

BAB II LANDASAN TEORI

2.1 Sel Tunam Berbahan Dasar Polimer (PMFC)

Sel tunam berbahan dasar polimer atau PMFC adalah sebuah alat konversi energi elektrokimia yang dapat mengkonversi energi kimia dari bahan bakar langsung menjadi energi listrik. PMFC sendiri merupakan sumber energi yang sangat menjanjikan untuk transportasi dan peralatan elektronik portabel. PMFC menawarkan sebuah sumber energi baru yang memiliki potensial yang baik, ringan, memiliki densitas energi yang tinggi, serta temperatur yang rendah.

Namun, pengembangan PMFC mengalami beberapa hambatan, antara lain produksi dan distribusi hidrogen yang minim infrastruktur, densitas penyimpanan hidrogen yang rendah, daya tahan tumpukan PMFC, dan hambatan terbesar yaitu masalah biaya produksi yang tinggi. Sebagai salah satu komponen utama dalam PMFC, material dan disain pelat bipolar yang baru dibutuhkan untuk mengurangi biaya produksi dan berat dari PMFC itu sendiri.

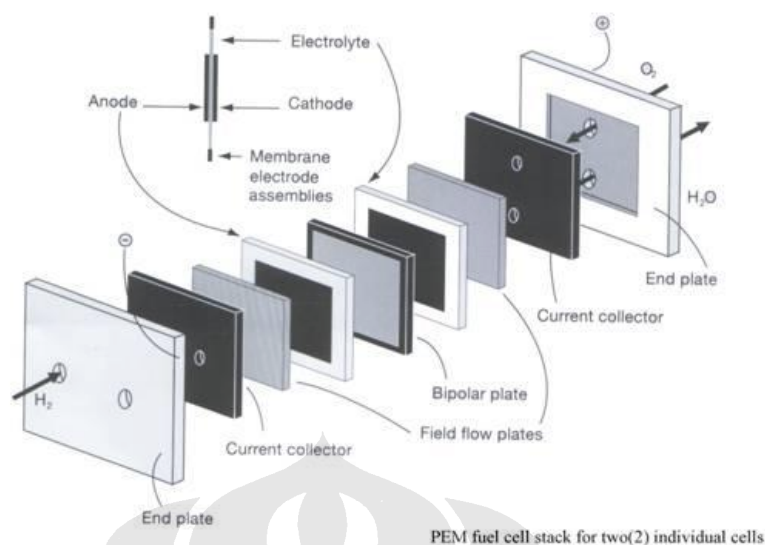
2.1.1 Struktur PMFC

PMFC memiliki beberapa komponen primer yang memegang peranan penting dalam menjalankan fungsi dari PMFC itu sendiri, yaitu *membrane electrolyte assembly (MEA)*, pelat bipolar, *endplate*, dan pengumpul arus. Karakter dan fungsi dari keempat komponen utama tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.1 Komponen Utama PMFC^[1]

Komponen	Karakter & Fungsi
<i>Membrane Electrode Assembly (MEA)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Terdiri dari dua elektroda (membran elektrolit dan <i>gas diffusion layer</i>). • Sebagai separator dua buah reaksi setengah sel sehingga memungkinkan transfer proton dari anoda ke katoda. • <i>Gas diffusion layers</i> mendistribusikan gas secara seimbang ke katalis pada membran sehingga memindahkan elektron dari area aktif ke pelat bipolar dan membantu penanganan air sebagai produk akhir.
Pelat Bipolar	<ul style="list-style-type: none"> • Berfungsi untuk mendistribusikan gas ke atas area aktif membran. • Memindahkan elektron dari anoda dari sebuah pasangan elektroda ke katoda pasangan elektroda lain. • Memindahkan air dari setiap sel.
<i>Endplate</i>	Memungkinkan penyusunan terintegrasi di dalam tumpukan PMFC.
Pengumpul Arus	Mengumpulkan dan memindahkan arus dari tumpukan PMFC ke sirkuit eksternal.

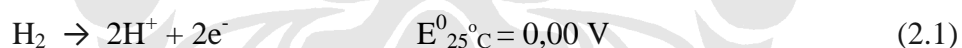
Struktur dari PMFC dapat dilihat dari Gambar 2.1 di bawah ini.



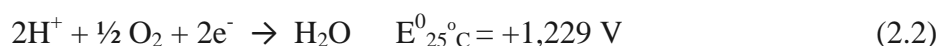
Gambar 2.1 Diagram Struktur PMFC^[2]

2.1.2 Sifat Elektrokimia PMFC

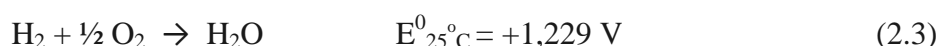
Pada PMFC, gas kaya oksigen atau hidrogen yang dimampatkan berperan sebagai bahan bakar dan oksigen yang dimampatkan berfungsi sebagai oksidan. Dari anoda, hidrogen berdifusi melalui *gas diffusion layer* menuju lapisan katalisator dimana molekul hidrogen terpecah menjadi elektron dan proton mengikuti reaksi elektrokimia setengah sel berikut ini.



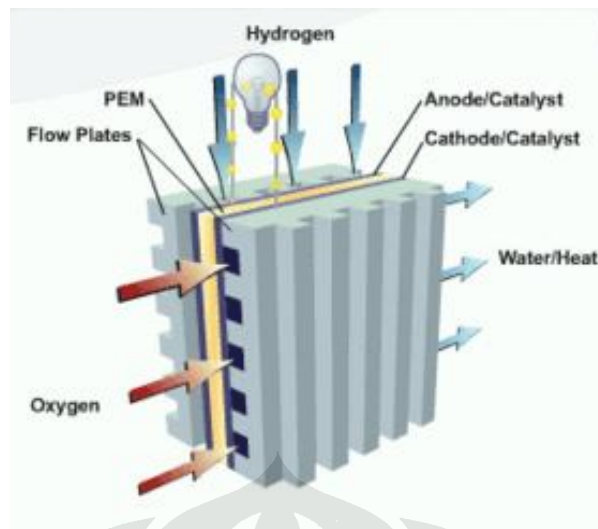
Proton akan berjalan melewati membran elektrolit menuju katoda dan elektron akan berjalan melalui sirkuit eksternal menuju katoda. Pada katoda, oksigen berdifusi melalui katoda *gas diffusion layer* menuju katoda katalis. Pada katalis, oksigen akan bereaksi dengan proton dan elektron membentuk air dan memproduksi panas sesuai dengan reaksi setengah sel berikut ini.



Sehingga reaksi keseluruhan dari PMFC adalah sebagai berikut.



Skema dari PMFC dapat dilihat pada Gambar 2.2 di bawah ini.



Gambar 2.2 Skema PMFC^[3]

2.2 Pelat Bipolar (*Bipolar Plates*)

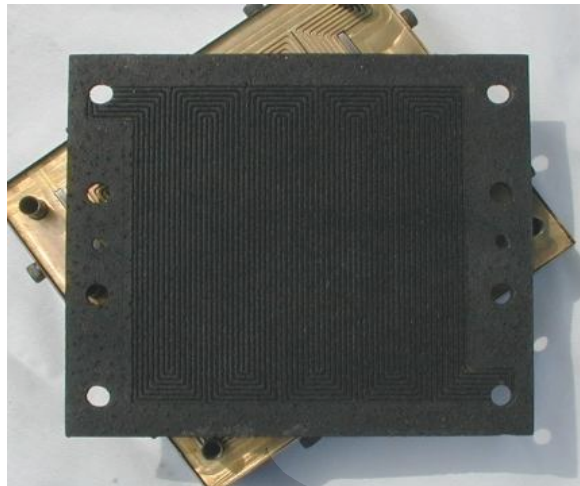
Pelat bipolar atau *bipolar plate* seringkali dikenal pula dengan sebutan *flow field plate* atau pelat separator. Pelat bipolar ini digunakan sebagai penghubung elektrik antara dua elektroda dengan kutub yang berbeda. Pelat bipolar berfungsi untuk mendistribusikan gas ke membran, penghantar elektron dari anoda ke katoda, penghantar panas dari dan menuju elektroda mengalirkan produk akhir dalam bentuk air dari tiap sel, penghalang perpindahan gas antar sel, dan menjaga stabilitas struktur dari PMFC itu sendiri. Pelat ini seringkali dilengkapi dengan saluran pendingin sebagai penjaga temperatur.

Pelat bipolar dibuat dari material yang memiliki konduktivitas listrik baik dan tidak dapat dilewati oleh gas. Dapat berlaku sebagai pengumpul arus, dan mampu menopang struktur dari PMFC itu sendiri. Pelat bipolar ini biasanya terbuat dari grafit, logam berlapis seperti aluminium, *stainless steel*, titanium, dan nikel, atau material komposit berdasar logam atau karbon.

Tabel 2.2 Material Pelat Bipolar Pada Umumnya^[1]

Jenis Material	Sifat
Grafit	<ul style="list-style-type: none"> • Impregnasi dengan polimer • Rapuh dan tebal • Konduktivitas tinggi • Biaya relatif tinggi untuk pembuatan <i>gas flow channels</i>
Logam & campurannya	<ul style="list-style-type: none"> • Baja tahan karat • Ni-Cr <i>alloy</i> • Al <i>alloy</i> • Baja Titanium • Konduktivitas tinggi • Dapat terkorosi • Biaya relatif tinggi untuk pembuatan <i>gas flow channels</i>
Material komposit	<ul style="list-style-type: none"> • Komposit grafit / karbon • Komposit karbon-karbon • Ringan dan relatif murah • Konduktivitas lebih rendah apabila dibandingkan dengan pelat grafit dan logam
Plastik konduktif	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Liquid Crystal Polymer</i>(LCP) • Konduktivitas relatif rendah

Pada permukaan pelat bipolar terdapat saluran-saluran yang dibuat sebagai jalur untuk gas reaktan (*gas flow channels*). Gambar pelat bipolar dengan *gas flow channels* dapat dilihat pada Gambar 2.3 di bawah ini.

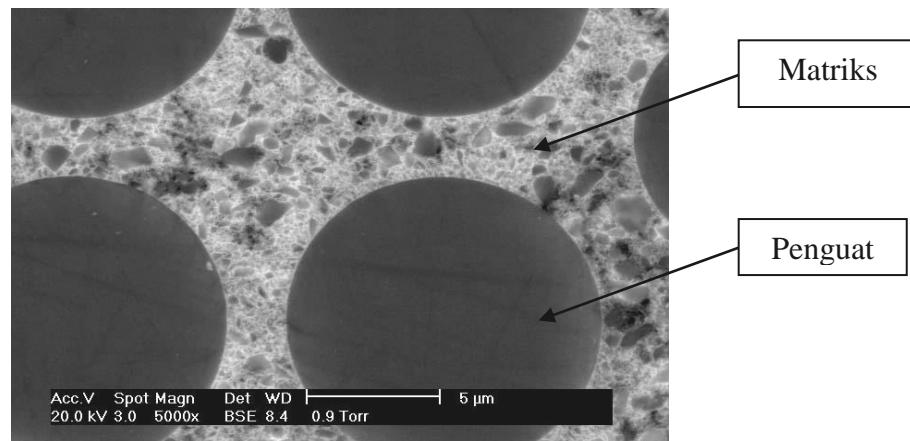


Gambar 2.3 Pelat Bipolar Dengan *Gas Flow Channels*^[4]

2.3 Komposit

Material komposit adalah gabungan dua atau lebih material yang memiliki perbedaan fasa dan sifat yang berbeda, membentuk satu material yang memiliki sifat yang lebih baik daripada material penyusunnya. Namun, material penyusun masih dapat dibedakan secara makro.

Suatu komposit terdiri dari dua konstituen, yaitu matriks dan penguat (*reinforcements*). Matriks berfungsi sebagai pengikat dari penguat, mendistribusikan beban antara penguat, memproteksi penguat dari lingkungan, dan melindungi permukaan abrasi mekanis. Pemilihan matriks dalam suatu komposit menjadi penting karena dalam suatu komposit dibutuhkan sifat mekanis yang baik, kemampuan proses yang baik, dan juga memiliki resistansi yang baik terhadap bahan kimia dan panas. Di sisi lain, penguat digunakan dalam suatu komposit untuk meningkatkan sifat dari material komposit yang dihasilkan dan memiliki kemampuan untuk ditempatkan pada arah pembebanan untuk meningkatkan sifat mekanisnya.



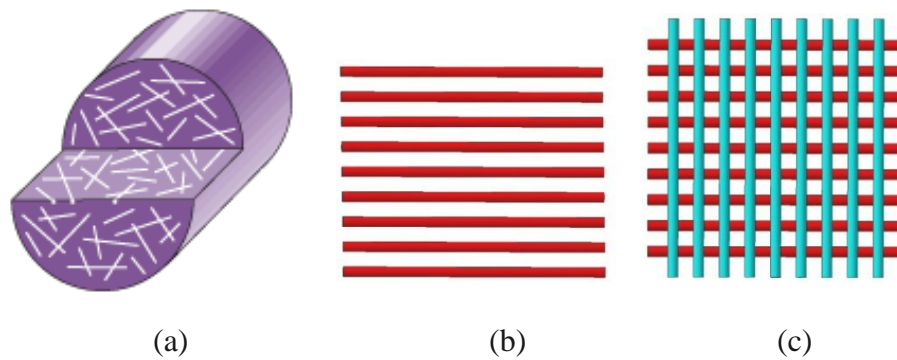
Gambar 2.4 Mikrostruktur Material Komposit^[5]

2.3.1 Sifat Komposit

Pada umumnya, sifat dari sebuah material komposit sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat dan konsentrasi konstituen penyusunnya, arah orientasi penguat, dan juga ikatan antara matriks dan penguatnya.

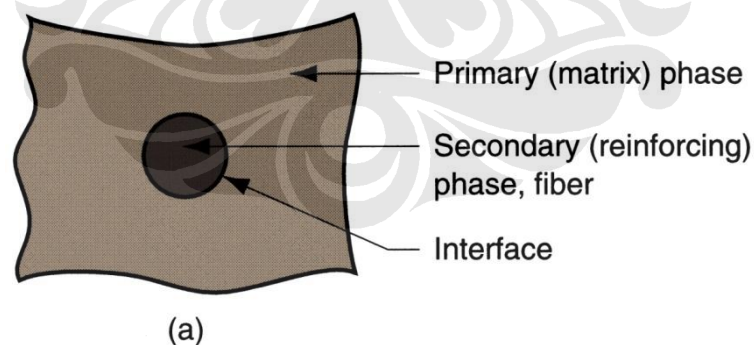
Pada suatu campuran komposit, perlu dilakukan sebuah hipotesa awal mengenai sifat dari material komposit yang diinginkan sesuai dengan aplikasinya. Dari hipotesa tersebut, dapat diprediksi material bahan baku apa yang dapat digunakan sebagai konstituen penyusun material komposit yang diinginkan. Sebagai contoh, diinginkan sebuah komposit dengan sifat mekanis yang baik dan juga sifat konduktivitas yang baik. Dalam hal ini dapat digunakan material polimer yang memiliki sifat mekanis yang baik, tetapi sifat konduktivitasnya kurang baik. Sifat konduktivitas ini dapat ditingkatkan dengan penambahan penguat karbon. Namun, penambahan penguat karbon ini dapat menurunkan sifat mekanis dari material komposit yang dihasilkan karena sifatnya yang getas. Oleh karena itu, dibutuhkan komposisi yang tepat untuk mendapatkan sifat mekanis dan konduktivitas yang optimal.

Arah orientasi penguat juga sangat berpengaruh terhadap sifat material komposit. Pengaturan arah orientasi penguat ini juga dapat diatur untuk merencanakan sifat dari material komposit tersebut, seperti sifat mekanis dan konduktivitasnya. Arah orientasi penguat yang searah dengan arah pembebanan akan mampu memberikan performa mekanis yang baik terhadap pembebanan tersebut. Jenis arah orientasi penguat dapat dilihat pada Gambar 2.5 di bawah ini.



Gambar 2.5 Arah Orientasi Penguat (a) *Random*, (b) *Unidirectional*, (c) *Orthogonal*^[5]

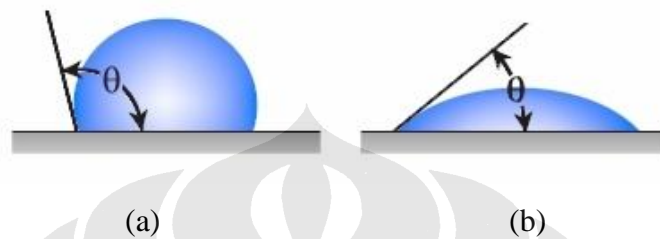
Selain itu, ikatan antara penguat dan matriks memiliki peran yang besar dalam penentuan sifat komposit. Hal ini berkaitan erat dengan fenomena antarmuka dan fenomena interfasa. Ikatan antarmuka adalah ikatan yang terbentuk antara dua fasa yang berbeda. Ikatan antarmuka berfungsi sebagai media transfer beban dari matriks dan penguat. Semakin luas bidang sentuh antara permukaan, semakin besar efek yang dihasilkan dari ikatan tersebut sehingga meningkatkan sifat ikatan dari material komposit yang diinginkan. Ikatan antarmuka ini mempengaruhi kekuatan, kekakuan, ketahanan mulur, dan degradasi akibat lingkungan pada material komposit. Skema ikatan antarmuka dapat dilihat pada Gambar 2.6 di bawah ini.



Gambar 2.6 Skema Fenomena Antarmuka^[5]

Ikatan antarmuka sangat berkaitan erat dengan kemampubasahan (*wettability*) dari permukaan kedua konstituen. Kemampubasahan dipengaruhi oleh tegangan permukaan dari ikatan tersebut. Untuk pembasahan yang baik, dibutuhkan tegangan permukaan dari penguat yang lebih tinggi daripada matriks,

sehingga matriks dapat membasahi penguat dengan baik. Kemampubasahan dapat dilihat melalui sudut kontak (*contact angle*) dari pembasahan tersebut. Apabila sudut kontak di bawah 90° , maka kemampubasahan dari ikatan antarmuka tersebut baik, sedangkan pembasahan tidak akan terjadi apabila sudut kontak lebih dari 90° . Skema dari sudut kontak permukaan dapat dilihat pada Gambar 2.7 di bawah ini.

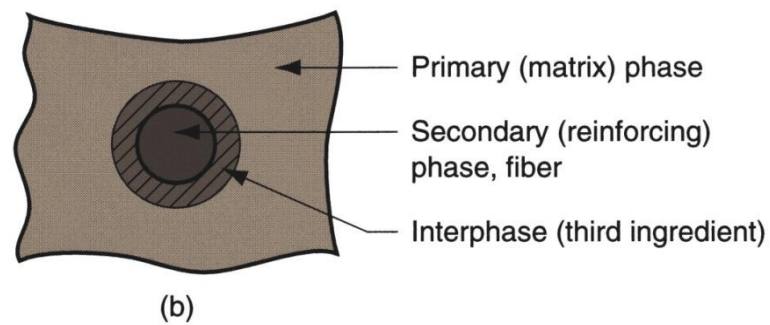


Gambar 2.7 Sudut Kontak. (a) $>90^\circ$, (b) $<90^\circ$ [6]

Ikatan antarmuka ini dapat ditingkatkan dengan beberapa cara, yaitu :

- Permukaan harus bersih dari partikel asing
- Luas area kontak yang besar
- Tegangan permukaan yang tinggi, terutama pada komposit dengan matriks yang mengandung gugus polar
- Tegangan permukaan penguat yang lebih tinggi daripada matriks
- Penciptaan atau penambahan gugus kimia
- Variasi topografi permukaan untuk menciptakan ikatan mekanis pada permukaan

Sedangkan, fenomena interfasa adalah sebuah fenomena dimana terbentuk sebuah lapisan fasa ketiga dalam suatu ikatan antarmuka. Interfasa dapat terbentuk apabila ikatan antarmuka dari konstituen penyusun sangat baik dan mampu berdifusi untuk menciptakan fasa ketiga. Selain itu, dapat digunakan juga sebuah adesif untuk menciptakan ikatan interfasa ini. Fasa ketiga ini memiliki sifat gabungan dari kedua fasa pembentuknya sehingga sangat berpengaruh terhadap sifat komposit yang terbentuk. Skema ikatan interfasa dapat dilihat pada Gambar 2.8 di bawah ini.

Gambar 2.8 Skema Fenomena Interfasa^[5]

2.3.2 Komposit Polimer-Karbon untuk Pelat Bipolar

Pada penelitian ini digunakan material komposit dengan matriks polimer termoplastik dan penguat karbon. Hal ini didasarkan oleh kemampuan komposit polimer-karbon untuk mengurangi berat dari *fuel cell* itu sendiri serta lebih murah apabila dibandingkan dengan material lainnya, seperti baja, aluminium, dan grafit. Selain itu, kemampuprosesan polimer termoplastik menjadikannya sebuah alternatif yang baik dalam aplikasi sebagai pelat bipolar. Menurut target DOE 2010, komposit pelat bipolar yang baik haruslah memiliki sifat-sifat yang dijabarkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.3 Target DOE untuk Pelat Bipolar^[7]

<i>Karakteristik</i>	<i>Unit</i>	<i>Nilai</i>
Berat	kg/kW	<0.4
Konduktivitas Listrik	S/cm	>100
Resistivitas	Ω /cm	0.01
Kekuatan Lentur	MPa	>25
Fleksibilitas	% defleksi	3-5

Dengan pemilihan matriks polimer yang tepat, komposit polimer-karbon dapat memberikan sifat inert terhadap zat kimia dan keketatan yang tinggi terhadap gas. Oleh karena itu, polimer termoplastik atau termoset dapat digunakan sebagai matriks dan ditambahkan dengan penguat karbon untuk meningkatkan sifat mekanis dan konduktivitasnya. Pada fabrikasinya dapat digunakan metode *compression molding* atau *injection molding* yang dapat mengurangi biaya produksi pelat bipolar dengan drastis.

Namun, dibalik keunggulan yang dimiliki komposit polimer-karbon dalam aplikasinya sebagai pelat komposit, terdapat juga beberapa kekurangan yang dimilikinya, antara lain kesulitan material komposit dalam memenuhi target resistansi, ketebalan dari pelat, serta sifat mekanis. Hal ini disebabkan oleh kebanyakan material polimer memiliki konduktivitas listrik yang rendah. Hal ini berarti dibutuhkan komposisi penguat karbon yang lebih tinggi untuk memenuhi target nilai konduktivitas yang diinginkan untuk pelat bipolar. Sebagai kompensasi dari komposisi penguat karbon yang tinggi, maka sifat mekanis dari pelat bipolar tersebut akan lebih rendah. Oleh karena itu, dibutuhkan persentase matriks polimer termoplastik dengan penguat karbon yang optimum agar dapat memenuhi target nilai konduktivitas listrik yang diinginkan, tetapi juga mampu memberikan performa mekanis yang baik dalam aplikasinya.

Komposit polimer-karbon dapat diperoleh dengan mencampurkan matriks polimer yang berfungsi sebagai pengikat dengan penguat karbon. Sirkulasi arus yang baik dapat diperoleh dengan perembesan penguat karbon ke dalam resin polimer menciptakan jalur-jalur konduktif di sepanjang material.

2.4 Polipropilena (PP)

Polipropilena (PP) adalah sebuah material polimer termoplastik alifatik jenuh dimana ia memiliki rantai yang lurus tanpa ada ikatan rangkap pada atom karbon. Polimer ini digolongkan ke dalam polimer poliolefin yang dibuat dari gas hasil dari pemecahan rantai minyak bumi.

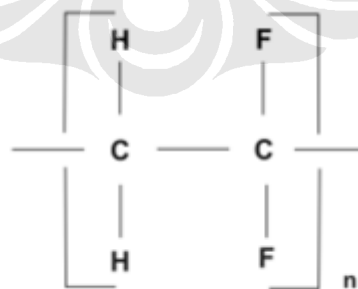
Secara bahasa, polipropilena berasal dari kata "*poly*" yang berarti banyak dan "*propylene*" yang berarti senyawa hidrokarbon yang memiliki tiga buah atom karbon dan enam buah atom hidrogen membentuk senyawa C_3H_6 . Sehingga, polipropilena dapat diartikan sebagai gabungan atau ikatan yang membentuk suatu molekul besar dengan unit-unit propilene yang berulang. Gambar 2.9 di bawah ini menunjukkan struktur kimia polipropilena.

Tabel 2.4 Sifat-sifat Umum Polipropilena^[9]

<i>Sifat</i>	<i>Nilai</i>
Kekuatan Tarik	13.0 – 34.5 MPa
Modulus Elastisitas	0.45 – 1.8 GPa
Elongasi	4 % – 300 %
Kekuatan Fleksural	21 – 90 MPa
Modulus Fleksural	0.370 – 7.5 GPa
Berat Jenis	0.878 – 1.63 g/cc
Temperatur Transisi Gelas (T _g)	-35 – 26°C
Temperatur Leleh (T _m)	131 – 164°C
<i>Melt Flow</i>	0.200 – 150 g/10min

2.5 Polyvinylidene Fluoride (PVDF)

Polyvinylidene fluoride atau PVDF adalah termoplastik fluoropolimer murni dan sangat tidak reaktif. Polimer ini berwarna putih atau tembus cahaya dalam bentuk padatnya. Selain itu PVDF tidak larut dalam air. PVDF memiliki temperatur transisi gelas (T_g) sekitar -35°C dan sekitar 50-60% kristalin. PVDF memiliki beberapa bentuk fasa struktur, yaitu fasa alfa (TGTG'), beta (TTTT), dan gamma (TTTGTTTG') yang bergantung terhadap konformasi dari rantainya, trans (T), atau *gauche* (G). Adapun struktur dari PVDF dapat dilihat pada Gambar 2.10 di bawah ini.

Gambar 2.10 Struktur Kimia PVDF^[10]

Polimer ini banyak digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan kemurnian, kekuatan, dan ketahanan terhadap bahan pelarut, asam, basa, dan

panas yang sangat baik. Dalam keluarga fluoropolimer, PVDF memiliki proses leleh yang lebih mudah karena titik lelehnya yang relatif rendah. Selain itu, ia juga memiliki densitas yang relatif rendah dibandingkan fluoropolimer lainnya.

PVDF memiliki sifat piezoelektrik, yaitu sifat dari beberapa material dimana material tersebut dapat menimbulkan potensial listrik sebagai respon dari beban mekanis yang diterimanya. PVDF memiliki nilai koefisien piezoelektrik sebesar $6-7 \text{ pC/N}^{-1}$, 10 kali lebih besar dibandingkan dengan polimer jenis lain. Sifat piezoelektrik ini dapat ditimbulkan dengan mengulur material secara mekanis dan diberi kutub di bawah tegangan. Dengan adanya kutub tersebut, PVDF memiliki sifat ferroelektrik, dimana ia dapat menyebabkan polarisasi elektrik secara spontan yang membuat PVDF memiliki sifat piezoelektrik dan piroelektrik (kemampuan material untuk menimbulkan potensial listrik saat dipanaskan atau didinginkan).

Aplikasi dari PVDF pada umumnya meliputi bidang kimiawi, semikonduktor, medis, dan industri pertahanan. Adapun contoh produk dari PVDF antara lain pipa, lembaran, pelat, baterai lithium ion, serta insulator untuk kabel. Beberapa jenis PVDF juga dapat digunakan sebagai cat untuk logam. Cat PVDF ini memiliki sifat kekilapan yang baik dan mampu mempertahankan warnanya dengan baik. Pada Tabel 2.5 di bawah ini dapat dilihat beberapa sifat umum dari PVDF.

Tabel 2.5 Sifat Umum *Polyvinylidene Fluoride*^[11]

<i>Sifat</i>	<i>Nilai</i>
Kekuatan Tarik	21.0 – 57.0 MPa
Modulus Elastisitas	1380 – 55200 MPa
Elongasi	12 % – 600 %
Kekuatan Fleksural	67 – 95 MPa
Modulus Fleksural	1173 – 82800 MPa
Temperatur Transisi Gelas (Tg)	-60 – -20°C
Temperatur Leleh (Tm)	141 – 178°C
<i>Shrinkage</i>	0.02 – 0.035 cm/cm

2.6 Penguat Karbon

Karbon merupakan unsur kimia yang mempunyai simbol C dan nomor atom 6 pada tabel periodik. Karbon merupakan unsur non-logam, bervalensi 4, dan memiliki beberapa alotrop, termasuk grafit dan intan. Karbon terdapat di dalam semua makhluk hidup dan merupakan dasar kimia organik. Unsur ini juga memiliki keunikan dalam kemampuannya untuk membentuk ikatan kimia dengan sesama karbon maupun banyak jenis unsur lain, membentuk hampir 10 juta jenis senyawa yang diketahui^[12]. Beberapa sifat karbon secara umum dapat dilihat pada Tabel 2.6 di bawah ini.

Tabel 2.6 Sifat Umum Karbon^[12]

<i>Sifat</i>	<i>Nilai</i>
Lambang, Nomor Atom	C, 6
Massa Atom	12.0107 g/mol
Konfigurasi Elektron	$1s^2 2s^2 sp^2$
Struktur Kristal	Heksagonal
Jumlah Elektron Tiap Kulit	2 atau 4
Fasa Stabil	Padat
Massa Jenis	2.267 g/cm ³ (grafit) 3.513 g/cm ³ (intan)
Titik Lebur	4300 – 4700 K
Titik Sublim	4000 K
Sifat Magnetik	Diamagnetik

Pada umumnya, pelat bipolar berbasis komposit polimer-karbon memiliki konduktivitas listrik yang rendah. Oleh karena itu, dibutuhkan penambahan penguat karbon untuk meningkatkan nilai konduktivitas dari komposit polimer-karbon tersebut. Selain itu, penguat karbon juga ditambahkan untuk meningkatkan performa mekanis dari komposit yang dibentuk. Dalam penelitian ini, penguat karbon yang digunakan adalah *carbon fiber*, *carbon black*, dan grafit.

2.6.1 Carbon Fiber

Carbon fiber adalah material yang terdiri dari serat-serat karbon yang sangat tipis dengan diameter 0.005-0.008 mm dan terbuat dari mayoritas atom-atom karbon. Atom-atom karbon tersebut berikatan secara kristalin dalam skala mikroskopik membentuk filamen yang panjang. Penyusunan kristal tersebut membuat material ini memiliki kekuatan yang amat besar untuk ukurannya. *Carbon fiber* dapat digabungkan dengan resin polimer sehingga menciptakan material yang memiliki perbandingan kekuatan dengan berat yang tinggi. Sifat tersebut didukung dengan berat jenisnya yang relatif rendah sehingga memudahkannya dalam aplikasi yang membutuhkan berat yang ringan. Sifat dari *carbon fiber* yang memiliki kekuatan tarik yang tinggi, ringan, dan ekspansi termal yang rendah membuatnya populer dalam aplikasi luar angkasa, konstruksi sipil, militer, dan olahraga bermotor.

Struktur atomik dari *carbon fiber* tidak jauh berbeda dengan grafit, terdiri dari beberapa lembar atom karbon (lembaran *graphene*) yang disusun teratur secara heksagonal. Perbedaan antara *carbon fiber* dan grafit terletak pada bagaimana lembaran-lembaran tersebut berikatan. Pada grafit, sifat kristalinitasnya membuat lembaran *graphene* tersusun paralel terhadap satu sama lain pada bentuk konvensional. Ikatan kimia yang terjadi antar lembaran tersebut hanya terbatas pada ikatan Van der Waals. Ikatan tersebut memberikan sifat lunak dan getas yang dimiliki oleh grafit. Sedangkan, *carbon fiber* memiliki ikatan yang membentuk filamen yang panjang. Setiap serat terdiri dari ribuan filamen berdiameter 5-8 μm .

Carbon fiber juga dapat digolongkan berdasarkan prekursor yang digunakan dalam pembuatannya, yaitu *graphitic*, *turbostratic*, atau gabungan dari keduanya. *Carbon fiber* yang diperoleh dari *polyacrylonitrile* (PAN) dapat digolongkan ke dalam jenis *turbostratic* dimana lembaran atom karbon dilipat dan dihancurkan. *Carbon fiber* berjenis ini memiliki nilai kekuatan tarik yang tinggi. Sedangkan, *carbon fiber* yang berasal dari *mesophase pitch* berjenis *graphitic* setelah perlakuan panas pada temperatur di atas 2200°C. *Carbon fiber* jenis ini memiliki modulus elastisitas dan konduktivitas termal yang tinggi.

Pada pelat bipolar, penambahan *carbon fiber* dapat meningkatkan sifat mekanis dari pelat tersebut. Selain itu, dengan mengatur arah orientasi serat, *carbon fiber* juga dapat meningkatkan nilai konduktivitas dari material komposit. Hal ini dapat dilakukan dengan mendisain cetakan dari pelat bipolar sedemikian rupa, khususnya dalam fabrikasi menggunakan *injection molding*. Sifat umum dari *carbon fiber* dapat dilihat pada Tabel 2.7 di bawah ini.

Tabel 2.7 Sifat Umum dari *Carbon Fiber*^[13]

<i>Sifat</i>	<i>Prekursor</i>		
	<i>Rayon</i>	<i>PAN</i>	<i>Pitch</i>
Kekuatan Tarik (MPa)	2200	2400	2100
Modulus Elastisitas (GPa)	333	390	380
Densitas ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	1.66	1.81	2.0
Diameter Filamen (m)	6.5	6.5	10
Elongasi (%)	0.6	0.6	0.5
Luas Permukaan (m^2/g)	1	1	1
Konduktivitas Termal (W/m.K)	122	70	100
Tahanan Elektrik ($\mu\Omega\cdot\text{m}$)	-	9.5	7.5

2.6.2 *Carbon Black*

Carbon black adalah material yang diproduksi dari pembakaran tidak sempurna dari hasil minyak bumi. *Carbon black* merupakan suatu bentuk dari karbon amorf yang memiliki perbandingan luar permukaan dengan volume yang tinggi. *Carbon black* merupakan salah satu material nano yang paling awal digunakan. *Carbon black* banyak diaplikasikan sebagai pigmen dan penguat pada produk plastik dan karet. *Carbon black* dapat bersifat karsinogenik terhadap tubuh manusia, dimana ia dapat mengganggu jaringan pernafasan apabila debu terkumpul dalam konsentrasi tinggi.

Pada material komposit, penambahan *carbon black* ditujukan sebagai antistatik, *electrostatic dissipative*, dan material semikonduktif. *Carbon black* dengan luar permukaan yang tinggi dapat mengumpulkan arus listrik pada konsentrasi yang lebih rendah dan membentuk jaringan karbon konduktif. Namun, struktur *carbon black* yang berporos dapat mengurangi sifat mekanis dari

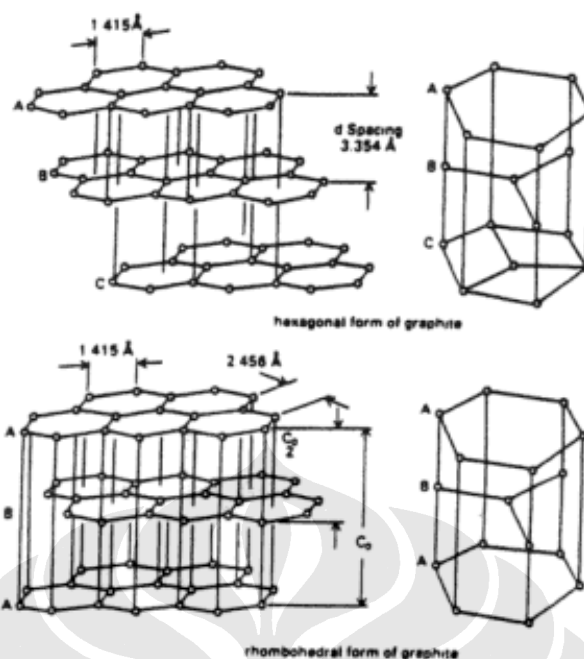
komposit, sehingga pembebanan yang dapat diterima material komposit menjadi terbatas. Penambahan *carbon black* pada polimer termoplastik seperti PP dapat menciptakan sebuah material komposit yang memiliki kekuatan yang baik, tetapi juga memiliki konduktivitas listrik yang baik.

2.6.3 Grafit

Grafit merupakan salah satu dari dua allotropi karbon yang tersusun kristalin secara alami selain intan. Secara bahasa, kata grafit berasal dari bahasa Yunani “*graphein*” yang berarti menulis. Material ini berwarna abu-abu kehitaman dan tidak tembus cahaya.

Grafit memiliki sifat yang unik, dimana sifatnya merupakan gabungan sifat material logam dan nonlogam. Grafit bersifat fleksibel, tetapi tidak elastis, grafit juga memiliki konduktivitas termal dan listrik yang baik, serta dapat bersifat refraktori dan tidak mudah bereaksi secara kimia. Grafit memiliki kemampuan adsorpsi yang rendah terhadap x-ray dan neutron, sehingga dapat digunakan dalam aplikasi nuklir.

Kombinasi unik dari sifat-sifat tersebut disebabkan oleh struktur kristalnya dimana atom-atom karbon tersusun secara heksagonal dan terdiri dari lembaran-lembaran *graphene*. Lembaran-lembaran tersebut disusun paralel satu sama lain. Atom-atom dalam bidang heksagonal berikatan secara kovalen, tetapi ikatan antar lapisan hanya berupa ikatan Van der Waals. Perbedaan jenis ikatan ini menciptakan derajat anisotropik pada grafit. Perbedaan jenis ikatan ini berada dalam arah kristalografi yang berbeda. Sebagai contoh, grafit mampu berlaku sebagai pelumas padat sebagai akibat dari sifat anisotropik tersebut. Ikatan Van der Waals yang lemah memungkinkan tiap lapisan bergerak secara individual dan memberikan sifat lubrikasi yang baik. Ikatan antar atom grafit dapat dilihat pada Gambar 2.11 di bawah ini.



Gambar 2.11 Ikatan Antar Atom Grafit^[14]

Pada aplikasinya sebagai pelat bipolar, grafit mampu memberikan konduktivitas listrik yang baik dan juga meningkatkan sifat mekanis dari komposit tersebut. Selain itu, penambahan grafit juga mampu meningkatkan kemampuan prosesan dari material komposit karena sifatnya yang baik sebagai pelumas padat. Hal-hal tersebut mampu memberikan performa yang baik dan stabil dalam aplikasi sebagai pelat bipolar.

2.7 Anti-Oksidan

Anti-oksidan adalah suatu molekul yang mampu memperlambat atau bahkan mencegah terjadinya oksidasi pada molekul lain. Oksidasi adalah reaksi kimia dimana terjadi transfer elektron dari suatu substansi ke sebuah oksidator. Reaksi oksidasi dapat menghasilkan radikal bebas yang mampu merusak sel. Anti-oksidan mampu mencegah reaksi oksidasi dengan menghilangkan radikal bebas dan menahan oksidasi lain dengan mengorbankan dirinya sendiri.

Pada dunia industri, anti-oksidan digunakan sebagai penstabil bahan bakar dan pelumas untuk mencegah terjadinya oksidasi. Anti-oksidan banyak digunakan untuk mencegah degradasi oksidatif pada polimer yang akan mengurangi nilai

kekuatannya dan fleksibilitasnya. Pada polimer dengan ikatan rangkap, reaksi oksidasi mudah terjadi. Produk polimer padat akan mengalami keretakan pada permukaan teroksidasi saat material mulai terdegradasi dan rantai polimer putus. Oksidasi juga sering dikaitkan dengan degradasi akibat sinar ultra violet karena radiasi ultra violet menciptakan radikal bebas dengan memutuskan ikatan karbon. Radikal bebas tersebut bereaksi dengan oksigen dan menciptakan reaksi berantai. Pada polipropilena, reaksi oksidasi menjadi lebih sensitif pada daerah rantai sekunder. Pada bagian tersebut, radikal bebas yang terbentuk lebih stabil apabila dibandingkan dengan radikal bebas yang terbentuk dari rantai primer.

Pada material komposit polimer-karbon dibutuhkan sebuah anti-oksidan untuk menghindari degradasi material komposit terhadap lingkungan aplikasinya. Pelat bipolar akan terekspos ke lingkungan *fuel*, oksigen, dan juga air yang dapat bersifat oksidatif.

