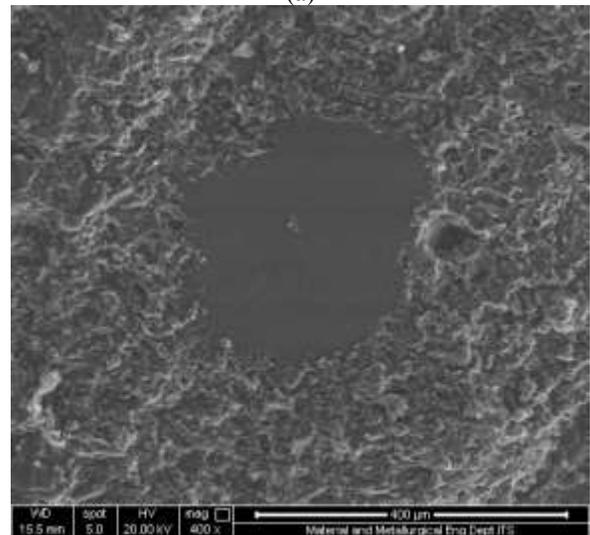
homogen namun terlihat banyaknya rongga yang disebabkan interaksi antara matrik dan filler yang kurang sempurna.

Pada Gambar 10a dan 10b terlihat bahwa persebaran grafit pada komposit EVE/Grafit tidak homogen namun terlihat penumpukan grafit pada bagian tertentu pada komposit sehingga distribusi beban yang diterima komposit juga tidak homogeny.

Teknik yang disarankan untuk meningkatkan ikatan *interlocking* mekanik dengan cara menutup atau mengisi rongga-rongga pori dalam komposit dengan cara meningkatkan kekasaran permukaan butiran serbuk, meningkatkan rongga permukaan butiran serbuk, sehingga dapat menyerap matriks. Teknik ini akan meningkatkan sifat mekanik secara keseluruhan komposit grafit [10].



(a)



(b)

Gambar.10. Hasil pengamatan SEM EVE/Grafit (a) 20% Grafit, (b) 40% Grafit

IV. KESIMPULAN

Penambahan grafit pada komposit meningkatkan nilai konduktifitas. Data tertinggi diperoleh pada komposit yaitu 1,1 S/cm untuk Epoxy Vinil Ester/Grafit (40) dan 0,93 untuk Novolac Vinil Ester Resin/Grafit S/cm.

Penambahan karbon juga meningkatkan stabilitas thermal dari komposit. Data pada 40% grafit menunjukkan berat sisa pada 800°C senilai 47% untuk komposit Epoxy Vinil Ester/Grafit dan 47% untuk komposit Novolac Vinil Ester/Grafit

Penambahan grafit pada komposit menurunkan sifat tarik dari komposit data tertinggi diperoleh pada komposisi 0% grafit dengan nilai 16.6 MPa untuk Epoxy Vinil Ester dan pada komposisi 0% grafit dengan nilai 10.7 MPa untuk Novolac Vinil Ester

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Suddhasatwa Basu, *Fuel Cell Science and Technology*. Springer : New York (2007)
- [2] Prihandoko, B. Yunita Sadeli, Desto wahyu Novianto *Pengaruh Tekanan Hot Press terhadap Karakter Pelat Bipolar PEMFC*. Pusat Penelitian Fisika LIPI: Tangerang Vol.27(2010)
- [3] H.S. Lee, H.J. Kim, S.G. Kim, S.H. Ahn. *Evaluation of graphite composite bipolar plate for PEM (proton exchange membrane) fuel cell Electrical, mechanical, and molding properties*. Seoul National University : South Korea Vol. 187–188 425–428 (2007)
- [4] S.R. Dhakate, R.B. Mathur, B.K. Kakati, T.L. Dhani. *Properties Of Graphite-Composite Bipolar Plate Prepared By Compression Molding Technique For PEM Fuel Cell*. Tezpur University: India Vol.32 4537 – 4543 (2008)
- [5] P. Dietrich, F. Büchi, A. Tsukada, M. Bärtschi, R. Kötz, G. G. Scherer, P. Rodatz, O. Garcia, M. Ruge, M. Wollenberg, P. Lück, A. Wiartalla, C. Schönfelder, A. Schneuwly and P. Barrade. *Hy.Power—A technology platform combining a fuel cell system and a supercapacitor* (2003)
- [6] Paul Greenwood†, Robert H Thring, Rui Chen. *Polyethylene-carbon material for polymer electrolyte membrane fuel cell bipolar plate*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 222.L3 197-208 (2008)
- [7] Renato Altobelli Antunes, Mara Cristina Lopes de Oliveira, Gerhard Ett. *Investigation on the corrosion resistance of carbon black graphite-poly(vinylidene fluoride) composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells*. Federal. University of ABC (UFABC), Santo Andre': Brazil Vol.6 12474-12485 (2011)
- [8] Xiao-Zi Yuan, Wang, Haijiang. *PEM Fuel Cell Failure Mode Analysis*. (2012)
- [9] Jun Xu, John P. Donohoe, Charles U. Pittman Jr. *Preparation, electrical and mechanical properties of vapor grown carbon fiber (VGCF)/vinyl ester composites*. Composite part A 35 693-701 (2004)
- [10] Dai, Liming, *Intelligent Macromolecules for Smart Devices* (2004)
- [11] Kyriaki Kalaitzidou, Hiroyuki Fukushima, Lawrence T. Drza. *A Route for Polymer Nanocomposites with Engineered Electrical Conductivity and Percolation Threshold*. Materials.3. 1089-1103 (2007)
- [12] Hui Lui, Judy. S. Riffle, Chair, James. E. McGrath, Garth. L. Wilkes, Allen. R. Shultz, Harry W. Gibson. *Synthesis, Characterization and Properties of Vinyl Ester Matrix Resins*. Dissertation Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University (1998)