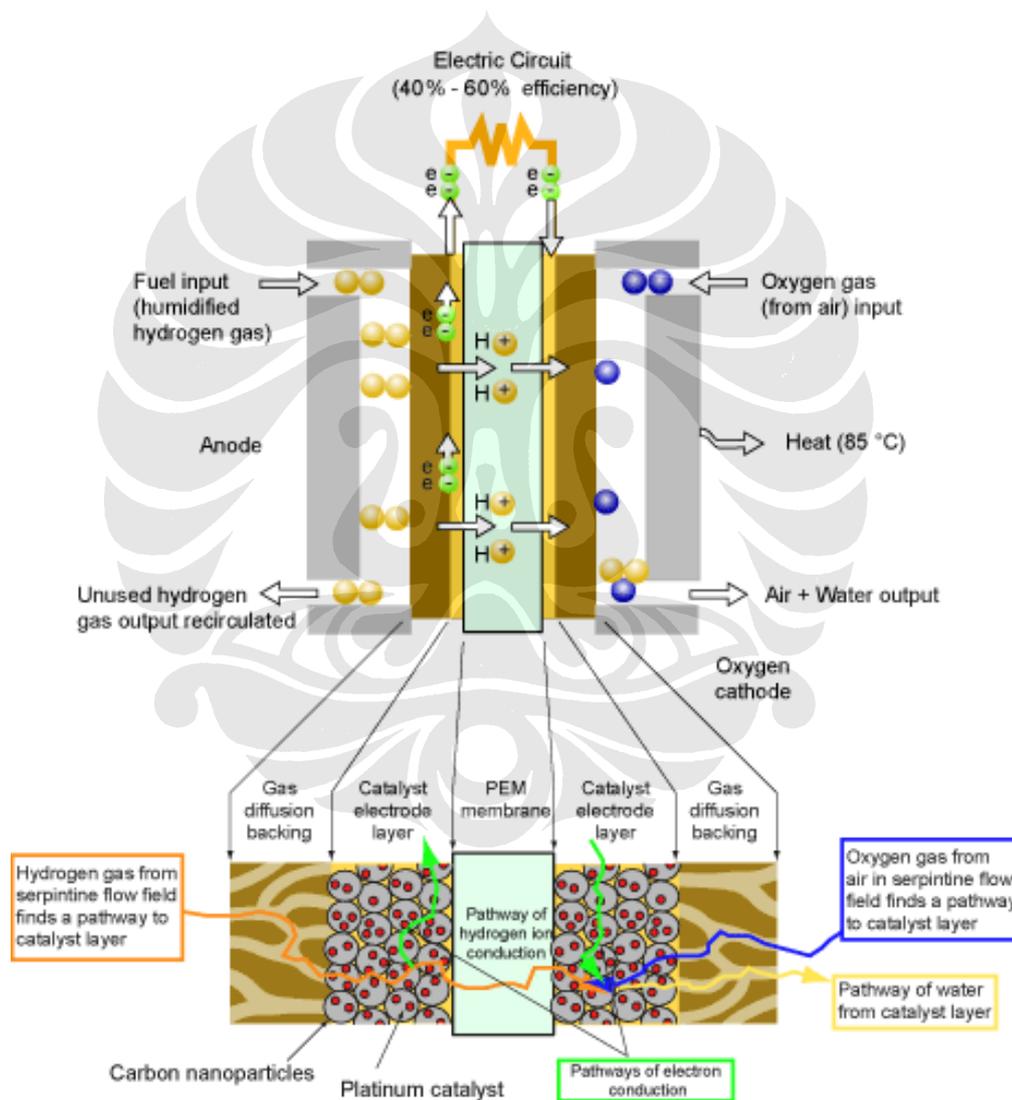


BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 TEKNOLOGI PEM FUEL CELL

Polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell adalah sebuah perangkat elektrokimia yang mengubah secara langsung energi kimia bahan bakar menjadi energi listrik melalui reaksi berpasangan oksidasi-reduksi [1, 10]. Secara skematis diagram PEM *fuel cell* dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut ini.

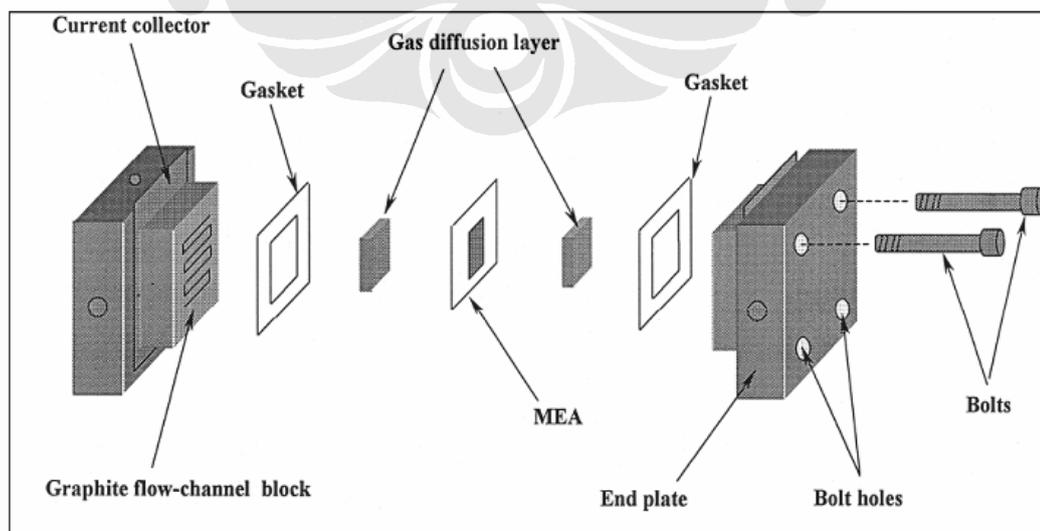


Gambar 2.1 Diagram PEM *fuel cell* [11].

PEM *fuel cell* merupakan sumber energi yang sangat baik bila diaplikasikan pada alat transportasi, karena perangkatnya mudah didistribusikan dan mudah dibawa [3, 6]. Selain itu, PEM *fuel cell* memiliki potensial *solid state*, ringan, rapat arus yang tinggi, dan beroperasi pada temperatur rendah [12]. Pada lima tahun terakhir, penelitian PEM *fuel cell* mengalami peningkatan yang signifikan. Industri otomotif melakukan investasi melalui berbagai usaha dalam mengkomersialisasi PEM *fuel cell* pada mobil, dengan harapan mampu bersaing dengan kendaraan bermesin bakar internal [13]. Di sisi lain, ada berbagai hambatan dalam pengkomersialisasian PEM *fuel cell*, seperti kurangnya produksi hidrogen dan infrastruktur distribusi, rendahnya kerapatan/densitas wadah penyimpanan gas, masalah kekuatan susunan PEM *fuel cell*, serta biaya produksinya masih tinggi. Sebagai salah satu komponen utama dari PEM *fuel cell*, pelat bipolar membutuhkan material dan desain yang baru dalam rangka mengurangi biaya produksi serta untuk mengurangi bobot *fuel cell* [1].

2.1.1 Struktur PEM Fuel Cell

Gambar 2.2 menunjukkan struktur rangkaian PEM *fuel cell* yang terdiri dari *membrane electrolyte assembly* (MEA) dengan lapisan katalis di kedua sisinya, lapisan difusi gas (GDL), *gaskets*, pelat bipolar, penyimpanan arus, dan pelat penutup. PEM *fuel cell* terdiri dari 4 komponen utama seperti disajikan pada Tabel 2.1.



Gambar 2.2 Struktur rangkaian PEM *fuel cell* [1].

Tabel 2.1 Komponen-komponen utama PEM *fuel cell* [14].

Komponen	Material	Fungsi
<i>Membrane electrolyte assembly</i> (MEA)	Polimer solid terimpregnasi dengan lapisan katalis pada anoda dan katoda. Kertas atau kain carbon berpori untuk lapisan difusi gas (GDL)	Terdiri dari 2 elektroda, 1 membran elektrolit, dan 2 GDL. Membran memisahkan (dengan pembatas gas) 2 setengah-reaksi sel dan melepas proton dari anoda ke katoda. Lapisan katalis yang terdispersi pada elektroda memacu setiap setengah-reaksi. GDL mendistribusikan gas secara merata ke katalis di membran, mengalirkan elektron dari area aktif menuju pelat bipolar dan membantu pengaturan air.
Pelat bipolar	Grafit, <i>stainless steel</i> , atau komposit polimer termoplastik	Mendistribusikan gas di bagian area aktif membran. Mengalirkan elektron dari anoda menuju katoda. Membuang air keluar sel.
Pelat penutup	Material dengan kekuatan mekanik yang baik (biasanya baja atau alumunium)	Menyatukan rangkaian <i>fuel cell</i> .
Penyimpan arus	Logam dengan kontak elektrik dan konduktivitas yang baik (biasanya tembaga)	Menyimpan dan mentransfer arus listrik dari dalam ke luar sirkuit.

2.1.2 Pelat Bipolar

Pelat bipolar atau pelat bidang alir (*flow field plate*) digunakan sebagai penghubung antara dua elektroda berbeda kutub. Pelat bipolar dibuat dari material yang mampu mengalirkan listrik dan tidak dapat ditembus gas, fungsinya sebagai penyimpan arus dan sebagai struktur penguat rangkaian *fuel cell*. Pelat ini biasa dibuat dari grafit, logam (aluminium, *stainless steel*, titanium, dan nikel), atau dapat juga dibuat dari komposit [15]. Saluran alir gas dicetak pada permukaan pelat sebagai tempat aliran gas-gas yang bereaksi. Gambar 2.3 di bawah ini menunjukkan sebuah pelat bipolar PEM *fuel cell* dengan saluran alir.



Gambar 2.3 Pelat bipolar dengan saluran alir [16].

Sebagai komponen utama pada PEM *fuel cell*, pelat bipolar memenuhi bagian yang signifikan dari total biaya dan bobot rangkaian *fuel cell*. Pelat bipolar mencakup 80% total bobot dan 45% biaya, sehingga hal ini bersifat kritis dan perlu pertimbangan dalam mendesain *fuel cell* [15]. Pembuatan saluran alir (*flow path*) pada permukaan pelat bipolar juga salah satu proses yang membutuhkan biaya, hal ini menjadi faktor kunci yang menghambat komersialisasi PEM *fuel cell*. Oleh karena itu, diperlukan pelat bipolar yang murah, tipis, dan ringan, sehingga dapat mengurangi bobot, volume, dan biaya produksi *fuel cell*.

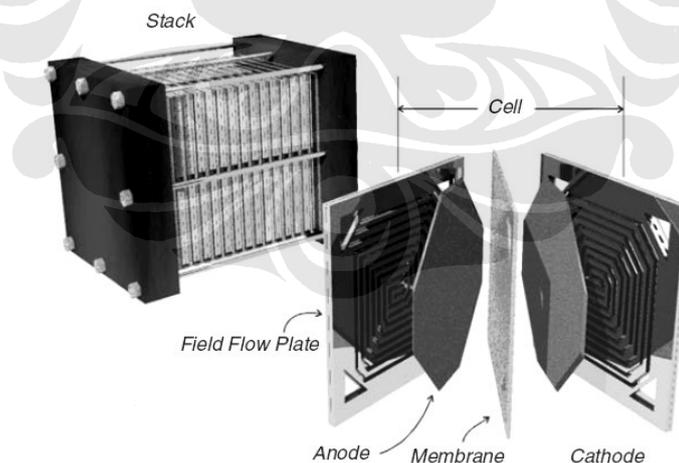
Pada aplikasi di bidang transportasi, bobot secara khusus menjadi bahan pertimbangan, karena penambahan bobot berarti mengurangi efisiensi bahan bakar. Salah satu jenis *fuel cell* dalam aplikasi kendaraan bermotor membutuhkan 200 - 400 pelat bipolar. Dalam kasus ini, diperlukan pemilihan material dan metode pemrosesan pelat bipolar yang tepat, agar dapat diaplikasikan pada industri otomotif. Material baru pelat bipolar untuk industri otomotif harus memiliki konduktivitas yang tinggi dan kerapatan massanya rendah bila

dibandingkan material lain, seperti baja, aluminium, dan grafit. Selain itu, pelat bipolar harus dapat diproduksi secara massal [1].

2.1.2.1 Fungsi Pelat Bipolar

Pelat bipolar memiliki banyak fungsi dalam lingkungan operasi PEM *fuel cell*. Fungsi utama pelat bipolar adalah sebagai berikut:

- Mengalirkan elektron ke seluruh sirkuit:
 - mengumpulkan dan memindahkan elektron dari anoda dan katoda,
 - menyatukan rangkaian *fuel cell* yang dilengkapi voltase (rangkaian *fuel cell* tergantung pada bentuk pelat bipolar);
- Mengalirkan dan mendistribusikan gas ke elektroda secara merata;
- Memisahkan oksidan dan bahan bakar gas, memasukkan H_2 ke anoda dan O_2 ke katoda, serta membuang air hasil reaksi;
- Sebagai penguat mekanik sekaligus menahan membran tipis dan elektroda, serta sebagai penjepit rangkaian *fuel cell* seperti terlihat pada Gambar 2.4;
- Sebagai konduktor panas untuk meregulasikan temperatur *fuel cell* dan memindahkan panas dari elektroda ke saluran pendingin.



Gambar 2.4 Letak pelat bipolar (*field flow plate*) pada PEM *fuel cell*.

Agar pelat bipolar mampu menjalankan semua fungsi tersebut, maka dibutuhkan material yang tepat. Sifat-sifat material pelat bipolar yang ideal disajikan pada Tabel 2.2 berikut ini:

Tabel 2.2 Sifat material yang dibutuhkan untuk pelat bipolar ideal [1].

Parameter	Nilai Standar
Muatan Konduktivitas	$>10^4$ S/m
Kekuatan	Mampu bertahan dari tekanan 200 psi
Bobot	Maksimum 200 gr per pelat
Volume	1 L/kW/stack
Biaya	$< \$ 0,0045/\text{cm}^2$
Kerapatan Arus <i>Decay</i>	$< 10\%$ per 5000 jam operasi
Daya Tembus (<i>permeability</i>)	Maksimum kebocoran H_2 $10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}\cdot\text{cm}^2$
Korosi	$8 \times 10^{-7} \text{ mol}/\text{cm}^2$ per 5000 jam atau $0,0016 \text{ mA}/\text{cm}^2$ per 5000 jam

2.1.2.2 Material Pelat Bipolar

Ada berbagai jenis material yang dapat digunakan untuk material pelat bipolar, seperti logam dengan atau tanpa pelapisan, grafit, komposit karbon/polimer, komposit karbon/karbon. Pelat logam sering dilapisi dengan lapisan antikorosi pada permukaannya, sementara pelat grafit diimpregnasi dengan *sealant treatment* untuk mengurangi daya tembus gas. Berbagai penelitian terbaru telah dilakukan untuk membuat pelat bipolar yang murah, ringan, dan berdaya guna, sehingga dapat menggantikan pelat grafit yang harganya masih mahal [1]. Jenis material pelat bipolar dan sifat-sifatnya disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Sifat-sifat material untuk pelat bipolar PEM *fuel cell* [17].

Jenis Material	Sifat-Sifat
Grafit	<ul style="list-style-type: none"> - Diimpregnasi dengan polimer - Konduktivitas tinggi - Getas dan tebal - Biaya untuk membuat saluran alir mahal
Logan atau Paduan Logam	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Stainless steel</i>, paduan Ni-Cr, paduan Al, baja Ti - Konduktivitas tinggi - Masalah korosi - Biaya untuk membuat saluran alir mahal
Komposit	<ul style="list-style-type: none"> - Komposit polimer/karbon - Komposit karbon/karbon - Ringan dan murah - Konduktivitas rendah dibanding grafit dan logam
Plastik Konduktif	<ul style="list-style-type: none"> - Polimer cair kristalin (<i>liquid crystal polimer</i>) - Konduktivitas relatif rendah

2.1.2.3 Pelat Bipolar Komposit Polimer-Karbon

Material baru untuk pelat bipolar yang mampu mengurangi bobot *fuel cell* sangatlah diperlukan. Saat ini, komposit bermatriks polimer sudah banyak diteliti untuk digunakan sebagai material pelat bipolar karena komposit polimer-karbon lebih murah dan lebih ringan bila dibandingkan material seperti baja, aluminium, dan grafit. Kemampuan proses juga menjadi sebuah persoalan yang penting untuk produksi massal pelat bipolar. Oleh karena itu, komposit polimer-karbon menjadi alternatif menarik dari pelat bipolar logam atau grafit. Idealnya, pelat komposit harus memenuhi target sebagai berikut [1]:

- Konduktivitas yang tinggi (target *Department of Energy* (DOE) Amerika Serikat adalah 100 S/cm);

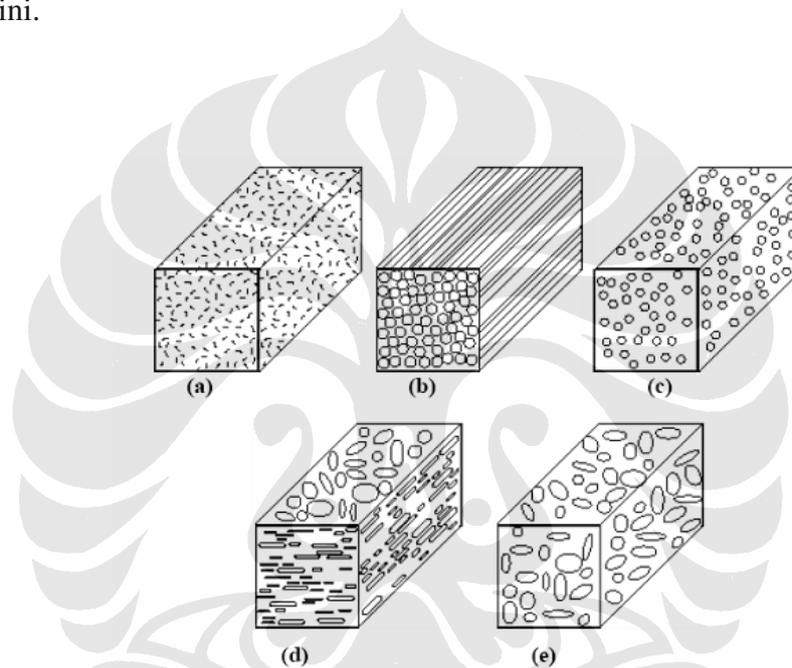
- Daya tembus (*permeability*) hidrogen harus sama atau di bawah rentang daya tembus membran penghantar ion;
- Sifat-sifat mekanik yang baik;
- Stabilitas panas saat kondisi kerja *fuel cell* (-40 sampai 120 °C untuk *fuel cell* penggerak kendaraan bermotor);
- Kerapatan massa yang rendah;
- Stabilitas kimia dalam kondisi kontak dengan bahan bakar, oksidan, dan air yang mungkin sedikit bersifat asam (korosi $< 16 \mu\text{A}/\text{cm}^2$);
- Tahan korosi;
- Daya tembus yang rendah terhadap bahan bakar dan oksidan (daya tembus gas $\text{H}_2 < 2 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{scm}^2$);
- Muai panasnya rendah;
- Dapat ditiru ulang, secara khusus mampu meniru ulang saluran alir yang dimanufaktur pada pelat dalam toleransi teknik;
- Mudah diselesaikan untuk dapat diterima standar kualitas;
- Dapat didaur ulang.

Melalui pemilihan matriks polimer yang tepat, komposit polimer-karbon dapat memberikan sifat inert terhadap bahan kimia dan keketatan terhadap gas. Polimer termoplastik dan termoset dapat dipilih menjadi matriks komposit dengan menambahkan bahan pengisi konduktif, seperti karbon hitam, serat karbon, grafit, dan partikel logam. Mesin cetak tekan (*compression molding*) dan cetak injeksi (*injection molding*) digunakan untuk memfabrikasi pelat bipolar dengan saluran alir pada permukaan pelatnya. Pemilihan metode proses yang tepat dapat mengurangi biaya produksi pelat bipolar.

2.2 KOMPOSIT

Komposit adalah material hasil kombinasi antara dua material atau lebih yang memiliki fasa berbeda menjadi suatu material baru yang memiliki sifat lebih baik dari bahan-bahan penyusunnya. Kombinasi ini terjadi dalam skala makroskopis. Komposit terdiri dari dua bahan penyusun, yaitu bahan utama sebagai matriks pengikat dan bahan pengisi sebagai penguat. Matriks berfungsi

sebagai pengikat dan pentransfer beban ke penguat, sedangkan penguat berfungsi sebagai penahan beban tersebut. Matriks dapat terbuat dari berbagai material, seperti polimer, logam, karbon, atau keramik. Bahan penguat komposit dapat berbentuk serat, partikel, serpihan, atau juga dapat berbentuk yang lain [18, 19]. Oleh karena itu, komposit dapat dikelompokkan berdasarkan jenis matriksnya, seperti komposit bermatriks logam, komposit bermatriks polimer, dan komposit bermatriks keramik. Selain jenis matriks, komposit juga dikelompokkan berdasarkan bentuk penguatnya sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.5 berikut ini.



Gambar 2.5 Jenis komposit berdasarkan bentuk penguat: (a) komposit serat pendek acak, (b) komposit serat panjang sejajar, (c) komposit partikulat, (d) komposit serpihan, (e) komposit berpengisi.

2.2.1 Komposit Bermatriks Polimer

Komposit bermatriks polimer merupakan jenis komposit yang menggunakan polimer sebagai matriks pengikat, sedangkan bahan penguatnya dapat berupa serat, partikel, atau serpihan. Jenis serat yang biasa dipakai sebagai penguat dalam matriks polimer adalah serat karbon, serat gelas, dan serat aramid (Kevlar) [20, 21].

Tujuan dibentuknya komposit bermatriks polimer umumnya karena alasan manufaktur, yaitu biaya pembuatan yang relatif lebih rendah, dapat diproduksi secara massal, mudah dibentuk dan memiliki kemampuan permesinan (*machinability*) yang baik [7, 8]. Selain itu, tujuan umum lainnya adalah untuk memperoleh produk dengan ketangguhan yang tinggi dan relatif lebih ringan. Secara khusus polimer dipilih sebagai matriks karena harganya murah, ketersediaan jumlah yang memadai, tahan terhadap bahan kimia, dan memiliki sifat-sifat mekanik yang baik, serta tidak tembus air maupun udara [22].

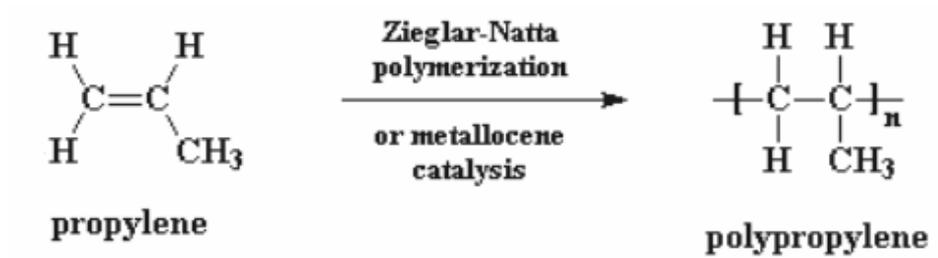
Komposit yang dibuat dari campuran antara matriks polimer dengan bahan pengisi konduktif seperti karbon hitam, serat karbon, grafit, dan partikel logam disebut dengan komposit konduktif polimer. Pelat bipolar yang terbuat dari komposit polimer konduktif memiliki bobot yang ringan dan daya tembus gas yang rendah, serta mampu mengurangi biaya manufaktur dengan produksi massal [1].

2.3 MATRIKS POLIMER

Polimer termoplastik seperti polipropilena (PP), polietilena (PE), poliviniliden florida (PVDF), dan polimer termoset seperti fenolik, epoksi, dan vinil ester dapat digunakan untuk membuat komposit pelat bipolar [15]. Polimer tidak hanya berperan sebagai matriks dalam proses fabrikasi pelat bipolar, tetapi juga sebagai faktor utama yang mempengaruhi performa pelat bipolar, seperti konduktivitas listrik dan kekuatan tekuk (*flexural*). Pada penelitian ini, polimer yang digunakan sebagai matriks adalah campuran antara termoplastik polipropilena dan elastomer etilena-propilena-diena terpolimer (EPDM).

2.3.1 Polipropilena

Polipropilena (PP) merupakan polimer hidrokarbon linier hasil reaksi polimerisasi dari propilena yang dapat dinotasikan sebagai C_nH_{2n} . Reaksi polimerisasi propilena diilustrasikan pada Gambar 2.6. Polipropilena ditemukan pertama kali oleh Giulio Natta (Italia) dengan melanjutkan penelitian Karl Ziegler (Jerman) pada tahun 1954. Makromolekul polipropilena terdiri dari 10.000 sampai 20.000 unit monomer [23].



Gambar 2.6 Polimerisasi propilena menjadi polipropilena [24].

Polipropilena termasuk polimer termoplastik dengan kerapatan sebesar 0,9 g/cm³. Polimer jenis ini terdiri dari makromolekul dengan rantai linear atau bercabang yang menyatu bersama dalam ikatan antarmolekul. Polimer jenis termoplastik tidak memiliki ikatan silang (*cross-link*).

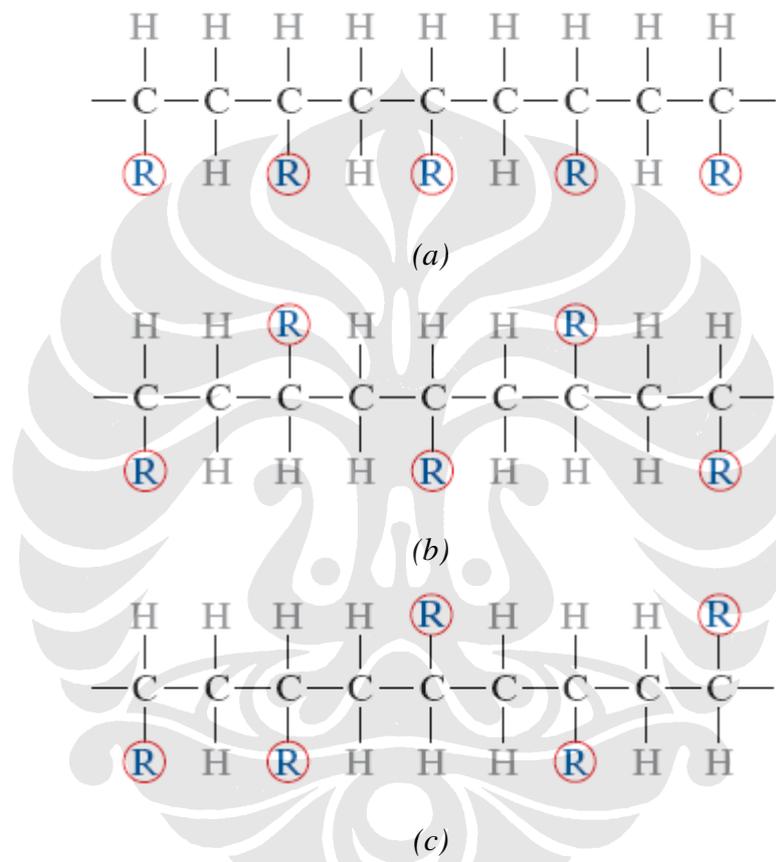
Kristalinitas polipropilena yang cukup tinggi berperan pada tingginya kekuatan tarik, kekakuan, dan kekerasan polipropilena. Besarnya perbandingan antara kekuatan terhadap berat polipropilena memberikan keuntungan dalam aplikasinya. Beberapa sifat mekanik polipropilena dapat dilihat pada Tabel 2.4 berikut ini.

Tabel 2.4 Sifat-sifat PP [25, 26].

Sifat-Sifat	Keterangan
Kerapatan	0,89 – 0,92 g/cm ³
Titik Leleh	160 – 170 °C
Kekuatan Tarik	31 – 38 MPa
Elongasi	200 – 700 %
Modulus Tekuk	1.170 – 1.730 MPa
Temp. Transisi Gelas	-35 – 26 °C
Penyusutan cetakan	0,015 – 0,025 cm/cm

Rantai molekul polipropilena adalah linier, sehingga dapat disusun teratur dalam struktur kristalnya. Tetapi karena adanya gugus samping, maka keteraturan susunannya tidak sempurna. Oleh karena itu, polipropilena disebut polimer semikristalin.

Susunan stereoregular polipropilena terbagi menjadi tiga jenis (Gambar 2.7). Bila gugus metil berada pada sisi yang sama dalam rantai utama, maka susunan tersebut dinamakan polipropilena *isotaktik*. Bila gugus metil berada pada posisi berselang-seling dalam rantai utama, maka disebut polipropilena *sindiotaktik*. Sedangkan bila gugus metil terletak secara acak, maka disebut sebagai polipropilena *ataktik* [27]. Polipropilena komersial umumnya terdiri dari 95-98% isotaktik dan selebihnya ataktik.



Gambar 2.7 Susunan stereoregular polipropilena: (a) isotaktik, (b) sindiotaktik, (c) ataktik [27].

Polipropilena sangat populer dalam dunia industri dan diproduksi secara luas melalui proses polimerasi monomer propilena dengan menggunakan katalis stereospesifik Ziegler-Natta. Katalis ini disebut stereospesifik karena mengontrol posisi gugus samping, yaitu gugus metil dalam tiap unit propilena pada rantai polimer. Kebanyakan polipropilena komersial yang diproduksi bersifat isotaktik [23].

Selain sifat mekaniknya yang baik, polipropilena juga memiliki ketahanan terhadap suhu tinggi dan daya tahan yang baik terhadap pelarut organik, agensia peluruh, serangan elektrolitik, serta larutan asam-basa. Diambah lagi, sifat viskoelastik polimer membuat material ini mudah dibentuk. Dengan demikian, biaya pembuatan material polimer relatif lebih murah daripada material lain.

Polipropilena yang diproduksi secara komersial dan beredar di pasaran dapat digolongkan ke dalam tiga jenis seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.5, yaitu homopolimer, kopolimer acak, dan kopolimer blok. Dimana material yang digunakan sebagai gabungan untuk membentuk kopolimer adalah etilena. Kopolimer blok digunakan untuk aplikasi yang melibatkan ketahanan impact. Kopolimer ini umumnya dipakai dalam proses cetak injeksi. Kopolimer acak memiliki transparansi yang baik dan digunakan dalam pembuatan film.

Tabel 2.5 Jenis-jenis polipropilena.

Urutan Monomer	Nama Produk
PPPPPPPPPPPPPPPPPPPP	Homopolimer Polipropilena
PPEPPPPPEPPPPPE	Kopolimer Acak Polipropilena
PPPPPPPPP + EPEPEPEPEP	Kopolimer Blok Polipropilena
PPPPPPP + EPEPEPEP + EEEEEEE	

(Keterangan: **P** = Propilena dan **E** = Etilena)

2.3.2 Etilena-Propilena-Diena Terpolimer (EPDM)

Ketangguhan komposit polimer berpengisi dapat ditingkatkan dengan meningkatkan ketangguhan matriks, mengoptimalkan ikatan antarmuka dan antarfasa antara pengisi dengan matriks melalui penambahan zat penggabung (*coupling agents*) dan *compatibilizer*, serta mengoptimalkan sifat-sifat yang berhubungan dengan pengisi, seperti jenis pengisi, ukuran partikel, dan dispersi partikel. Salah satu polimer yang sering digunakan dan sangat efektif untuk meningkatkan ketangguhan komposit sekaligus sebagai *impact modifier* adalah kopolimer etilena-propilena atau etilena-propilena-diena terpolimer (EPDM) [28]. Penambahan polimer pelembut seperti EPDM mampu meningkatkan elongasi dan

ketahanan impak, sebaliknya memberi dampak negatif pada kekuatan tarik (*tensile*) dan tekuk (*flexural*) [29].

Sebagai elastomer non-polar, karet ini memiliki ketahanan elektrik yang baik, juga tahan terhadap pelarut polar, seperti air, asam, alkali, ester fosfat, dan berbagai jenis keton serta alkohol. EPDM amorf memiliki kelenturan yang baik dengan temperatur transisi gelas sekitar 60 °C [30].

Karet sintetik ini cocok untuk aplikasi luar karena memiliki ketahanan yang baik terhadap ozon, oksidan, dan cuaca. Karakteristik lain dari EPDM adalah memiliki stabilitas warna yang baik, tahan terhadap panas, dan mutu dielektrik. Karet ini memiliki kekuatan tarik dan daya kenyal yang lebih rendah dari karet alam dan poli-isoprena. Dalam aplikasi yang mengalami kontak dengan produk turunan minyak bumi, EPDM tidak direkomendasikan. Secara umum EPDM tidak tahan terhadap pelarut dan hidrokarbon aromatik [31].

EPDM cenderung bersifat konduktif apabila ditambahkan karbon hitam dalam campurannya [31]. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan EPDM sebagai bahan aditif ke dalam campuran komposit polipropilena-karbon. Dispersi bahan pengisi ke dalam EPDM tergantung pada empat sifat utama EPDM, yaitu kandungan etilena, berat molekul, distribusi berat molekul dan tingkat percabangan [32]. Tabel 2.6 berikut ini menunjukkan sifat-sifat EPDM secara umum.

Table 2.6 Sifat-sifat EPDM [33].

Sifat-Sifat	Keterangan
Kerapatan	0,90 – 2,00 g/cm ³
Kekuatan Tarik	25 MPa
Kekerasan (<i>Shore A</i>)	40 – 90 A
Ketahanan Abrasi	450 mm ³
Temperatur Transisi Gelas	-54 °C

2.4 BAHAN PENGISI KONDUKTIF

Konduktivitas komposit berpengisi tergantung pada jenis bahan pengisi, jumlah muatan pengisi, dan kualitas dispersi bahan pengisinya. Berbagai jenis partikel logam, partikel non-logam yang dilapisi logam, grafit, serat karbon, dan karbon hitam dapat digunakan sebagai bahan pengisi dengan tujuan untuk meningkatkan konduktivitas listrik dan konduktivitas panas [29].

Karbon banyak digunakan sebagai penguat pada material komposit selain untuk meningkatkan konduktivitas, juga untuk memperbaiki sifat mekanik komposit. Secara signifikan serat karbon atau grafit mampu meningkatkan kekuatan dan kekakuan plastik [20]. Pada penelitian ini, material yang dipilih sebagai bahan pengisi adalah karbon dalam tiga bentuk berbeda, yaitu karbon hitam, serat karbon, dan grafit sintetik. Berdasarkan kombinasi, gaya, orientasi, dan bentuk dari ketiga jenis pengisi tersebut, terbentuklah suatu komposit hibrida serat-partikulat seperti terlihat pada Gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 Komposit hibrida serat-partikulat (*fiber-particulate hybrids*) [21].

2.4.1 Karbon Hitam

Karbon hitam adalah padatan karbon amorf yang dibentuk dengan proses deposisi dari partikel padat dalam fasa gas. Karbon hitam memiliki ukuran partikel yang sangat halus. Sifat-sifat karbon hitam adalah suatu fungsi dari sumber “bahan bakar” manufaktur dan jenis proses pembakaran yang digunakan. Karbon hitam digolongkan berdasarkan kemampuan mewarnai suatu luas permukaan, ukuran partikel utama, “struktur” (jumlah partikel utama yang menyatu membentuk partikel skunder), dan konduktivitasnya. Aplikasi karbon hitam dalam dunia polimer antara lain digunakan untuk zat pewarna, proteksi ultra violet, campuran pada plastik konduktif, campuran pada karet, peningkat aliran elektron, penghilang listrik statik dalam partikel non-konduktif, dan sebagai bahan penguat polimer [34].

2.4.2 Grafit Sintetik

Grafit digolongkan menjadi dua jenis, yaitu alami dan sintetik. Grafit sintetik lebih murni dibandingkan grafit alami. Grafit sintetik merupakan produk yang dibuat dari material karbon amorf melalui proses perlakuan temperatur-tinggi. Grafit digunakan sebagai bahan pengisi khususnya dalam matriks polimer karena memiliki konduktivitas listrik dan panas yang baik, serta memiliki sifat-sifat pelumasan (*lubricant*). Karena strukturnya yang berlapis, grafit memberi sifat kekakuan dan dimensi yang stabil terhadap polimer [29].

Grafit sintetik digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti pengecoran logam, karbon elektrik, pelat bipolar *fuel cell*, pelapisan, proses elektrolitik, sebagai bahan pengisi konduktif, campuran karet dan plastik, serta untuk aplikasi pemboran. Partikel grafit sintetik berukuran 2 μm (bubuk) sampai 2 cm (potongan-potongan) dengan kandungan 99% karbon [35]. Tabel 2.7 di bawah ini menunjukkan sifat-sifat umum grafit.

Tabel 2.7 Sifat-sifat umum grafit [29].

Sifat-Sifat	Keterangan
Komposisi Kimia	C (80-99,7%), Fe ₂ O ₃ < 0,2%
Kerapatan	2- 2,25 gr\cm ³
Titik Lebur	4027 - 4427 °C
Kapasitas Panas	8,517 (25 °C) J.mol ⁻¹ .K ⁻¹
Konduktivitas Panas	200 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Kekerasan	1 - 2 Mohs scale
Hambatan Volume	800 – 2500 Ωcm
Warna	Hitam keabu-abuan
Struktur Kristal	Hexagonal

2.4.3 Serat Karbon

Serat karbon disintesis dari rayon, poliakrilonitril (PAN), dan *pitch* dengan menghilangkan hidrogen dan nitrogen dalam kondisi atmosfer inert. Perbandingan sifat ketiga jenis serat karbon tersebut disajikan dalam Tabel 2.8. Serat karbon

yang diproduksi dari poliakrilonitril (PAN) melalui tiga tahap proses, yaitu stabilisasi (peregangan dan oksidasi), karbonisasi (pemanasan untuk mengurangi O, H, N), dan grafitisasi (meningkatkan modulus elastisitas).

Tabel 2.8 Sifat serat karbon berdasarkan bahan dasarnya [21].

Sifat-Sifat	Pitch	Rayon	PAN
Kekuatan Tarik (Gpa)	1,55	2,06-2,75	2,5-3,2
Modulus Tarik (Gpa)	370	380-550	210-400
<i>Short Beam Shear</i> (Mpa)			
- <i>untreated</i>	41	28	28-68
- <i>treated</i>	68	56	56-120
Berat Spesifik	2,0	1,7	1,8
Elongasi (%)	1	-	1,2-0,6
Diameter Serat (μm)	-	6,5	7,5

Berdasarkan bahan baku dan kondisi pemrosesan dihasilkan empat jenis kualitas serat karbon yang dibedakan berdasarkan kekuatannya, seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.9. Biasanya permukaan serat dioksigenasi sebagian dan diperkecil untuk meningkatkan dispersi dan pembasahan (*wetting*) pada proses lebih lanjut. Potongan serat karbon tersedia dalam ukuran 0,5 - 6 mm. Serat karbon memiliki kekuatan, ketahanan kimia, dan konduktivitas listrik serta konduktivitas panas yang sangat baik. Nilai koefisien muai panas linier dalam arah serat adalah negatif, sehingga efek ini dapat digunakan untuk mencegah penyusutan material komposit. Sistem komposit serat karbon menunjukkan performa yang bagus, sehingga secara luas digunakan dalam berbagai aplikasi [29].

Tabel 2.9 Jenis-jenis serat karbon [29].

Sifat-Sifat	Low “M” HT Pitch	Intermedia te “M” PAN	High “M” Pitch, PAN	Ultra High “M” Pitch, PAN
Kerapatan (g/cm ³)	1,78	1,76 – 1,80	1,79 – 1,90	1,90 – 2,0
Kekerasan (Mohs)	1	1	1	1
Modulus (Mpa)	240	325	400	450
Kekuatan Tarik (Mpa)	4300	5000	2400	3500
Konduktivitas Panas (W/mK)	17	17	115	-
Koefisien Muai Panas	-0,1	-0,1	-0,5	-
Panas Spesifik	710	710	710	
Hambatan Volume	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$0,9 \times 10^{-3}$	-

(Keterangan: “M” = Modulus)

2.5 ADITIF ANTIOKSIDAN

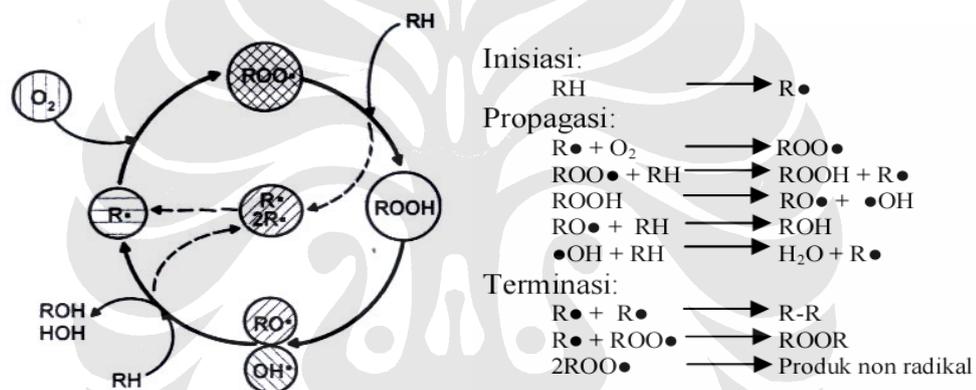
Seperti polimer pada umumnya, kelemahan utama polipropilena adalah mudah mengalami degradasi akibat reaksi oksidasi atau karena pengaruh cahaya, panas, atmosfer, dan lingkungan. Oksidasi pada polimer dapat terjadi saat proses pembentukan resin, pemrosesan resin, penyimpanan resin, penyimpanan produk jadi, dan pada saat produk polimer itu digunakan.

Proses degradasi menghasilkan radikal bebas yang dapat merusak rantai molekul secara berkesinambungan sehingga kualitas polimer akan terus menurun. Degradasi akibat oksidasi dapat dikurangi dan dicegah dengan menggunakan zat aditif antioksidan.

Material polimer yang telah mengalami degradasi akan mengalami oksidasi dengan sendirinya (auto-oksidasi), membentuk radikal peroksida, kemudian radikal ini akan merusak rantai polimer lain, sehingga proses perusakannya akan terus-menerus terjadi. Siklus auto-oksidasi dan tahapan degradasi ditunjukkan pada Gambar 2.9.

Degradasi bisa menyebabkan terjadinya ikatan-silang ataupun pemutusan rantai pada polimer. Pemutusan rantai menyebabkan berat molekul turun sehingga aliran leleh (*melt flow*) tinggi dan mengurangi kekuatan tarik. Kerusakan ini dapat teramati dengan adanya perubahan warna, berkurangnya kekilapan dan kejernihan. Dampak yang lebih buruk yaitu berupa penurunan kekuatan, kekakuan, dan fleksibilitas [36].

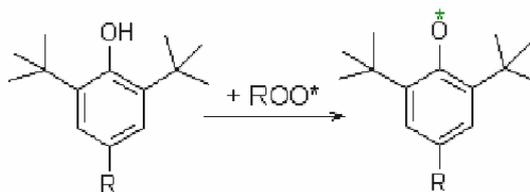
Tahapan degradasi yang pertama adalah inisiasi, pada tahap ini radikal bebas menginisiasi terjadinya reaksi oksidasi. Tahap kedua adalah propagasi, radikal bebas yang terbentuk akan bereaksi dengan oksigen dan diakhiri dengan tahap terminasi atau tahap pengakhiran dari reaksi oksidasi.



Gambar 2.9 Siklus auto-oksidasi [29].

(Keterangan: RH = rantai polimer, * = radikal, -OH = hidroksida, -OO- = peroksida, -OOH = hidro peroksida, -OR = alkoksi)

Antioksidan dibagi menjadi dua jenis menurut fungsi mekanisme pencegahan oksidasi yaitu antioksidan primer dan antioksidan sekunder. Antioksidan primer berfungsi mendonasikan hidrogen ke reaksi radikal bebas peroksida untuk mencegah tahap propagasi.



(Keterangan: R = rantai polimer, In = pendonor H, * = radikal)

Antioksidan sekunder menghambat oksidasi dengan menyiapkan proliferasi alkoksi dan radikal hidroksi dengan mengurangi hidroperoksida menjadi produk yang tidak reaktif.



(Keterangan: R =rantai polimer, P = fosfor, X = senyawa organik)

Kombinasi kedua antioksidan menghasilkan perpaduan yang sinergi. Antioksidan primer memiliki tiga tipe yaitu amina, fenolik, dan garam logam. Tipe fenolik adalah jenis yang lebih umum digunakan, contohnya antara lain bisfenolik, polifenolik dan tiobisfenolik. Contoh amina adalah dari jenis arilamina. Sedangkan jenis antioksidan sekunder berupa organofosfor, tioester dan metal deaktivator [36].

2.6 FAKTOR YANG MEMPENGARUHI SIFAT-SIFAT KOMPOSIT

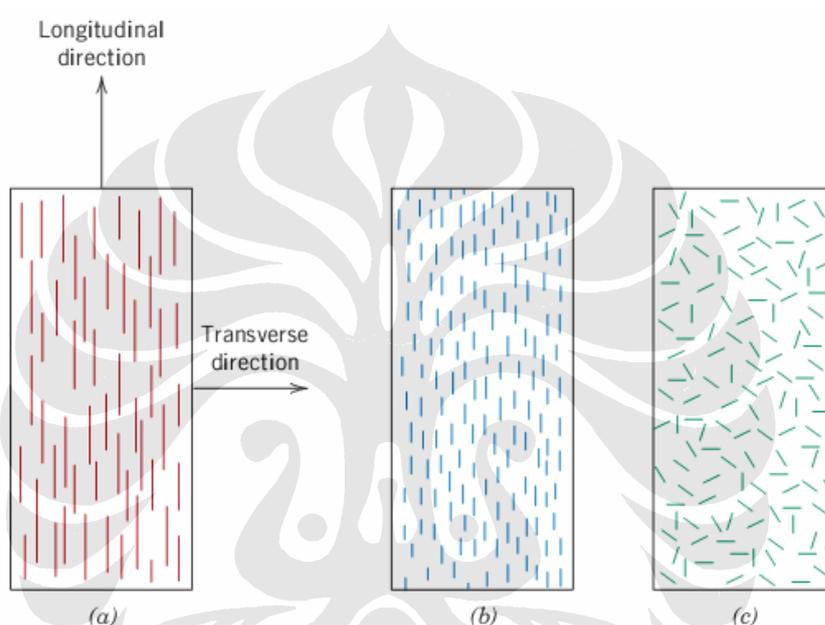
Beberapa faktor yang mempengaruhi kualitas komposit polimer-karbon antara lain orientasi dan konsentrasi pengisi, daya pembasahan, antarmuka dan antarfasa antara matriks dan penguat.

2.6.1 Pengaruh Orientasi dan Konsentrasi Pengisi

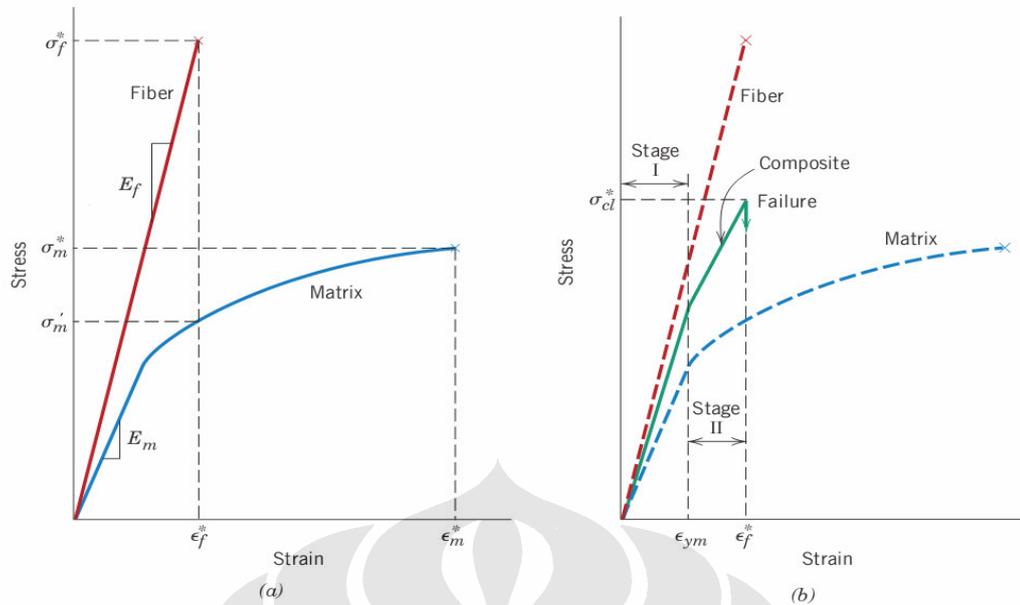
2.6.1.1 Sifat Mekanik

Faktor utama yang harus dipertimbangkan dalam menentukan karakteristik komposit yang ingin difabrikasi adalah perbandingan jumlah antara matriks dan pengisi. Perbandingan ini dapat ditunjukkan dalam bentuk fraksi volume pengisi (V_f) untuk menghitung nilai kekuatan komposit secara total. Umumnya

penambahan pengisi bertujuan untuk meningkatkan kekuatan, semakin banyak fraksi volume pengisi yang ditambahkan maka kekuatan komposit akan semakin tinggi. Dalam hal ini performa komposit dianggap optimum, sehingga arah serat diasumsikan terorientasi sejajar pada arah longitudinal. Skema orientasi serat dan skema kurva tegangan-regangan untuk komposit berpenguat serat terjajar yang diberi beban tegangan searah penjajaran (arah longitudinal) secara berurutan ditunjukkan pada Gambar 2.10 dan Gambar 2.11.



Gambar 2.10 Orientasi pengisi pada komposit berpenguat serat: (a) panjang dan searah, (b) pendek dan searah, (c) pendek dan acak [27].



Gambar 2.11 (a) Skema kurva tegangan-regangan untuk material serat getas dan matriks ulet. Perpatahan tegangan dan regangan untuk kedua material terlihat. (b) Skema kurva tegangan-regangan untuk komposit berpenguat serat terjajar yang diberi beban tegangan searah penjajaran (arah longitudinal) [27].

Jika komposit diberikan beban (*stress*) sampai mengalami regangan yang sama besar antara matriks dengan pengisi (*isostrain*), maka besar pembebanan yang dibutuhkan adalah sebesar pembebanan yang harus dilakukan pada matriks terhadap fraksi volumenya dan pembebanan yang harus dilakukan pada pengisi. Hal ini dapat dirumuskan menjadi:

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \dots\dots\dots (2.3)$$

Untuk mempermudah analisis kekuatan suatu komposit, ikatan serat dan matriks diasumsikan terjadi secara sempurna. Pergeseran antara serat dan matriks dianggap tidak ada dan deformasi serat sama dengan deformasi matriks. Hal ini dapat dirumuskan:

$$\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f \dots\dots\dots (2.4)$$

Sehingga pembebanan terhadap komposit secara total dapat dituliskan dengan persamaan:

$$\frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} V_m + \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} V_f \dots\dots\dots(2.5)$$

Nilai $\sigma / \varepsilon = E$, sehingga persamaan modulus elastisitas dari komposit berpenguat serat panjang dan lurus pada arah longitudinal, E_{cl} , menjadi:

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f \dots\dots\dots(2.6)$$

Pada komposit berpengisi serat pendek dan terorientasi secara acak, seperti serat karbon yang dipakai dalam penelitian ini, maka nilai kekuatannya tergantung pada nilai parameter efisiensi serat (K).

$$E_{cd} = KE_f V_f + E_m V_m \dots\dots\dots(2.7)$$

Nilai parameter efisiensi ini tergantung pada V_f dan rasio E_f / E_m . Besar nilai K akan lebih kecil dari satuan, biasanya pada rentang 0,1 sampai 0,6 [27].

Berdasarkan persamaan di atas, dapat dilihat bahwa fraksi volume pengisi berbanding lurus dengan kekuatan komposit secara total. Nilai K , E_f , dan E_m merupakan konstanta, sedangkan nilai $V_f = (1 - V_m)$. Oleh sebab itu, jika pengisi bersifat menguatkan, maka semakin besar nilai fraksi volume pengisi akan membuat kekuatan komposit secara total akan meningkat.

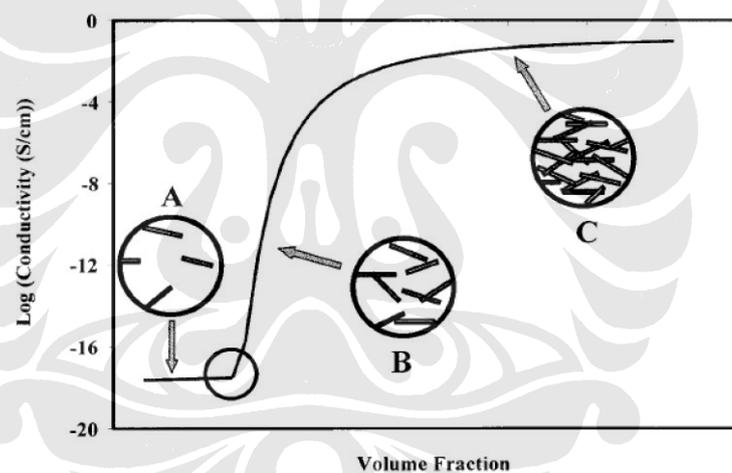
2.6.1.1 Sifat Konduktivitas Listrik

Polimer pada dasarnya bersifat insulator, dan nilai konduktivitasnya kira-kira $10^{-14} - 10^{-17}$ S/cm (Tabel 2.10). Konduktivitas material polimer dapat ditingkatkan dengan menambahkan karbon konduktif, seperti serat karbon, karbon hitam, dan grafit sintetik membentuk material komposit. Akan tetapi, konduktivitas komposit bergantung pada konsentrasi, orientasi, bentuk, ukuran, dan sifat-sifat dari pengisi konduktif yang dipakai. Dispersi partikel dan bentuk jaringan kontinyu dari bahan pengisi konduktif juga berpengaruh pada sifat konduktivitas. Di sisi lain, sering dihasilkan material komposit yang sifat-sifat mekaniknya dari lebih buruk dari material-material penyusunnya.

Tabel 2.10 Nilai konduktivitas untuk jenis material yang berbeda.

Material	Konduktivitas (S/cm)
Polimer	$10^{-14} - 10^{-17}$
Karbon Konduktif	$10^2 - 10^5$
Logam	10^6

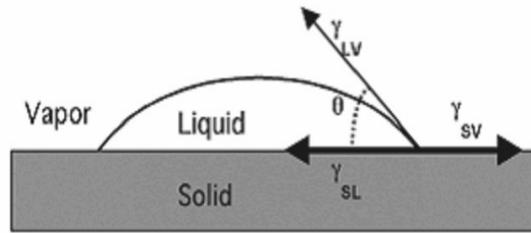
Gambar 2.12 berikut menggambarkan kecenderungan kurva konduktivitas komposit dengan tiga fraksi volume berbeda A, B, dan C. Pada muatan pengisi yang rendah (A), nilai konduktivitas komposit masih mendekati nilai konduktivitas matriks polimer. Akan tetapi, pada beberapa muatan yang kritis (C), konduktivitas meningkat teratur dengan peningkatan yang sangat sedikit.



Gambar 2.12 Ketergantungan nilai konduktivitas pada fraksi volume pengisi [1].

2.6.2 Daya Pembasahan

Daya pembasahan (*wettability*) adalah kemampuan suatu cairan membasahi suatu permukaan padat dengan sempurna. Pembasahan atau *wetting* terjadi jika ada kesetimbangan tiga tegangan permukaan, sehingga cairan dapat menyebar dan membasahi permukaan padatan [37], seperti ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Kestimbangan tiga tegangan permukaan dalam kondisi *wetting* tetes cairan pada permukaan padat. Skema sudut kontak θ dan energi permukaan γ_{SL} , γ_{SV} , γ_{LV} [38, 39].

Kestimbangan energi pada sistem ditunjukkan dalam persamaan Young [40, 41]:

$$\gamma_{SL} - \gamma_{SV} + \gamma_{LV} \cos \theta = 0 \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana:

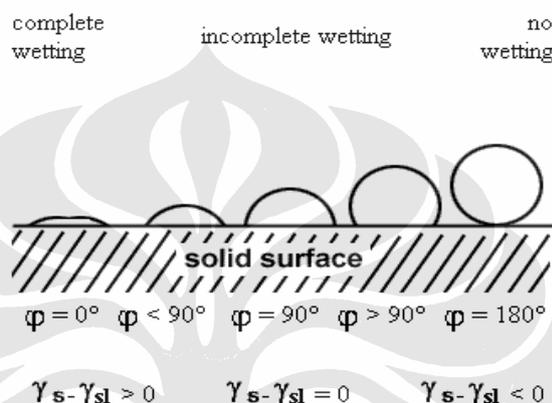
- γ_{SL} = tegangan permukaan antara padatan dan cairan
- γ_{SV} = tegangan permukaan antara padatan dan uap
- γ_{LV} = tegangan permukaan antara cairan dan uap
- θ = sudut kontak antara cairan dan permukaan padat

Sudut θ merupakan indikator daya pembasahan. Besar sudut θ berada pada rentang $0 - 180^\circ$. Apabila sudut θ kurang dari 90° ($\theta < 90^\circ$), maka dapat dikatakan terjadi pembasahan sempurna. Sebaliknya apabila sudut θ lebih dari 90° ($\theta > 90^\circ$), maka tidak terjadi pembasahan sempurna. Daya pembasahan berdasarkan besar sudut kontak secara skematis diilustrasikan pada Gambar 2.14.

Parameter lain yang digunakan untuk mengukur daya pembasahan adalah koefisien penyebaran (*spreading coefficient / SC*). Pembasahan terjadi apabila SC bernilai positif. SC dirumuskan dengan persamaan:

$$SC = \gamma_{SV} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LV}) \dots\dots\dots (2.9)$$

Berdasarkan dua persamaan tersebut dapat diketahui bahwa sudut kontak $\theta < 90^\circ$ merepresentasikan pembasahan yang sempurna ($\gamma_{sv} > \gamma_{sl}$) dan merupakan gaya pendorong untuk terjadinya penyebaran atau pemerataan tegangan permukaan. Dengan $\theta < 90^\circ$, energi antar permukaan (*interfacial energy*) akan tinggi, sedangkan tegangan permukaannya akan cenderung kecil sehingga gaya adhesi akan lebih besar daripada gaya kohesinya [37, 38].



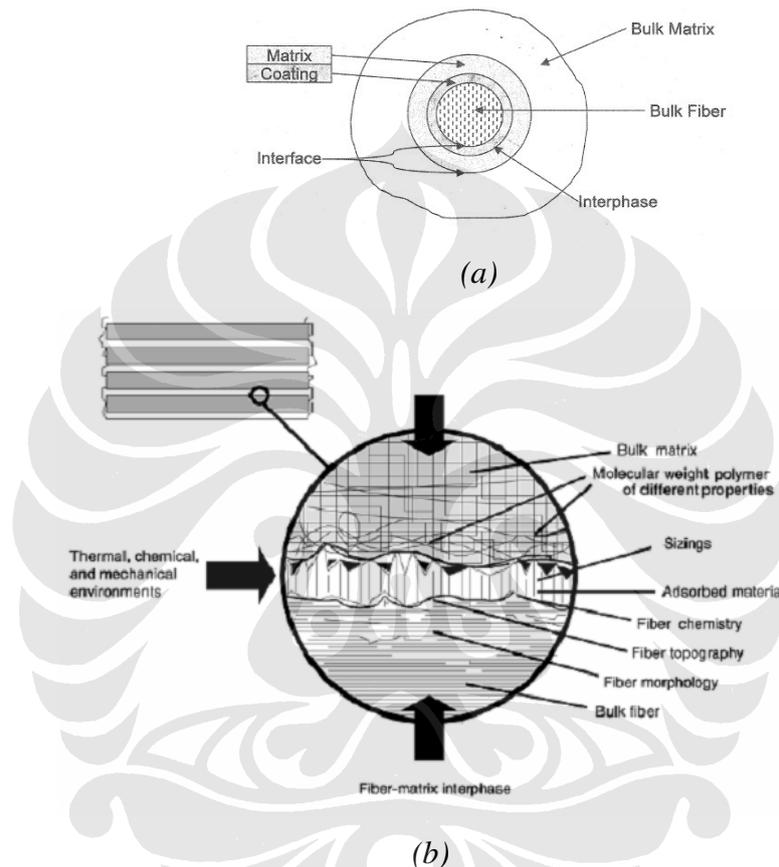
Gambar 2.14 Daya pembasahan berdasarkan besar sudut kontak (φ) [42].

Hal inilah yang menjadi faktor utama dihasilkannya material komposit dengan keterpaduan yang baik. Keterpaduan suatu komposit dikatakan baik apabila di seluruh bagian pengisi dibasahi oleh matriks dengan sempurna. Pada prinsipnya, energi permukaan yang relatif sama antara matriks dan pengisi akan menghasilkan tegangan permukaan yang relatif kecil sehingga terjadi pembasahan yang sempurna. Akan tetapi, energi permukaan tidak hanya dipengaruhi oleh daya pembasahan. Faktor lain yang turut mempengaruhi besarnya energi permukaan adalah struktur kimia, komposisi kimia, kepolaran, dan adhesivitas.

2.6.3 Antarmuka dan Antarfasa

Antarmuka (*interface*) adalah sebuah permukaan yang terbentuk bersama antara serat penguat dan matriks yang bersentuhan melalui ikatan antara keduanya dan mempertahankan ikatan tersebut terhadap transfer beban [39]. Secara skematis antarmuka komposit diilustrasikan pada Gambar 2.15. Ikatan yang terjadi pada antarmuka terbentuk saat permukaan penguat terbasahi oleh

matriks [40]. Antarmuka yang pada komposit berfungsi sebagai penerus beban antara matriks dan penguat [41]. Perilaku perpatahan pada komposit juga bergantung pada kekuatan antarmuka. Ikatan antarmuka yang lemah akan mengakibatkan kekuatan dan kekakuan yang lemah. Sebaliknya, ikatan antarmuka yang kuat akan mengakibatkan kekuatan dan kekakuan yang tinggi [40].

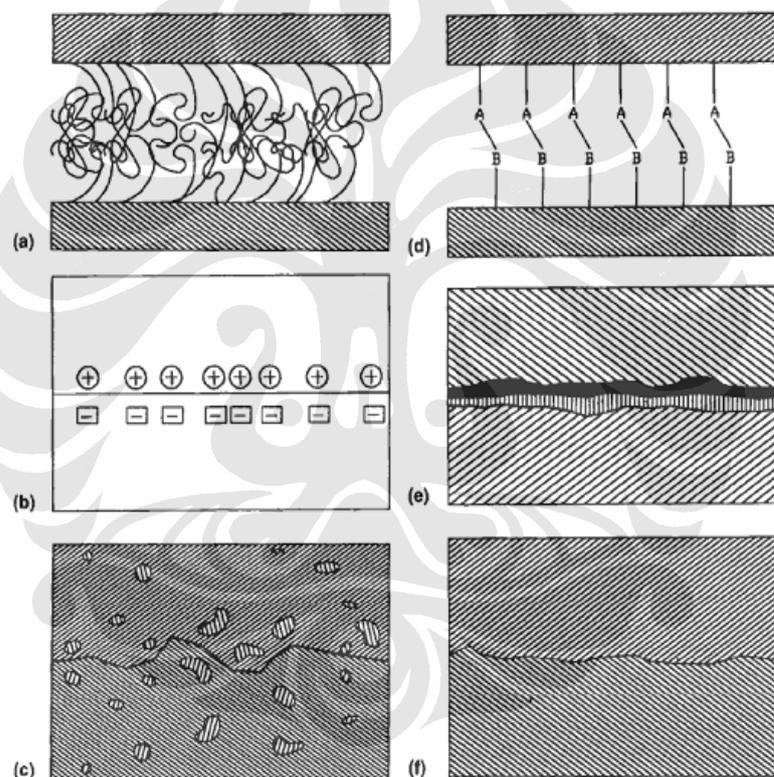


Gambar 2.15 (a) Skema antarmuka dan antarfasa, (b) Beberapa faktor yang mempengaruhi proses pembentukan antarfasa [21, 41].

Konsep dua dimensi antarmuka lebih lanjut menjadi tiga dimensi yang disebut antarfasa (*interphase*), yaitu fasa antar matriks dan serat dengan ketebalan tertentu yang sifat fisik, kimia, dan morfologinya berbeda dari material ruah (*bulk materials*)-nya. Antarfasa merupakan daerah matriks yang dipengaruhi oleh adanya penguat. Sifat fisik dan kimia penguat tersebut akan merubah bentuk lokal matriks pada daerah antarfasa. Karena perubahan mikrostruktur seringkali

mengakibatkan perubahan sifat mekanik, maka adanya antarmuka dapat memberikan pengaruh yang besar terhadap sifat-sifat komposit [43].

Ikatan kimia dan fisika terbentuk pada antarmuka saat matriks dan permukaan serat penguat saling bersentuhan. Gugus kimia permukaan penguat dapat bereaksi dengan gugus kimia yang ada pada matriks membentuk ikatan kimia maupun ikatan fisika, seperti gaya Van der Waals, ikatan hidrogen, dan ikatan elektrostatis. Jenis dan banyaknya masing-masing ikatan tersebut secara kuat mempengaruhi daya ikat antara matriks dan serat. Gambar 2.16 berikut ini menunjukkan skema bentuk ikatan antarmuka.



Gambar 2.16 Skema bentuk ikatan antarmuka: (a) penjeratan antar molekul, (b) gaya tarik elektrostatis, (c) interdifusi unsur-unsur, (d) reaksi kimia antar gugus, (e) reaksi kimia membentuk senyawa baru terutama pada komposit bermatriks logam, (f) penguncian mekanik [39].