

# Pengaruh Penambahan Karbon terhadap Sifat Mekanik dan Konduktivitas Listrik Komposit Karbon/Epoksi sebagai Pelat Bipolar Polimer Elektrolit Membran Sel Bahan Bakar (*Polymer Exchange Membran (PEMFC)*)

Ara Gradiniar Rizkyta dan Hosta Ardhyanta

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

*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 70% dari total berat dan 60% biaya dalam fuel cell berupa pelat bipolar. Maka dibutuhkan pemilihan bahan yang sesuai untuk mereduksi berat, volume dan biaya pada sel bahan bakar. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh karbon terhadap sifat mekanik dan konduktivitas listrik komposit karbon/epoksi. Matriks yang digunakan adalah epoksi dengan hardener poliamino amid dengan rasio pencampuran 20 dan 80% poliamino amid. Filler yang digunakan adalah karbon dengan kadar karbon 20, 40, 60 dan 80%. Bahan campuran dimatangkan dalam furnace pada temperatur 50, 100, 150, 200, 240°C selama satu jam. Pengujian yang dilakukan yaitu FT-IR, tarik, SEM, TGA dan konduktivitas listrik. Hasil pengujian menunjukkan penambahan karbon dapat meningkatkan Modulus Young tetapi menurunkan sifat tarik dan elongasi. Kekuatan tarik epoksi tertinggi adalah 61 MPa, sedangkan pada 20% karbon 18,9 MPa. Stabilitas thermal meningkat dengan penambahan karbon, data 60% karbon menunjukkan berat sisa pada 800° C senilai 63%. Penambahan karbon juga dapat menaikkan konduktivitas listrik. Data tertinggi diperoleh pada komposisi 80% karbon yaitu 424,8 S.Cm<sup>-1</sup>.

**Kata Kunci**—epoksi, karbon, pelat bipolar, PEMFC, Poli(amino amid).

## I. PENDAHULUAN

SEL bahan bakar merupakan suatu perangkat yang menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar untuk menghasilkan elektron, proton, panas, dan air. Dapat digunakan untuk aplikasi pada perumahan, mobil dan automotif karena dapat mengurangi efisiensi energi sebanyak 40 %, sedikit polusi dan sedikit kebisingan [1]. Sel bahan bakar juga dapat digunakan sebagai pembangkit listrik skala besar maupun skala kecil. Serta merupakan solusi yang tengah dikembangkan sebagai energi alternatif pengganti sumber energi fosil yang semakin menipis cadangannya. 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].

Polimer Membran Elektrolit *fuel cell* (PEMFC) karena merupakan jenis sel bahan bakar yang paling sederhana serta merupakan kandidat yang menjanjikan sebagai nol-emisi sumber listrik karena bekerja pada temperatur operasi yang rendah yaitu antara 60-80 °C, efisiensi tinggi, kerapatan daya tinggi, startup yang cepat, dan sistem ketahanan yang baik. Pelat bipolar adalah komponen penting dari PEMFC, Pelat bipolar merupakan 80% dari total volume, 70% dari total berat, dan 60% dari total biaya produksi pada perangkat PEMFC [3]. Fungsi dari pelat bipolar adalah sebagai jalur udara, air, dan bahan bakar, sebagai pembatas antara masing – masing unit sel, untuk mengalirkan elektron ke seluruh sirkuit. Serta sebagai penguat mekanis dan penahan membran tipis dan elektroda. Umumnya, pelat ini terbuat dari grafit, logam (titanium, stainless steel, dan nikel), atau dapat juga dibuat dari komposit. Grafit murni memiliki konduktivitas listrik yang baik tetapi rapuh, sedangkan logam memiliki sifat mekanik dan konduktivitas listrik yang baik tetapi tidak tahan korosi [4].

Penelitian sebelumnya yang telah dilakukan menunjukkan Penggunaan grafit sebagai pengisi pada polimer matrik komposit dirasa kurang optimal. Penambahan karbon hitam (*carbon black*), karbon fiber, ataupun *carbon nanotubes* pada komposit polistiren grafit dilakukan oleh beberapa peneliti. Hal ini dilakukan agar tidak ada ruang kosong antara partikel grafit yang satu dengan yang lainnya, sehingga material lain yang ditambahkan masuk dalam rongga kosong antara partikel grafit, hal ini meningkatkan konduktivitas listrik pada pelat bipolar karena jalannya elektron tidak terputus. Grafit pada komposit berfungsi sebagai penguat dan memperkecil gesekan serta meningkatkan ketahanan aus. Grafit juga berfungsi sebagai pelumasan (*self lubricating*). Material dengan kandungan grafit di bawah 0,3 % dikategorikan sebagai grafit berkandungan rendah. Sedangkan pada grafit menengah kadar grafit berkisar antara 0,5 -1,8%. Grafit berkandungan tinggi dengan kadar antara 3-5%. Penambahan karbon pada komposit dapat menurunkan sifat mekanik sifat karbon yang getas. Oleh karena itu pada penelitian ini digunakan komposit Karbon/Epoksi sebagai bahan utama pembuat pelat bipolar serta penambahan poli(amino amid) sebagai hardener. yang berfungsi untuk menambah keuletan pada bahan komposit.

Dikarenakan poli(amino amid) merupakan suatu bahan yang mempunyai sifat fleksibilitas yang tinggi Pemanfaatan pelat bipolar jenis ini berpotensi mereduksi biaya produksi PEMFC hingga senilai 15-29%, Komposit yang digunakan berupa polimer epoksi sebagai matriks serta karbon sebagai bahan penguat. Variasi rasio pencampuran diberikan untuk mendapatkan pelat bipolar dengan sifat optimum.

II. METODE PENELITIAN

Resin Epoksi sebagai matriks dan poli(amino amid) digunakan sebagai hardener diperoleh dari PT Justus Kimia Raya. Komposisi yang digunakan adalah 20 dan 80% poli(amino amid). karbon DESULCO 9010 digunakan sebagai Penguat berukuran ± 330µm (Gambar 1) dengan properti seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Bahan matriks epoksi dicampurkan dengan poli(amino amid) dengan % berat 20 dan 80% poli(amino amid). Kemudian dicampurkan dengan karbon yang telah disaring berukuran 40 mesh dengan % berat 0, 20, 40, 60 dan 80% karbon. Selanjutnya, sampel yang dipanaskan dalam furnace dengan temperatur 50, 100, 150, 200 dan 240°C masing-masing selama 1 jam. Sampel yang telah dipanaskan lalu di grinding sampai grade 500 untuk mendapatkan permukaan yang lebih rata sehingga memudahkan proses pengujian. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini meliputi uji FT-IR, Uji Tarik, SEM, TGA dan Konduktivitas listrik.

Pengujian *Fourier transform Infrared Spectroscopy* (FT-IR) menggunakan alat *Thermo Scientific* di Laboratorium 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 epoksi dan karbon sebelum dicampurkan dan setelah menjadi komposit karbon. Grafik hasil pengujian FTIR menghasilkan puncak grafik yang berada pada range 500-4000.

Pengujian tarik dilakukan dengan kecepatan tarik 1mm/min sesuai standar ASTM D638M, dimensi spesimenditunjukkan pada gambar 2.. Pengujian tarik menggunakan alat Instron UTM di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS. Bertujuan untuk mengetahui sifat mekanik pada komposit serta mengetahui pengaruh penambahan poliamino amid dan serbuk karbon terhadap properti tarik komposit karbon/epoksi. Pengujian ini dilakukan tiga kali pengulangan pada tiap komposisi sampel.

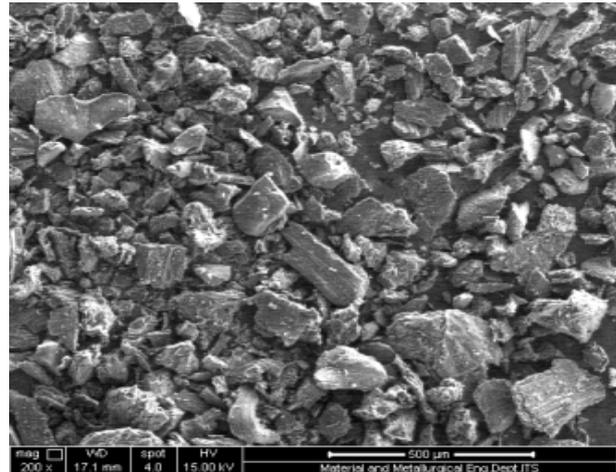
Perhitungan kekuatan tarik, elongasi dan Modulus Young sesuai dengan persamaan di bawah ini:

$$\sigma_{ultimate} = \frac{P_{ultimate}}{A} \tag{1}$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{2}$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \text{ (pada daerah elastis)} \tag{3}$$

dimana P adalah beban yang diberikan pada spesimen, A adalah luas penampang spesimen, ΔL adalah pertambahan panjang (mm) dan L<sub>0</sub> adalah panjang awal spesimen.



Gambar.1. Morfologi karbon dengan perbesaran 200x

Tabel 1.

Properti karbon DESULCO 9010

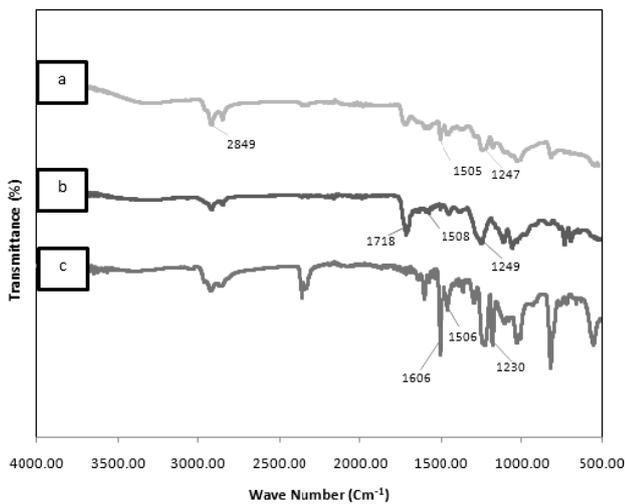
Chemical Properties	Spesification	Typical analysis
Carbon	99.7 % minimum	99.87 %
Sulfur	0.03% maximum	0.009 %
Ash	0.30% maximum	0.13 %
Moisture	0.20% maximum	Trace
Particle size	Min 95% > 0.2 mm Max 5% > 4.75 mm	See below
Nitrogen	180 ppm max	29 ppm
Hydrogen	120 ppm max	2 ppm
Oxygen	720 ppm max	40 ppm
Typical values		
Crystallinity	N/A	82-89 %

Pengamatan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menggunakan alat FEI INSPECT S50 dengan tegangan 10.000 kV di Laboratorium Karakterisasi Material Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS. Sampel yang diuji adalah sampel hasil pengujian tarik. Pengujian *Thermogravimetric Analysis* (TGA) menggunakan alat *Mettler Toledo* dengan *heating rate* 10°/menit di Laboratorium Karakterisasi Material Jurusan teknik Material dan Metalurgi dengan sampel berupa padatan bermassa 20 gram.. TGA bertujuan untuk mengetahui sifat berat bahan terhadap perubahan panas yang berkaitan dengan perubahan temperatur pemanasan. Dilakukan pada temperatur 40 °C sampai 800 °C. Pengujian Konduktivitas Listrik ini menggunakan metode four power probe dengan menggunakan alat multi meter DT830D dan adaptor sebesar 12 volt. Dimensi pengujian 12,7 x 127 mm dengan tebal 3 mm. Perhitungan konduktivitas listrik sesuai dengan persamaan:

$$\rho = \frac{RA}{l} \tag{4}$$

$$\Omega = \frac{1}{\rho} \tag{5}$$

ρ merupakan perhitungan resistivitas, R adalah tahanan listrik dalam Ω hasil pengukuran, A luas penampang dalam mm<sup>2</sup> hasil pengukuran, l panjang jarak arus mengalir dalam mm Dan Ω merupakan konduktivitas listrik (Ω.cm<sup>-1</sup>). Pengukuran diawali secara kualitatif dengan cara menghubungkan sampel dengan aliran listrik yang dilengkapi dengan lampu pijar, ketika lampu pijar menyala maka hal ini menunjukkan sampel komposit tersebut mampu menghantarkan daya elektrik.



Gambar.3. Spektrum infrared (a) Komposit 60% Karbon (b) Komposit 20% Epoksi (c) Komposit 80% Epoksi

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Spektrum FTIR Komposit Karbon/Epoksi

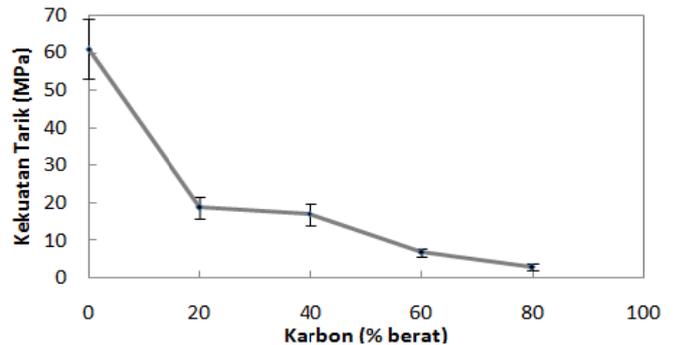
Gambar 3 menunjukkan grafik hasil pengujian FTIR komposit karbon/epoksi. Gambar 3 menunjukkan terdapat penyerapan vibrasi pada area lekukan 1230 yang merupakan aromatic eter C-O-C dari gugus epoksi. Selain itu penyerapan vibrasi juga terdapat pada 1506 yang merupakan aromatic hidrokarbon dari epoksi C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>. Terlihat juga adanya perpaduan antara rantai epoksi C-O-C dengan rantai poliamino amid N-H karena terdapat daerah serapan pada 1606. Pada hasil FTIR Epoksi/PAA (80%) daerah serapan terjadi pada area lekukan 1249 yang merupakan aromatic eter C-O-C dari epoksi. Selain itu terjadi pada 1508 yang merupakan aromatic hidrokarbon dari epoksi C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, dan 1718 yang merupakan perpaduan antara rantai epoksi C-O-C dengan rantai poliamino amid N-H. Sedangkan pada hasil FTIR 60% karbon masih terdapat adanya ikatan epoksi dan poliamino amid pada titik lekukan 1247 dan 1505. Selain itu terdapat lekukan pada titik 2850 yang menunjukkan adanya ikatan C-C yang menunjukkan puncak dari grafit. Terdapat pula lekukan pada titik 1107 yang menunjukkan adanya ikatan rangkap dua C-O dengan *type of compound* adalah grafit oxide.

#### B. Sifat Tarik Komposit

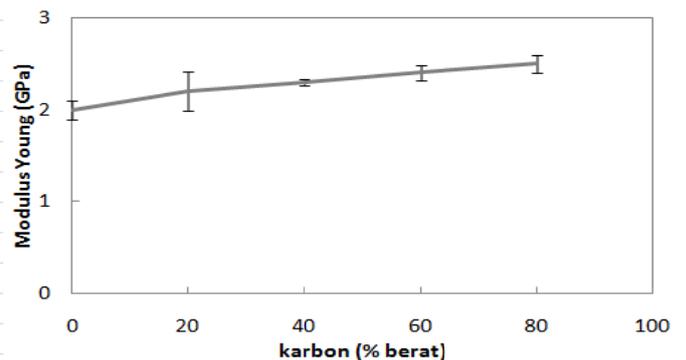
Tabel 2 menunjukkan properti tarik komposit karbon dengan 20% Epoksi. Gambar 4 menunjukkan kekuatan tarik menurun terhadap penambahan karbon, hal ini dikarenakan sifat karbon yang lebih getas dibandingkan epoksi. Kekuatan tarik terendah ditunjukkan pada komposit 80% karbon dengan nilai 3.1 MPa. Hal ini sesuai dengan penelitian Lee nilai kekuatan tarik pada 80% karbon dengan penekanan 10MPa senilai 4 MPa [5]. Sedangkan, penelitian sebelumnya mengenai komposit untuk pelat bipolar juga dilakukan oleh Kakati, yang memperoleh kekuatan tarik sebesar 47MPa dengan komposisi 65% natural grafit (NG) dan 5% karbon hitam. Peningkatan kekuatan tarik dapat dilakukan dengan memvariasikan ukuran serbuk dan jenis filler.

Tabel.2.

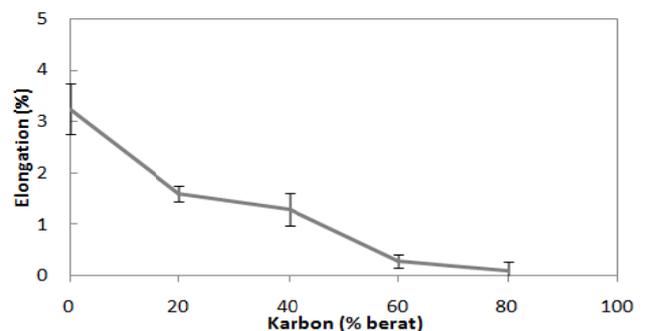
Properti tarik komposit karbon 20% Epoksi			
Kode Sampel	Elongasi (%)	Kekuatan Tarik (MPa)	Modulus Young (Gpa)
E/PA(0)	4.5 ± 1.21	30.6 ± 2.51	1.9 ± 0.05
E/PA(20)	1.9 ± 0.33	18 ± 3.6	2.2 ± 0.2
E/PA(40)	1.7 ± 0.1	16 ± 5.86	2.3 ± 0.1
E/PA(60)	0.8 ± 0.06	6.6 ± 0.58	2.4 ± 0.1
E/PA(80)	0.1 ± 0.18	3.1 ± 1.02	2.5 ± 0.1



Gambar.4. Pengaruh penambahan karbon terhadap kekuatan tarik



Gambar.5. Pengaruh penambahan karbon terhadap Modulus Young



Gambar.6. Pengaruh penambahan karbon terhadap Elongasi

Karena ukuran serbuk yang bervariasi dapat menutupi rongga-rongga dalam komposit yang mengakibatkan penurunan kekuatan [6]. Gambar 5 menunjukkan kenaikan Modulus Young akibat penambahan karbon, hal ini dikarenakan sifat karbon yang kaku sehingga menaikkan ketangguhan dari komposit. Gambar 6 menunjukkan pengaruh penambahan karbon terhadap elongasi dari

komposit. Data hasil penelitian menunjukkan penambahan karbon dapat mengurangi elongasi dari komposit.

**C. Pengamatan SEM Komposit Karbon/Epoksi**

Pada gambar 7 a dan b terlihat bahwa bentuk patahan yang terjadi adalah patahan ulet. Bentuk patahan yang kasar dan terlihat bekas elongasi patahan. Tetapi pada gambar 7a hasil patahan terlihat lebih ulet, hal ini dikarenakan penambahan 80% poliamino amid yang dapat meningkatkan fleksibilitas dari material. Pada gambar 7 c dan d yaitu hasil uji tarik dari sampel 20 dan 80% karbon, terlihat bahwa hasil patahan adalah patahan getas, dikarenakan halusnya permukaan hasil penarikan. Terlihat juga persebaran karbon merata dan tidak ada karbon yang terpisah dari permukaan patahan. Hal ini menunjukkan interaksi antara epoksi dan karbon sangat baik. Dari kedua gambar di atas dengan 2 komposisi karbon yang berbeda terlihat bahwa tidak ada perbedaan fasa campuran, sehingga sampel ini adalah homogen. Gambar 8c dan d terlihat perekatan yang terjadi antara matriks dan filler adalah Perekatan mekanik, dikarenakan adanya interlocking antara matriks dan filler. Berdasarkan teori perekatan mekanik, perekat harus mempenetrasi rongga-rongga pada permukaan dan menggantikan udara yang terjebak pada ikatan antarmuka tersebut.

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 karbon [7].

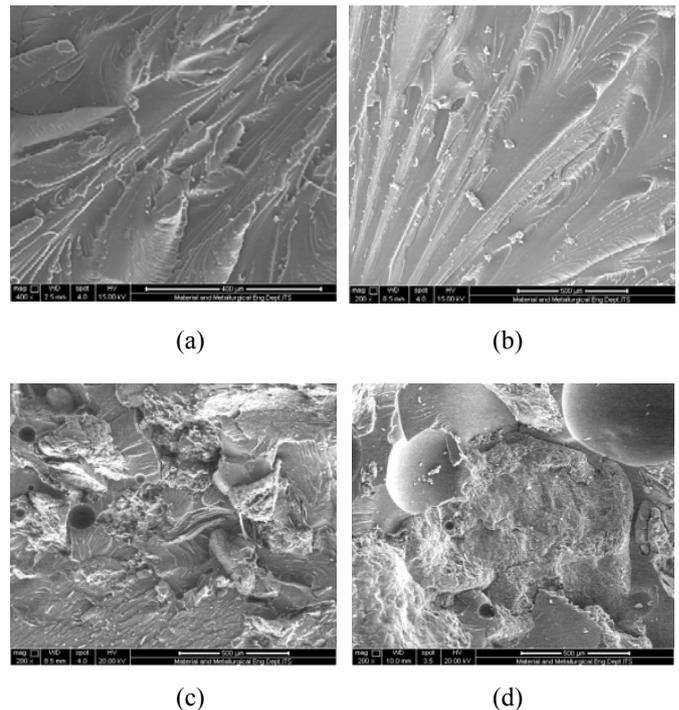
**D. Sifat Konduktivitas Listrik Komposit**

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.

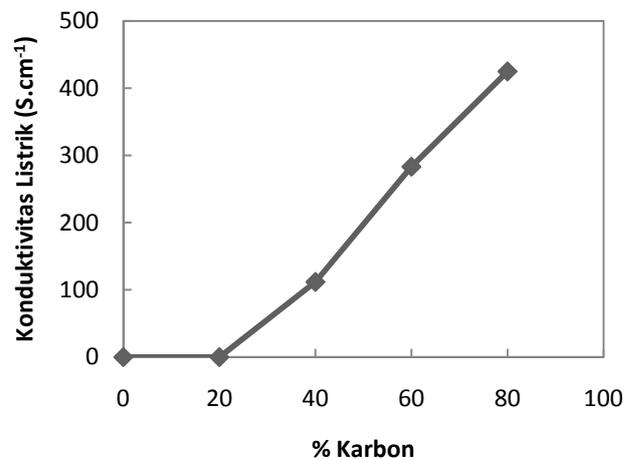
Gambar 8 menunjukkan pengaruh penambahan karbon terhadap konduktivitas listrik. Konduktivitas listrik bertambah seiring dengan bertambahnya karbon. Nilai tertinggi ditunjukkan pada komposit dengan 80% karbon senilai 424.8 S.cm<sup>-1</sup>. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Shen terhadap ketahanan elektrik dari komposit matriks polimer berserat karbon menunjukkan konduktivitas elektrik dari 0.001 sampai 20 (Ω mm)<sup>-1</sup> atau 1 sampai 2000 (S.cm)<sup>-1</sup> yang dipengaruhi oleh densitas dari komposit karbon[8].

Nilai konduktivitas listrik bergantung pada fraksi berat serbuk, dan kandungan minimum dari serbuk karbon, dimana serbuk karbon tersebut membentuk jaringan kerja yang bersambung, yang menentukan komposit karbon 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 pada kemungkinan kontak antar serbuk di dalam matriks polimer. Metode fabrikasi dan kondisi pembuatan komposit memainkan peranan penting dalam konduktivitas karena mempengaruhi penyebaran, orientasi dan jarak antar serbuk di dalam matriks polimer.



Gambar.7. Morfologi Komposit Karbon/Epoksi (a) 20% Epoksi, (b)80% Epoksi, (c) 20% Karbon, (d) 60% Karbon



Gambar.8. Pengaruh penambahan karbon terhadap Konduktivitas Listrik

Parameter proses, seperti temperatur, tekanan, waktu *curing*, adalah faktor kritis terhadap keberhasilan pembuatan interkoneksi mekanik dan elektrik. Sambungan adesif konduktif bisa gagal, antara lain karena tegangan termal yang disebabkan oleh ketidaksesuaian koefisien muai panas antara matriks dan serbuk, oleh ketidaksesuaian antara matriks terhadap serbuk selama siklus karakteristik komposit [9].

**E. Stabilitas Termal Komposit**

Tabel 3 menunjukkan pengurangan berat 5% epoksi dengan komposisi 20% epoksi terjadi pada suhu 341 °C dan berat sisa pada suhu 800 °C adalah 5.2%. Karbon hanya kehilangan 2% berat berat ketika dipanaskan sampai suhu 800°C. Artinya, karbon memiliki stabilitas termal yang sangat baik.

Tabel 3.  
Hasil Pengujian TGA komposit Karbon/Epoksi

Sampel	T <sub>5%</sub> <sup>c</sup>	T <sub>10%</sub> <sup>c</sup>	Berat sisa (%wt)
Epoksi 20%	341	351	5.2
Epoksi 80%	354	363	8.9
Karbon	-	-	98
E/PAA/K 20/80/60	355	368	63
/PAA/K 80/20/60	358	371	61

Pengujian TGA komposit 60% Karbon dengan komposisi poliamino amid 80 % pengurangan berat 5% terjadi pada temperatur 355<sup>0</sup> C dan berat sisa sebesar 63 %, sedangkan pada Komposit Epoksi/Karbon 60% dengan komposisi poliamino amid 20% pengurangan berat 5% terjadi pada temperatur 358 °C dan berat sisa sebesar 61%. Hal ini menunjukkan penambahan serbuk karbon pada Komposit dapat meningkatkan stabilitas thermal, dapat dilihat pada berat sisa yang didapat pada pemanasan 800 °C, dimana pada epoksi tanpa penambahan karbon berat sisa 5.2 %, tetapi setelah ditambahkan serbuk karbon beratsisa bertambah menjadi 63%.

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 [10].

#### IV. KESIMPULAN

Kesimpulan dari studi ini didapatkan bahwa penambahan karbon pada komposit dapat meningkatkan Modulus Young. Penambahan karbon menurunkan kekuatan tarik dan elongation. Kekuatan tarik epoksi tertinggi terdapat pada komposisi 80% epoksi yaitu 61 MPa, sedangkan pada 20% karbon yaitu 18.9 MPa. Penambahan karbon pada komposit dapat menaikkan konduktivitas listrik. Data tertinggi diperoleh pada komposisi 80% karbon yaitu 424.8 S/cm<sup>-1</sup>. Penambahan karbon juga meningkatkan stabilitas thermal dari komposit. Data pada 60% karbon menunjukkan berat sisa pada 800 °C senilai 63%. Komposit Karbon/Epoksi (40/60%) sangat berpotensi untuk dijadikan pelat bipolar PEMFC dikarenakan mempunyai kekuatan tarik lebih dari 10MPa dan konduktivitas listrik diatas 100 S.Cm<sup>-1</sup>.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] MK Kim, "Bipolar plates made of plain weave carbon/epoksi composite for proton exchange membrane fuel cell". Korea Advanced Institute of Science and Technology : Republic of Korea Vol. 37 (2011) 4300-4308
- [2] B Prihandoko, "Pengaruh Tekanan Hot Press terhadap Karakter Pelat Bipolar PEMFC". Pusat Penelitian Fisika LIPI: Tangerang Vol.27(2010)
- [3] Dhakate." Properties Of Graphite-Composite Bipolar Plate Prepared By Compression Molding Technique For PEM Fuel Cell". Tezpur University: India Vol.32 (2008) 4537 – 4543
- [4] R Altobelli, "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 (2011) 12474-12485
- [5] Lee. "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(2007) 425–428
- [6] L. Shen, "Modeling and analysis of the electrical resistance measurement of carbon fiber polymer–matrix composites", *Composites Science and Technology* 67 (2007) 2513–2520
- [7] G.Priyotomo. "Perubahan Struktur Kristal Material berbasis Karbon Terhadap Sifat Konduktivitas". Pusat Penelitian Metalurgi-LIPI: Tangerang Vol.22 No.1 (2007)
- [8] Kalaitzidou, "A Route for Polymer Nanocomposites with Engineered Electrical Conductivity and Percolation Threshold". *Materials*.3 (2007)1089-1103
- [9] Sancakstar, E. and L. Bai. "Electrically Conductive Epoxy Adhesives", *Polymers*427-466,(2007)
- [10] Manocha, L. M. "High performance carbon–carbon composites", *Sadhana* Vol. 28, Parts 1 & 2, pp (2003) 349–358