



UNIVERSITAS INDONESIA

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI PELAT BIPOLAR SEL
BAHAN BAKAR DENGAN MATERIAL POLIPROPILENA,
NANOPARTIKEL TEMBAGA, DAN KARBON GRAFIT**

SKRIPSI

AMIN ILYAS

040504009Y

**FAKULTAS TEKNIK
METALURGI DAN MATERIAL
PROGRAM STUDI POLIMER
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI PELAT BIPOLAR SEL
BAHAN BAKAR DENGAN MATERIAL POLIPROPILENA,
NANOPARTIKEL TEMBAGA, DAN KARBON GRAFIT**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelas sarjana teknik

AMIN ILYAS

040504009Y

**FAKULTAS TEKNIK
METALURGI DAN MATERIAL
PROGRAM STUDI POLIMER
DEPOK
JUNI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar

Nama : Amin Ilyas

NPM : 040504009Y

Tanda Tangan :



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Amin Ilyas

NPM : 040504009Y

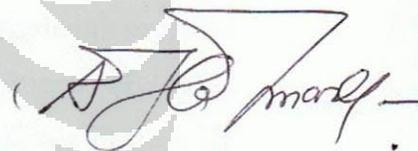
Program Studi : Metalurgi dan Material (Polimer)

Judul Skripsi : Sintesis dan Karakterisasi Pelat Bipolar Sel Bahan Bakar dengan Material Polipropilena, Nanopartikel Tembaga dan Karbon Grafit

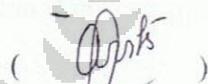
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1 : Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono, M.Phil.Eng



Pembimbing 2 : Dra. Sari Katili, MS



Penguji 1 : Dr. Ir. Sutopo, MSc.



Penguji 2 : Mochamad Chalid, SSi., MSc.



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 11 Juli 2011

KATA PENGANTAR /UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Saya menyadari bahwa, tanpa bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono, M.Phil.Eng dan Dra. Sari Katili, MS selaku dosen pembimbing yang telah memberikan kepercayaan kepada saya untuk turut serta dalam proyek penelitian pelat bipolar, yang kemudian menjadi topik skripsi saya, serta menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Prof. Dr. Ir. Eddy S Siradj, M.Sc (Eng) selaku pembimbing akademik saya;
- (3) Bapak Subhan (LIPI Fisika PUSPIPTEK), Bapak Wisnu (BATAN PUSPIPTEK), Bapak Agus (PNJ) dan pihak Laboratorium Kimia FMIPA UI yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh bahan dan data yang saya perlukan;
- (4) Dimas dan Hesti selaku rekan satu tim dalam proyek penelitian ini;
- (5) Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan dukungan materil dan moral;
- (6) Sahabat-sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Amin Ilyas
NPM : 040504009Y
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Kekhususan Polimer
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Sintesis dan Karakterisasi Pelat Bipolar Sel Bahan Bakar dengan Material Polipropilena, Nanopartikel Tembaga, dan Karbon Grafit

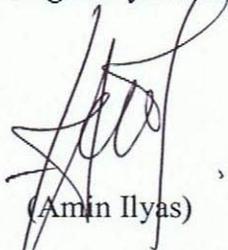
berserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak bebas royalti noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 11 Juli 2011

Yang menyatakan



(Amin Ilyas)

v

ABSTRAK

Nama : Amin Ilyas
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Sintesis dan Karakterisasi Pelat Bipolar Sel Bahan Bakar dengan Material Polipropilena, Nanopartikel Tembaga, dan Karbon Grafit

Produksi masif sel bahan bakar membran polimer (PEMFC) dibatasi oleh harga material yang tinggi serta proses manufaktur yang rumit. Dalam penelitian ini, nanokomposit berbasis polipropilena (PP) dibuat dengan pengisi tembaga nanopartikel (CuNP) dan grafit (G). Tiga jenis nanokomposit, disebut PP/CuNP, CuNP/PP, dan CuNP/PP/G, difabrikasi dengan metode pencampuran kimiawi-basah dan fasa-padat. Kemungkinan penggunaan sampel-sampel sebagai material pelat bipolar diinvestigasi dalam penelitian ini. Hasil-hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kedua jenis pengisi mempengaruhi sifat optis, kelistrikan, dan mekanis dari nanokomposit. Seluruh PP/CuNP, dengan kandungan pengisi tunggal yang tidak dominan, didapati bersifat insulator dengan nilai energi celah pita (E_g) berkisar antara 5,93 – 4,26 eV dan nilai konduktivitas listrik (σ) yang sangat kecil (~ 0 S/cm). Sementara itu, pada CuNP/PP yang fraksi berat pengisi tunggalnya dominan, didapati seluruhnya bersifat semikonduktor dengan nilai E_g dan σ berada pada kisaran 2,24 – 2,34 eV dan 0,13 – 3,38 S/cm. Pada tahapan berikutnya, pengamatan pada nanokomposit hibrida CuNP/PP/G menunjukkan bahwa sebagian nanokomposit bersifat insulator sedangkan yang lainnya bersifat semikonduktor, dengan nilai E_g dan σ berada pada kisaran 1,77 – 11,70 eV dan 0,0005 – 2,65 S/cm.

Kata kunci : PEMFC, pelat bipolar, nanokomposit, tembaga nanopartikel, grafit, polipropilena, energi celah pita, konduktivitas listrik

ABSTRACT

Name : Amin Ilyas
Study Program : Metallurgical and Materials Engineering
Title : Synthesis and Characterizations of Fuel Cell Bipolar Plate Contains Polypropylene, Copper Nanoparticle, and Graphite Materials

The massive production of polymer electrolyte fuel cell (PEMFC) is restricted due to high material cost and complicated manufacturing process. In current research, the polypropylene (PP) based composites has been prepared with copper nanoparticle (CuNP) and graphite (G) as the fillers. Three types of nanocomposites, called PP/CuNP, CuNP/PP, and CuNP/PP/G, were fabricated by both chemical and solid-state mixing methods. The possibilities for bipolar plate material was investigated. The results show that both fillers affected the optical, electrical, and mechanical properties of the nanocomposites. All of PP/CuNPs, which fillers inside were not dominant, were observed as insulators with band gap energy values were in the range of 4.26 – 5.93 eV and very small electrical conductivities ($\sigma = \sim 0$ S/cm). On the contrary, all of CuNP/PPs, which had dominant filler phases, were observed as semiconductors with E_g and σ were in the ranges of 2.24 – 2.34 eV and 0.13 – 3.38 S/cm, respectively. Furthermore, for the CuNP/PP/Gs hybrid nanocomposites, it is found that some of CuNP/PP/Gs were insulators while others were semiconductors with E_g and σ were in the ranges of 1,77 – 11,70 eV and 0.00005 – 2.65 S/cm.

Key words : PEMFC, bipolar plate, nanocomposite, copper nanoparticle, graphite, polypropylene, band gap energy, electrical conductivity

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR /UCAPAN TERIMA KASIH	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Hipotesis	4
1.5. Ruang Lingkup Penelitian	7
1.6. Sistematika Penulisan	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1. Sel Bahan Bakar	8
2.1.1. Definisi	8
2.1.2. Prinsip Kerja dan Klasifikasi	9
2.1.3. Desain, Pemilihan Material, dan Pengembangan	14
2.2. Sel Bahan Bakar Membran Elektrolit Polimer (PEMFC)	16
2.2.1. Keunggulan dan Tantangan	16
2.2.2. Komponen PEMFC dan Mekanisme Kerjanya	18
2.3. Pelat Bipolar PEMFC	20
2.3.1. Definisi dan Fungsi	20
2.3.2. Persyaratan Pelat Bipolar	21
2.3.3. Biaya dan Berat	22
2.3.4. Hambatan Listrik dan Konduktivitas Pelat Bipolar	23
2.3.5. Jenis-jenis Pelat Bipolar	24
2.3.5.1. Pelat Bipolar Grafit Tanpa Pori-Pori	27
2.3.5.2. Pelat Bipolar Logam	27
2.3.5.3. Pelat Bipolar Komposit	28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1. Diagram Alir Penelitian	33
3.2. Peralatan dan Bahan	35
3.3. Material Komposit	36

3.3.1. Matriks: Polipropilena	37
3.3.2. Aditif: PP-g-MA	39
3.3.3. Pengisi 1: Nanopartikel Tembaga	40
3.3.4. Pengisi 2: Grafit	40
3.3.5. Xylene	42
3.4. Penelitian Tahap Pertama	42
3.4.1. Persentase (%) PP Terlarut dalam Xylene	43
3.4.1.1. Fabrikasi Blanko PP/Xylene Rasio 1:6	43
3.4.1.2. Fabrikasi Blanko PP/Xylene Rasio 1:5	44
3.4.1.3. Rekonfirmasi Fabrikasi Blanko PP/ Xylene Rasio 1:5	44
3.4.2. Perbandingan CuNP dengan PP-g-MA	44
3.4.3. Pembuatan bakalan nanokomposit PP/CuNP	45
3.4.4. Pembuatan Sampel Uji Nanokomposit PP/CuNP	46
3.5. Penelitian Tahap Kedua	47
3.5.1. Fabrikasi bakalan nanokomposit CuNP/PP	47
3.5.2. Pembuatan Sampel Uji Nanokomposit CuNP/PP	48
3.6. Penelitian Tahap Ketiga	48
3.6.1. Pembuatan bakalan nanokomposit 50CuNP/PP/G (IIIA)	50
3.6.2. Pembuatan bakalan nanokomposit 60CuNP/PP/G (IIIB)	51
3.6.3. Pembuatan bakalan nanokomposit 70%CuNP/PP/G (IIIC)	51
3.6.4. Pembuatan Sampel Uji Nanokomposit CuNP/PP/G	52
3.7. Karakterisasi dan pengujian	54
3.7.1. Pengujian UV-Spektroskopi	54
3.7.1.1. Tujuan	54
3.7.1.2. Mesin dan Metode Pengujian	54
3.7.1.3. Penghalusan Data Uji UV-Vis dengan PeakFit [®]	56
3.7.1.4. Energi Celah Pita	56
3.7.1.5. Teori Kubelka-Munk	58
3.7.2. Pengujian difraksi sinar-X	60
3.7.2.1. Tujuan	60
3.7.2.2. Mesin dan Metode Pengujian	60
3.7.2.3. Pencarian Puncak dengan Match!	61
3.7.3. Pengujian Konduktivitas Listrik	63
3.7.3.1. Tujuan	63
3.7.3.2. Mesin dan Metode Pengujian	63
3.7.4. Pengujian kekerasan untuk mendapatkan nilai kekuatan tarik	65
3.7.4.1. Tujuan	65
3.7.4.2. Mesin dan Metode Pengujian	65
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	67
4.1. Fabrikasi Nanokomposit	67
4.2. Nanokomposit PP/CuNP	71
4.2.1. Analisis UV-Vis	71
4.2.2. Analisis Uji konduktivitas	77
4.2.3. Analisis Uji Difraksi Sinar-X	79
4.3. Nanokomposit CuNP/PP	84
4.3.1. Analisis UV-Vis	84

4.3.2. Analisis Uji Konduktivitas	87
4.4. Nanokomposit CuNP/PP/G	89
4.4.1. Analisis 50CuNP/PP/G	90
4.4.2. Analisis 60CuNP/PP/G	94
4.4.3. Analisis 70CuNP/PP/G	98
4.4.4. Analisis Uji Kekerasan	103
4.5. Identifikasi CuNP	105
4.6. Identifikasi Grafit	107
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	110
5.1. Kesimpulan	110
5.2. Saran	112
DAFTAR REFERENSI	113
LAMPIRAN-LAMPIRAN	122



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan berbagai teknologi sel bahan bakar yang umum dipakai.	12
Tabel 2.2	Target DOE untuk FCS dengan sistem direct-hydrogen (80 kWe).	17
Tabel 2.3.	Ikhtisar penelitian komposit hibrida untuk aplikasi pelat bipolar.	30
Tabel 3.1.	Parameter proses fabrikasi nanokomposit PP/CuNP	45
Tabel 3.2.	Parameter proses fabrikasi nanokomposit PP/CuNP	47
Tabel 3.3.	Parameter proses fabrikasi nanokomposit CuNP/PP/G	50
Tabel 3.4.	Konversi nilai hambatan jenis ke konduktivitas listrik.	63
Tabel 4.1.	Energi celah pita sampel PP, CuNP, dan PP/CuNP dihitung dengan metode Kubelka-Munk.	75
Tabel 4.2.	Hasil pengukuran konduktivitas sampel CuNP dan PP/CuNP dengan metode in-line four probe.	77
Tabel 4.3.	Kandidat-kandidat fasa dalam sampel-sampel PP dan PP/CuNP diperoleh melalui teknik analisis semi kuantitatif menggunakan Match!.	83
Tabel 4.4.	Energi celah pita sampel CuNP/PP dihitung dengan metode Kubelka-Munk.	86
Tabel 4.5.	Hasil pengukuran konduktivitas sampel CuNP/PP dengan metode in-line four probe.	87
Tabel 4.6	Energi celah pita sampel CuNP/PP dihitung dengan metode Kubelka-Munk.	91
Tabel 4.7.	Hasil pengukuran konduktivitas sampel CuNP/PP dengan metode in-line four probe.	93
Tabel 4.8.	Energi celah pita sampel 60CuNP/PP/G dihitung dengan metode Kubelka-Munk	95
Tabel 4.9.	Hasil pengukuran konduktivitas sampel 60CuNP/PP/G dengan metode in-line four probe.	97
Tabel 4.10	Energi celah pita sampel 70CuNP/PP/G dihitung dengan metode Kubelka-Munk.	99
Tabel 4.11.	Hasil pengukuran konduktivitas sampel CuNP/PP dengan metode <i>in-line four probe</i> .	102
Tabel 4.12.	Kandidat-kandidat fasa dalam sampel CuNP diperoleh melalui teknik analisis semi kuantitatif menggunakan Match!.	106
Tabel B.1.	Standard aplikasi sel bahan bakar.	141

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Mekanisme operasi sel elektrokimia: (a) sketsa baterai, (b) sketsa superkapasitor, dan (c) sketsa sel bahan bakar.	9
Gambar 2.2.	Publikasi dan paten “fuel cells”.	10
Gambar 2.3.	Prinsip kerja dari beberapa jenis sel bahan bakar. (Keterangan: A, anoda; E, elektrolit; dan C, katoda).	11
Gambar 2.4.	Penampang sebuah sistem sel bahan bakar (FCS).	14
Gambar 2.5.	Skema inti sebuah PEMFC: membran elektrolit polimer (MEA).	18
Gambar 2.6.	Skema dasar PEMFC.	19
Gambar 2.7.	Ilustrasi perpindahan gas, proton, dan elektron dalam sebuah elektroda MEA.	20
Gambar 2.8.	Target biaya PEMC (target DOE) a dan asumsi berat komponen (asumsi desain PEMFC 2005) b.	22
Gambar 2.9.	Atas: pengaruh berat resin terhadap konduktivitas dan kekuatan fleksural pelat bipolar komposit epoksi (polimer)/grafit. Bawah: pengamatan dengan scanning electron microscope (SEM) terhadap pelat yang sama, dengan berat resin: (a) 10 wt%, (b) 15 wt%, (c) 20 wt%, dan (d) 30 wt%. 23	3
Gambar 2.10.	Klasifikasi material penyusun pelat bipolar.	25
Gambar 2.11.	Klasifikasi metode fabrikasi pelat bipolar.	26
Gambar 2.12.	Ilustrasi konflik dalam desain pelat bipolar komposit dengan satu jenis fasa terdispersi dalam rangka mendapatkan sifat mekanik dan konduktivitas listrik yang baik.	29
Gambar 2.13.	Variasi nilai konduktivitas listrik sebagai fungsi kandungan pengisi dalam komposit polimer. Atas: (○) karbon hitam, (●) karbon sintetis, dan (■) karbon aktif. Bawah: (○) timah, (●) tembaga, dan (■) seng.	31
Gambar 3.1.	Diagram alir penelitian keseluruhan.	34
Gambar 3.2.	Material penyusun nanokomposit.	36
Gambar 3.3.	Reaksi pembentukan homopolimer polipropilena.	37
Gambar 3.4.	Atas: Penampang mikrostruktur homopolimer PP + 30% serat gelas: (a) tanpa dan (b) ditambah 5% coupling agent. Bawah: Ilustrasi kerja PP-g-MA: satu tangan berikatan dengan PP dan tangan yang lain bergandengan CuNP.	39
Gambar 3.5.	CuNP (carbon coated) diproduksi oleh NaBond Technologies Co., Ltd.	40
Gambar 3.6.	Struktur grafit.	41
Gambar 3.7.	Diagram alir penelitian tahap pertama.	42
Gambar 3.8.	Diagram alir fabrikasi nanokomposit PP/CuNP dengan	46

	teknik kimiawi basah.	
Gambar 3.9.	Diagram alir penelitian tahap ketiga.	49
Gambar 3.10.	Preparasi sampel menggunakan mesin hot press: (1) serbuk nanokomposit, (2) cetakan, (3) serbuk nanokomposit dimasukkan ke dalam cetakan, (4) cetakan berisi serbuk nanokomposit, (5) mesin penekan, dan (6) produk silinder dengan diameter dan tebal rata-rata 2 cm dan 2-5 mm.	53
Gambar 3.11.	Penampang mesin Shimadzu-UV 2450.	54
Gambar 3.12.	Dua jenis pemantulan sinar pada permukaan buram (tidak tembus cahaya): ke satu arah (specular reflection) dan ke banyak arah (diffuse reflection).	55
Gambar 3.13.	Prinsip kerja UV-Vis Shimadzu 2450 dengan sudut datang 0° .	55
Gambar 3.14.	Ilustrasi celah pita pada berbagai material.	57
Gambar 3.15.	Kondisi elektron pada semikonduktor dan insulator sebelum (kiri) dan sesudah (kanan) eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi.	57
Gambar 3.16.	Skema prinsip kerja mesin difraksi sinar-X; T = sumber sinar-X, S = sampel, C = detektor, dan O = sumbu acuan untuk rotasi sampel dan detektor; $2\theta = 10-80^\circ$. Ketika S dan C berputar pada sumbu O mesin merekam intensitas sinar-sinar difraksi sebagai fungsi 2θ .	61
Gambar 3.17.	Kiri: Penampang mesin uji konduktivitas listrik Veeco FPP 5000 metode in-line four point probe. Kanan: Langkah pengukuran hambatan jenis (resistivity) dengan mesin Veeco FPP 500.	64
Gambar 3.18.	Ilustrasi penjejakan dengan metode Brinell.	66
Gambar 4.1.	Blanko PP/Xylene.	68
Gambar 4.2.	Serbuk nanokomposit PP/CuNP.	68
Gambar 4.3.	Serbuk nanokomposit CuNP/PP.	69
Gambar 4.4.	Serbuk nanokomposit 50CuNP/PP/G.	69
Gambar 4.5.	Serbuk nanokomposit 60CuNP/PP/G.	70
Gambar 4.6.	Serbuk nanokomposit 70CuNP/PP/G.	70
Gambar 4.7.	Reflektansi spektrum sampel PP/CuNP dengan variasi wt% CuNP: (a) 0,5; (b) 1; (c) 1,5; (d) 2.	72
Gambar 4.8.	Reflektansi spektrum sampel: (a) 100 wt% CuNP dan (b) 100 wt% PP.	72
Gambar 4.9.	Kurva Kubelka-Munk sampel PP/CuNP dengan variasi wt% CuNP: (a) 0,5; (b) 1; (c) 1,5; dan (d) 2.	74
Gambar 4.10.	Kurva Kubelka-Munk sampel: (a) 100 wt% CuNP; dan (b) 100 wt% PP.	74
Gambar 4.11.	Energi celah pita untuk PP, PP/CuNP, dan CuNP.	75
Gambar 4.12.	Nilai konduktivitas listrik untuk sampel PP/CuNP.	77
Gambar 4.13.	Hasil uji difraksi sinar-X pada sampel PP/Xylene dengan kemungkinan fasa: (a) $C_{24}H_{32}O_7$, (b) $C_{15}H_{13}ClN_2O$, dan (c) $C_{24}H_{18}O$.	80

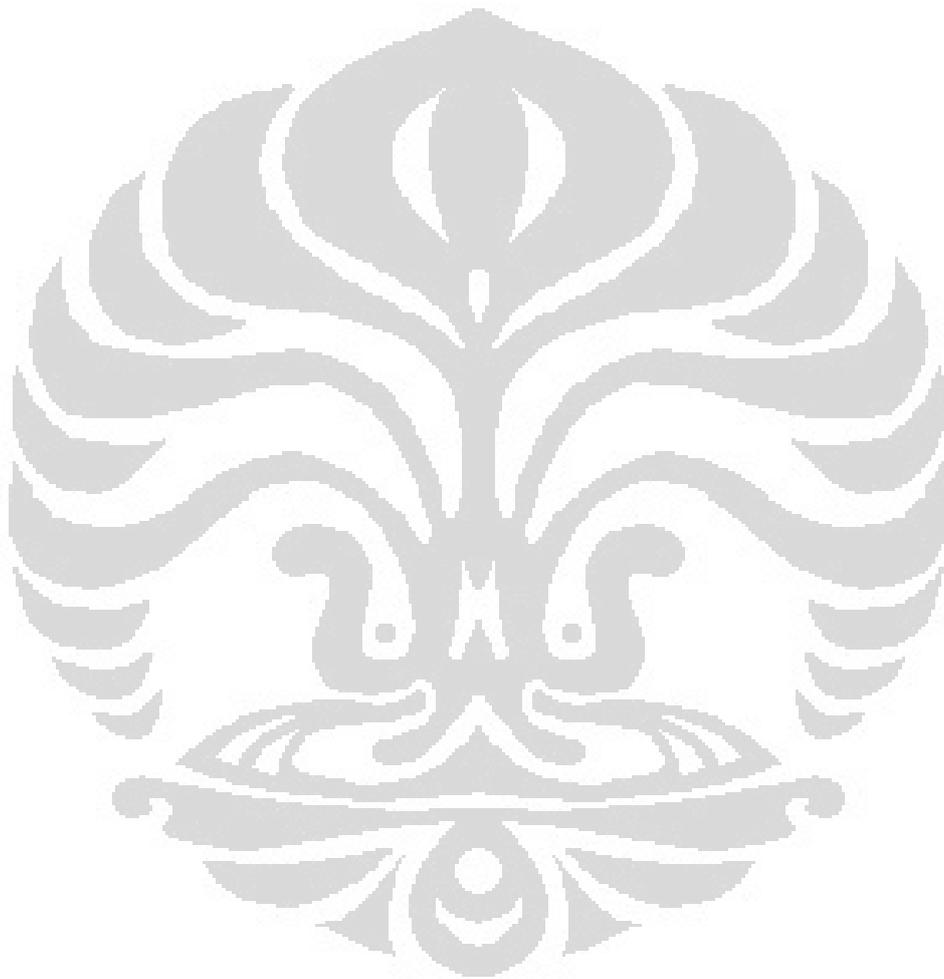
Gambar 4.14.	Hasil uji difraksi sinar-X pada sampel PP/0,5CuNP dengan kemungkinan fasa: (a) dan (b) $C_{20}H_{22}N_4O_6$; dan (c) $C_{20}H_{34}NiO_{19}$.	80
Gambar 4.15.	Hasil uji difraksi sinar-X pada sampel PP/1CuNP dengan kemungkinan fasa: (a) $C_{13}H_{12}ClNO$ dan (b) $C_{32}H_{30}Fe_2N_4O_2$.	80
Gambar 4.16.	Hasil uji difraksi sinar-X pada sampel PP/1,5CuNP dengan kemungkinan fasa: (a) $C_{24}H_{32}O_7$, (b) $C_{11}H_{18}O_4S$, (c) $C_{18}H_{15}N_5OS$, (d) $C_{15}H_{13}ClN_2O$, dan (e) $C_6H_{12}CuN_2O_8S$.	81
Gambar 4.17.	Hasil uji difraksi sinar-X pada sampel PP/2CuNP dengan kemungkinan fasa: (a) $C_{24}H_{32}O_7$, (b) $C_{30}H_{50}O_2$, (c) $As_3Co_2H_{47}N_{12}O_{16}$, (d) $C_{33}H_{28}S_4$.	81
Gambar 4.18.	Reflektansi spektrum CuNP/PP dengan variasi wt% CuNP: (a) 50; (b) 60; (c) 70; (d) 80 ; dan (e) 90.	84
Gambar 4.19.	Kurva Kubelka-Munk CuNP/PP dengan variasi wt% CuNP: (a) 50, (b) 60, (c) 70, (d) 80, dan (e) 90.	85
Gambar 4.20.	Energi celah pita sampel-sampel CuNP/PP.	86
Gambar 4.21.	Ilustrasi energi celah pita pada matriks PP tanpa dan dengan kehadiran CuNP yang dominan.	87
Gambar 4.22.	Konduktivitas sampel CuNP/PP.	88
Gambar 4.23.	Reflektansi spektrum sampel 50CuNP/PP/G dengan variasi wt% G: (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20 (1), dan (e) 25.	90
Gambar 4.24.	Kurva Kubelka-Munk sampel 50CuNP/PP/G dengan variasi wt% G: (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20 (1), dan (e) 25.	91
Gambar 4.25.	Energi celah pita sampel 50CuNP/PP/G.	91
Gambar 4.26.	Konduktivitas listrik sampel 50CuNP/PP/G.	93
Gambar 4.27.	Reflektansi spektrum sampel 60CuNP/PP/G dengan kode: (a) N1K1 ; (b) N4K10; (c) 3K8; dan (d) N3.5K7.	94
Gambar 4.28.	Kurva Kubelka-Munk sampel 60CuNP/PP/G dengan kode: (a) N1K1 ; (b) N4K10; (c) 3K8; dan (d) N35K7.	95
Gambar 4.29.	Energi celah pita sampel 60CuNP/PP/G.	96
Gambar 4.30.	Konduktivitas listrik sampel 60CuNP/PP/G.	97
Gambar 4.31.	Reflektansi spektrum sampel 70CuNP/PP/G dengan variasi wt%G: (a) 5; (b) 10; (c) 15; (d) 20; dan (e) 25.	98
Gambar 4.32.	Kurva Kubelka-Munk 70CuNP/PP/G dengan variasi wt% G: (a) 5; (b) 10; (c) 15; (d) 20, dan (e) 25.	99
Gambar 4.33.	Energi celah pita sampel 70CuNP/PP/G.	100
Gambar 4.34.	Perbandingan energi celah pita untuk keseluruhan sampel nanokomposit CuNP/PP/G.	101
Gambar 4.35.	Konduktivitas listrik sampel 70CuNP/PP/G.	102
Gambar 4.36.	Hasil pengujian kekerasan Brinell pada sampel 70CuNP/PP/20G.	103
Gambar 4.37.	Hasil pengujian kekerasan Brinell pada sampel 100 wt% G.	104

Gambar 4.38.	Hasil uji difraksi sinar-X pada sampel CuNP dengan kemungkinan fasa: (a), (b), dan (c) Cu.	106
Gambar 4.39.	Reflektansi spektrum sampel 100 wt% G.	107
Gambar 4.40.	Kurva Kubelka-Munk sampel 100 wt% G.	107
Gambar D.1.	Garis kecenderungan (trendline) kurva-kurva Kubelka-Munk untuk sampel-sampel murni.	146
Gambar D.2.	Garis kecenderungan kurva-kurva Kubelka-Munk sampel PP/CuNP.	147
Gambar D.3.	Garis kecenderungan kurva-kurva Kubelka-Munk sampel CuNP/PP.	148
Gambar D.4.	Garis kecenderungan kurva-kurva Kubelka-Munk sampel 50CuNP/PP/G.	149
Gambar D. 5.	Garis kecenderungan kurva-kurva sampel 60CuNP/PP/G.	150
Gambar D.6.	Garis kecenderungan kurva-kurva Kubelka-Munk sampel 70CuNP/PP/G.	151



DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A : HASIL PENELITIAN TERDAHULU	123
LAMPIRAN B : STANDARD APLIKASI SEL BAHAN BAKAR	141
LAMPIRAN C : MATERIAL SAFETY DATA SHEET PP HI35HO	144
LAMPIRAN D : KECENDERUNGAN GARIS KURVA KUBELKA-MUNK	146



BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Efek rumah kaca (*green house effect*, ERK) sejatinya adalah proses alami yang membantu mengatur panas permukaan bumi dengan melibatkan gas rumah kaca (GRK) berupa uap air, karbondioksida (CO₂), dan gas-gas buang lainnya. Tanpa ERK temperatur bumi diprediksi mendekati -18°C, sementara keberadaannya menjadikan temperatur bumi mencapai 14°C^[1].

Namun demikian, konsumsi bahan bakar fosil yang berlebihan telah mengakibatkan konsentrasi CO₂ di permukaan berlimpah dan merubah ERK menjadi proses yang merugikan^[2]. *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC)^[1] memperkirakan bahwa pada akhir abad ke-21 konsentrasi CO₂ akan meningkat 75 – 350% dari konsentrasi sebelum Revolusi Industri. Ironisnya, saat ini skenario perkiraan IPCC tersebut sudah terlampaui^[3]. Agar konsentrasi CO₂ dapat kembali normal, puncak emisi harus dapat dipastikan terjadi pada tahun 2015 dan setelah itu menurun hingga titik nol^[4]. Hal ini ditempuh oleh negara-negara maju dengan mengurangi emisi tahun 1990 hingga angka 40% di tahun 2020. Sementara negara-negara berkembang mengurangi pertumbuhan emisinya hingga mencapai 15-30%^[4].

Dalam pada itu, salah satu solusi mengurangi tingkat emisi GRK adalah dengan menggunakan sel bahan bakar (*fuel cell*) sebagai pengganti bahan bakar fosil. Teknologi ini telah terbukti mampu mengurangi emisi hingga mendekati angka nol^[5] karena menggunakan hidrogen alih-alih senyawa hidrokarbon. Meski perkembangan teknologi ini berjalan lambat, namun potensinya sangat signifikan. Sebuah studi memprediksikan bahwa pada tahun 2013 pasar sel bahan bakar akan mampu mencapai angka US\$ 35 milyar^[6].

Dari berbagai jenis ada, sel bahan bakar dengan membran polimer (*polymer electrolyte membrane fuel cell*, PEMFC) adalah yang paling banyak diperjual-belikan^[7] serta diteliti^[8] dalam beberapa dekade terakhir. Di antara kelebihan PEMFC dibandingkan jenis sel-bahan bakar lainnya yakni efisiensinya yang mencapai 60% dalam aplikasi transportasi dan 30% dalam aplikasi *stationary fuel cell*^[9]. Bagaimanapun, sel bahan bakar PEMFC juga berhadapan dengan beberapa kendala sebelum betul-betul dapat diperjual-belikan secara masal. Kendala utama dalam aplikasi PEMFC secara masal berkaitan dengan biaya produksi^[10] yang relatif tidak murah.

Biaya produksi PEMFC yang besar antara lain berasal dari katalis platina yang mengambil porsi hingga 55% dari total biaya produksi^[11]. Pelat bipolar PEMFC yang digunakan juga memakan porsi biaya dan berat yang tidak sedikit. Untuk desain PEMFC tertentu sebuah pelat bipolar bisa mengambil porsi biaya dan berat mencapai 40% dan 80%^[12]. Di samping masalah biaya, PEMFC juga dihadapkan pada kendala teknis seperti: sel-sel PEMFC sangat sensitif terhadap pengotor di dalam bahan bakar dan adanya panas yang dihasilkan dari reaksi-reaksi kimia di dalam sel PEMFC.

Dalam rangka mengurangi biaya produksi, tiga komponen utama yang layak dipertimbangkan sebagai fokus pengembangan mencakup: pelat bipolar, membran polimer, dan juga katalis^[11]. Penggunaan material konvensional (logam) pada pelat bipolar mengakibatkan bagian ini memakan biaya produksi tertinggi untuk keseluruhan produk sel bahan bakar. Tercatat pelat bipolar konvensional menghabiskan hingga 80% volume, 70% berat, dan 60% biaya total dari sebuah sel bahan bakar^[12]. Dalam pada itu, biaya produksi PEMFC dapat diturunkan dengan cara menggunakan material alternatif pada pelat bipolar^[13].

Pelat bipolar berbasis polimer yang diberi pengisi (*filler*) konduktif dipandang cocok untuk kebutuhan ini. Selain lebih ringan daripada pelat logam^[10], harga produksi pelat berbasis polimer relatif lebih murah dibandingkan kelas material lainnya^[12]. Di samping itu, polimer secara umum memiliki mampu alir (*flowability*) yang lebih unggul dibanding kelas material lainnya. Hal ini akan memudahkan pemrosesan polimer untuk keperluan produksi masal.

1.2. Perumusan Masalah

Sebuah pelat bipolar disyaratkan memiliki konduktivitas listrik, sifat mekanik, dan ketahanan korosi yang tinggi serta permeabilitas gas yang rendah ^[14]. Mengacu pada kriteria-kriteria ini, penggunaan polimer murni pada pelat bipolar tidak memungkinkan karena dua alasan: konduktivitas listrik dan kekuatan mekanis polimer yang relatif sangat rendah. Dalam pada itu, komposisi polimer dapat menjadi solusi untuk meningkatkan sifat kelistrikan dan mekanis polimer.

Pada industri manufaktur PEMFC dewasa ini, umum digunakan metode pembuatan pelat bipolar 'langsung jadi' (*net shaped*) melalui teknik pencetakan injeksi (*injection molding*) dan pencetakan tekan (*compression molding*) melibatkan resin polimer termoset dan pengisi konduktif dalam jumlah yang dominan ^[15]. Kondisi pengisi yang dominan menyebabkan kekentalan komposit meningkat dan berpengaruh pada kemampuan alir yang menurun pada saat proses cetak injeksi. Lebih jauh, hal ini dapat menyebabkan cacat-cacat produk yang lazim dikenal dalam proses produksi polimer seperti *short shot*, *shrinkage*, dan *warpage*.

Dalam pada itu, perlu dilakukan kompromisasi dan optimasi antara kadar pengisi dengan kemampuan proses komposit yang dihasilkan. Pelat bipolar yang tersusun dari material nanokomposit dapat menjadi solusi. Pada kondisi ini, pengisi konduktif diharapkan dapat terdispersi dengan lebih baik. Selain itu, dengan kondisi ini jumlah pengisi konduktif dapat diturunkan. Pada akhirnya, pelat komposit yang dihasilkan tetap memiliki sifat mampu alir yang baik, namun dengan sifat mekanis dan kelistrikan yang lebih baik daripada matriks polimernya.

Berdasarkan pemaparan atas, masalah penelitian yang dirumuskan adalah sebagai berikut:

“Komposisi optimum material nanokomposit dengan bahan dasar matrik polimer dan pengisi dari tembaga nanopartikel dan grafit untuk keperluan aplikasi pelat bipolar cetak injeksi dengan nilai konduktivitas dan kekuatan tarik minimal 100 S/cm dan 54 MPa”.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan perbaikan terhadap terhadap penelitian sejenis yang pernah dilakukan di Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia dengan cara modifikasi metodologi dan bahan penelitian guna mendapatkan hasil penelitian yang lebih optimum;
2. Mendapatkan korelasi antara parameter proses sintesis, struktur mikro/nano dan karakteristik nanokomposit inorganik-organik yang terbuat matrik polipropilena dengan pengisi tembaga nanopartikel dan grafit.
3. Menemukan komposisi optimum polipropilena, nanopartikel tembaga, dan grafit yang sesuai untuk kebutuhan pelat bipolar nanokomposit, yakni konduktivitas listrik dan kekuatan tarik minimal minimal 100 S/cm dan 54 MPa.

1.4. Hipotesis

Pada tahun 2009, telah dilakukan sebuah penelitian bidang rekayasa material dengan topik yang sama dengan penelitian ini. Judul penelitian dimaksud adalah 'Pembuatan Pelat Bipolar Sel Bahan Bakar Membran Polimer dengan Nanokomposit Tembaga dan Karbon dalam Matrik Propilena' ^[15]. Penelitian dilakukan oleh kelompok Tim Peneliti Universitas Indonesia yang terdiri atas: Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono, M.Phil.Eng. (Peneliti Utama); Dra. Sari Katili, MS (Peneliti Anggota); Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia, M.Phil.Eng. (Peneliti Anggota), dan Muhammad Fitrullah, ST (Peneliti Anggota).

Tim peneliti melakukan investigasi terhadap pengaruh penambahan: tembaga nanopartikel (CuNP) di dalam nanokomposit PP-CuNP, dan serat karbon pendek dalam sistem nanokomposit PP-CuNP-C. Mengacu pada laporan yang dikeluarkan Tim Peneliti (2009) diketahui bahwa sistematika kegiatan penelitian yang dilakukan mencakup:

1. Sintesis nanokomposit polipropilena (PP) dengan nanopartikel tembaga (CuNP) melalui teknik kimiawi basah;
2. Sintesis nanokomposit polipropilena (PP)-nanopartikel tembaga (CuNP) yang diperkuat dengan serat karbon pendek dan partikulat karbon hitam dengan bantuan teknik *rheomix*;
3. Karakterisasi performa dasar nanokomposit sebagai kandidat material pelat bipolar dengan serangkaian pengujian yang meliputi: uji UV-spektroskopi, uji konduktivitas listrik, pengamatan dengan SEM (*scanning electron microscope*) dan TGA (*thermogravimetric analysis*), uji kemampuan alir (*melt flow rate test*), uji fleksural, dan uji tarik.

Tim melaporkan bahwa pengisian nanopartikel tembaga pada sistem nanokomposit PP-Cu memberikan pengaruh terhadap nilai konduktivitas listrik material. Nilai konduktivitas rata-rata untuk lima sampel yang diteliti adalah sebagai berikut: (i) untuk sistem 0 wt% CuNP sebesar 5,45 S/cm; ii) untuk 0,5 wt% CuNP sebesar 7,54 S/cm; iii) untuk 1 wt% CuNP sebesar 13,52; iv) untuk 1,5 wt% CuNP sebesar 14,43 S/cm; dan v) untuk 2 wt% CuNP sebesar 9,31 S/cm. Hasil-hasil ini menunjukkan bahwa nilai konduktivitas meningkat secara signifikan sampai dengan 1,5 wt% CuNP, namun kembali menurun pada 2 wt% CuNP.

Pengamatan dengan TGA dan SEM menunjukkan bahwa titik pengisian optimum nanopartikel inorganik (CuNP) sebesar 1,5 wt%. Pengisian di atas batas itu akan menyebabkan terjadinya aglomerasi dalam skala relatif besar dan menurunkan konduktivitas nanokomposit. Hal lain yang juga ditemukan yaitu nilai MFI meningkat akibat penambahan nanopartikel CuNP. Ini dijelaskan bahwa penambahan nanopartikel memberikan efek pelumasan terhadap pergerakan rantai polimer pada kondisi lelehan.

Berikutnya untuk sistem PP-CuNP-C, tim melaporkan bahwa ada peningkatan nilai konduktivitas secara signifikan dengan penambahan karbon dalam bentuk serat-serat pendek (konstan) dan variasi partikulat karbon hitam. Nilai konduktivitas rata-rata yang diperoleh adalah sebagai berikut: (i) untuk 5 wt% CB

(*carbon black*) sebesar 24,47 S/cm; ii) 10 wt% CB sebesar 29,47; iii) 15 wt% CB sebesar 53,89; iv) 20 wt% C B sebesar 55,90.

Namun demikian, peningkatan nilai konduktivitas ini tidak diikuti dengan meningkat nilai MFI. Hasil penting lainnya adalah pengamatan terhadap nilai modulus kekakuan. Nilai modulus kekakuan tertinggi diperoleh sebesar 616,20 MPa untuk kadar 10 wt% karbon hitam. Penurunan kekakuan terjadi pada penambahan 20 wt% karbon hitam. Ini terjadi karena pembentukan agregat karbon yang rapuh dan bertindak sebagai titik lemah pengumpul tegangan (*stress concentration*) terhadap pembebanan mekanis.

Parameter-parameter penelitian yang digunakan Tim Peneliti UI pada tahun 2009 mencakup: (i) kadar PP, (ii) kadar Cu, (iii) kadar karbon (serat pendek dan karbon hitam), (iv) nilai energi celah pita, (v) nilai konduktivitas, (vi) pengamatan TGA dan SEM, (vii) nilai indeks alir lelehan (MFI), dan (viii) nilai modulus kekakuan (uji tarik). Pengaruh antar parameter initelah diuraikan pada bagian sebelumnya. Parameter-paramter ini bermiripan dengan parameter dalam penelitian kali ini. Sedikit perbedaan parameter yang dapat disebutkan adalah pengamatan TGA dan SEM serta nilai MFI, nilai fleksural tidak lagi digunakan.

Berdasarkan hal-hal di atas, dapat dirumuskan hipotesis mengenai hasil penelitian yang akan diperoleh, yaitu sebagai berikut:

- i. Penambahan CuNP dalam sistem PP/CuNP dan CuNP/PP akan mempengaruhi nilai konduktivitas;
- ii. Penambahan karbon grafit dalam sistem CuNP/PP/G akan mempengaruhi nilai konduktivitas listrik dan kekuatan tarik nanokomposit;
- iii. Nilai konduktivitas dan kekuatan tarik yang diperoleh akan lebih tinggi dan mendekati persyaratan material pelat bipolar yang diinginkan, jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya.

Dugaan nomor (iii) muncul mengingat bahwa dalam penelitian ini akan dilakukan perbaikan-perbaikan yang meliputi peningkatan dan modifikasi persiapan fasa larutan serta persiapan sampel uji yang lebihseksama.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Secara garis besar penelitian dimulai dengan studi pendahuluan terhadap literatur-literatur yang berkaitan dengan penelitian. Kemudian dilanjutkan dengan sintesis nanokomposit PP/CuNP dan CuNP/PP melalui teknik kimiawi basah. Lalu diikuti dengan sintesis nanokomposit CuNP/PP/G dengan teknik pencampuran fasa padat.

Setiap material nanokomposit yang dihasilkan dikarakterisasi melalui serangkaian pengujian yang meliputi: uji UV-Spektroskopi, uji difraksi sinar-X, uji konduktivitas listrik, dan uji kekuatan kekerasan. Hasil-hasil uji yang diperoleh kemudian dianalisis untuk mendapatkan korelasi antara parameter proses, struktur dan performa nanokomposit. Dari analisis ini akan diketahui komposisi makrokonstituen nanokomposit yang optimum.

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini mencakup: polipropilena (PP) sebagai matrik, serta pengisi berupa serbuk nanopartikel tembaga dan serbuk grafit. Selain itu, bahan lain yang juga digunakan adalah pelarut organik Xylene dan agen pengikat (*coupling agent*) PP-g-MA.

1.6. Sistematika Penulisan

Laporan penelitian ini disusun dengan mengikuti sistematika sebagai berikut:

- Bab I Pendahuluan, menjelaskan mengenai latar belakang penelitian, perumusan masalah, hipotesis, serta ruang lingkup penelitian.
- Bab II Tinjauan Pustaka, berisi teori-teori yang terkait dengan penelitian.
- Bab III Metodologi Penelitian, menjelaskan tentang langkah-langkah yang ditempuh dalam mempersiapkan sampel-sampel penelitian dan jenis-jenis pengujian yang dilakukan.
- Bab IV Hasil dan Pembahasan, berisi hasil penelitian dan pembahasannya.
- Bab V Kesimpulan dan Saran, berisi kesimpulan-kesimpulan penelitian serta saran-saran yang direkomendasikan untuk penelitian berikutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

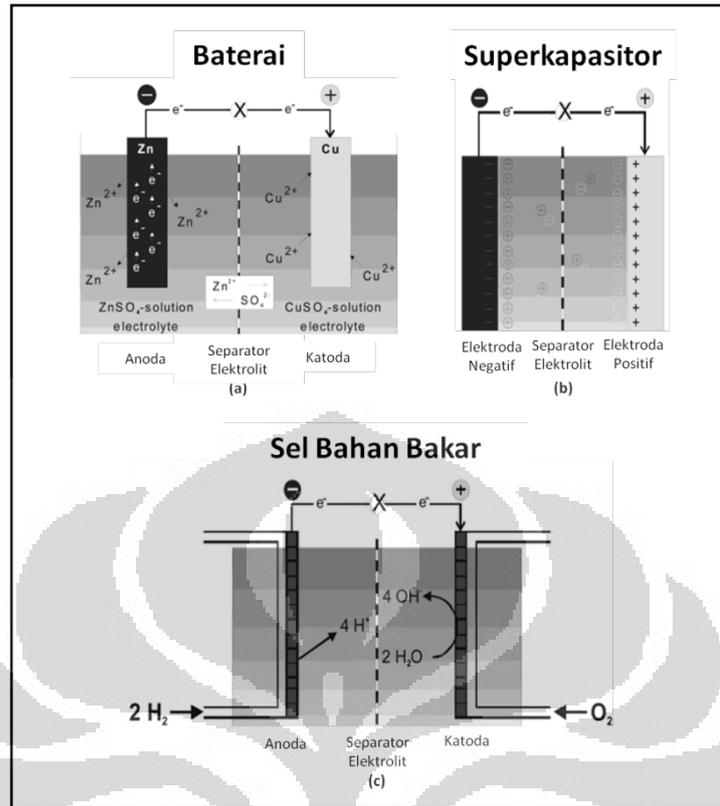
2.1. Sel Bahan Bakar

2.1.1. Definisi

Sel bahan bakar (*fuel cell/FC*) adalah sebuah alat konversi elektrokimia yang memiliki suplai bahan bakar yang kontinu seperti hidrogen, gas alam, atau metanol dan oksidan seperti oksigen, udara, atau hidrogen peroksida^[16]. Sel bahan bakar dapat secara langsung mengubah energi yang secara kimiawi tersimpan dalam sel menjadi energi listrik, melalui reaksi elektrokimia sebagai kebalikan dari reaksi elektrolisis dan tanpa pembakaran^[17], dengan efisiensi termodinamika yang tinggi^[8] dan tingkat emisi polutan yang rendah^[13].

Selain FC, sumber elektrokimia lainnya mencakup baterai dan kapasitor elektrokimia (ECs). Perbedaan mekanisme operasi ketiga sumber tersebut ditunjukkan oleh Gambar 2.1. Pada Gambar 2.1.a. menunjukkan sketsa sebuah baterai (sel Daniel) yang menampilkan bagian-bagian utama baterai. Gambar 2.1.b. memperlihatkan sketsa superkapasitor dengan menunjukkan penyimpanan energi dalam *electric double layers* di antarmuka elektroda-elektrolit. Gambar 2.1.c memperlihatkan sketsa sebuah sel bahan bakar dengan menampilkan suplai reaktan yang kontinu (hidrogen di anoda dan oksigen di katoda) serta reaksi redoks yang terjadi di dalam sel.

Jika dibandingkan dengan mesin bakar, sel bahan bakar memiliki beberapa keunggulan sebagai berikut: (i) emisi gas-gas pembentuk asap yang mendekati nol; (ii) berkurangnya resiko polusi air karena kebocoran bahan bakar minyak dan pelumas; (iii) rendahnya emisi gas rumah kaca CO₂; (iv) efisiensi mesin yang lebih besar; (v) operasi mesin yang lebih halus dan tenang; dan (vi) ekonomis.^[15]

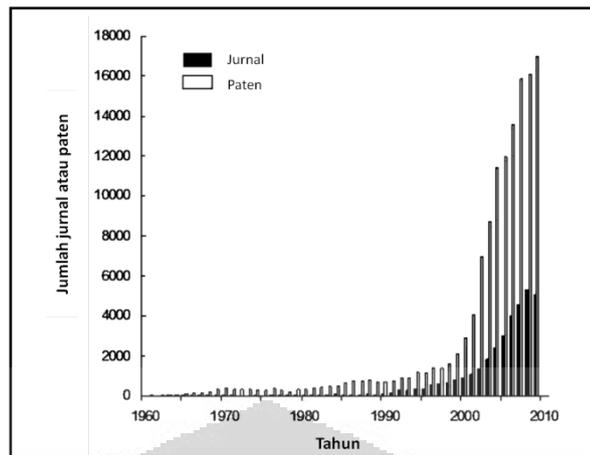


Gambar 2.1. Mekanisme operasi sel elektrokimia: (a) sketsa baterai, (b) sketsa superkapasitor, dan (c) sketsa sel bahan bakar.

Sumber: Winter, dkk., What are batteries, fuel cells, and supercapacitors, h. 4246, telah diolah kembali. ^[16]

2.1.2. Prinsip Kerja dan Klasifikasi

Pada permulaan abad ke-19, investigasi serta temuan Alesandro Volta (prinsip baterai, 1799) dan Michael Faraday (prinsip-prinsip perumusan konversi elektrokimia, belakangan dinamakan *Faraday's Law*, 1832) telah menghantarkan kepada suatu fondasi ilmiah yang memungkinkan Christian Friedrich Schönbein (pada 1838) dan William Robert Grove (pada 1839) menemukan prinsip kerja sel bahan bakar ^[8]. Setelah paten pertama oleh Wilhem Borchers di tahun 1896 ^[8], hingga saat ini prinsip kerja sel bahan bakar terus mengalami perkembangan yang pesat. Gambar 2.2. menunjukkan laju pertumbuhan pada literatur dan paten dalam kurun waktu 1960-2010. Sampai tahun 2010, terdapat lebih dari 35253 naskah (versi Web of Science) dan 130612 patent (versi CAPLUS database) yang telah dipublikasikan terkait dengan sel bahan bakar (data per 23 Februari 2010) ^[8].

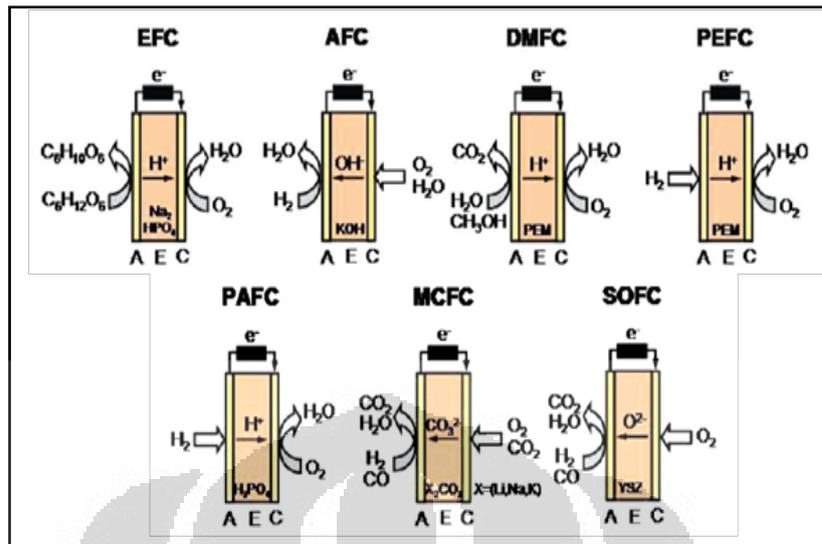


Gambar 2.2. Publikasi dan paten “fuel cells”.

Sumber: Sundmacher, Fuel Cell Engineering, h. 10610, telah diolah kembali. ^[8]

Secara umum, langkah kerja suatu sel bahan bakar sebagai berikut. *Pertama*, bahan bakar, umumnya hidrogen, masuk ke bagian anoda sel. Di sini katalis akan memecah molekul hidrogen menjadi ion hidrogen dan elektron. *Kedua*, elektron yang dihasilkan tidak dapat menembus membran (elektrolit), oleh karena itu akan berpindah lewat jalur luar menuju katoda. Perpindahan inilah yang membentuk arus listrik (berlawanan arah dengan gerak elektron). *Ketiga*, sampai di katoda, elektron turut berpartisipasi dalam reaksi redoks membentuk H₂O. *Empat*, ion hidrogen, berlawanan dengan elektron, dapat menembus membran dan bereaksi dengan ion oksigen, yang dipecah dari gas oksigen oleh katalis di katoda, menghasilkan panas dan air dalam jumlah kecil. Produk reaksi redoks bisa berada pada bagian anoda (SOFC, MFC, dan AFC).

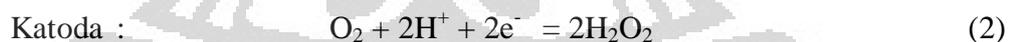
Dewasa ini, jenis sel bahan bakar umumnya didasarkan pada jenis elektrolit yang dipakai dalam sistem ^[8, 9, 13, 17]. Klasifikasi ini ikut menentukan: jenis reaksi kimia di dalam sel, jenis katalis yang dibutuhkan, temperatur operasi sel, bahan bakar yang digunakan, aplikasi yang paling cocok untuk satu sel bahan bakar. Gambar 2.3 menunjukkan prinsip kerja sel-sel bahan bakar yang meliputi: EFC (*enzymatic fuel cell*), AFC (*alkaline fuel cell*), DMFC (*direct methanol fuel cell*), PEFC (*polymer electrolyte fuel cell*), PAFC (*phosphoric acid fuel cell*), MCFC (*molten carbonate fuel cell*), dan SOFC (*solid oxide fuel cell*).



Gambar 2.3. Prinsip kerja dari beberapa jenis sel bahan bakar. (Keterangan: A, anoda; E, elektrolit; dan C, katoda).

Sumber: Sundmacher, Fuel cell engineering, h.1061. [8]

Dari Gambar 2.3. diketahui bahwa produk buangan sel bahan bakar yang utama hanyalah uap air. Kadar gas CO_2 sendiri, jika ada, relatif kecil sehingga bisa diabaikan [5, 8, 17, 18, 19]. Hal ini menjadikan sel bahan bakar, dengan pertimbangan pengaruh terhadap lingkungan, sebagai pilihan yang ideal untuk menghasilkan listrik. Berikut adalah reaksi elektrokimia dalam sel bahan bakar yang menghasilkan uap air (H_2O):



Tabel 2.1. memperlihatkan perbandingan berbagai teknologi sel bahan bakar yang umum dipakai. Dari tabel ini terlihat bahwa setiap jenis sel bahan bakar memiliki keunggulan dan kelemahannya masing-masing.

Tabel 2.1 Perbandingan berbagai teknologi sel bahan bakar yang umum dipakai.

Jenis Sel Bahan Bakar	<i>Polymer Electrolyte Membrane (PEM)</i>	<i>Alkaline (AFC)</i>	<i>Phosphoric Acid (PAFC)</i>	<i>Molten Carbonate (MCFC)</i>	<i>Solid Oxide (SOFC)</i>
Elektrolit^a	Membrane polimer tipis	potassium hidroksida	Larutan asam fosforik	campuran garam karbonat	senyawa keramik non-porous, keras
Electrodes^b	Karbon	logam-logam transisi	Karbon	Nikel dan nikel oksida	Perovskit dan perovskit/logam cermet
Katalis	Platina	Platina	Platina	Material elektroda	Material elektroda
Interkoneksi^b	Karbon atau logam	Logam	Grafit	Baja tahan karat atau nikel	Nikel, keramik, atau baja
Temperatur Operasi^c	50-100°C 122-212°F Umumnya 80°C	90-100°C 194-212°F	150-200°C 302-392°F	600-700°C 1112-1292°F	700-1000°C 1202-1832°F
Pembawa muatan (charge carrier)^b	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Reformer eksternal (untuk bahan bakar hidrokarbon)^b	Ya	Ya	Ya	Tidak, untuk beberapa jenis bahan bakar	Tidak, untuk beberapa bahan bakar dan jenis sel tertentu
Konversi CO menjadi hidrogen dengan shift luar^b	Ya, ditambah dengan purifikasi untuk menghilangkan bekas CO	Ya, ditambah dengan purifikasi untuk menghilangkan bekas CO	Ya	Tidak	Tidak
Pengaturan air hasil reaksi^b	Evaporatif	Evaporatif	Evaporatif	Diubah menjadi gas	Diubah menjadi gas
Pengaturan panas hasil reaksi^b	Memproses gas + pendinginan dengan cairan	Memproses gas + sirkulasi elektrolit	Memproses gas + pendinginan dengan cairan atau melepaskan uap panas	Internal Reforming + memproses gas	Internal Reforming + memproses gas
Komponen sel utama^b	Berbasis karbon	Berbasis karbon	Berbasis grafit	Berbasis baja	Keramik

2.1. (sambungan)

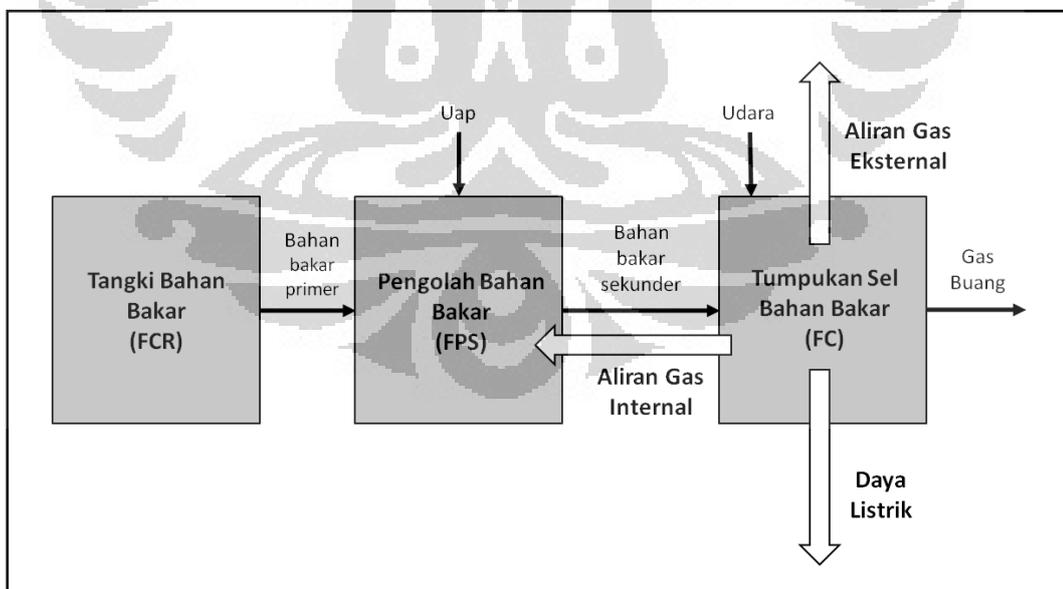
Ukuran^c	< 1kW-100kW	10-100 kW	400 kW 100 kW module	300 kw-3 MW 300 kW module	1 kW-2 MW
Efisiensi^c	60% (transportasi) 30% (stasioner)	60%	40%	45-50%	60%
Aplikasi^c	<ul style="list-style-type: none"> • Backup power • Portable power • Distributed generation • Transportasi • Kendaraan khusus 	<ul style="list-style-type: none"> • Militer • Ruang angkasa 	<ul style="list-style-type: none"> • Distributed generation 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilitas listrik • Distributed generation 	<ul style="list-style-type: none"> • Auxiliary power • Electric utility • Distributed generation
Keuntungan^c	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrolit padat mengurangi masalah korosi dan pengaturan elektrolit • Temperatur rendah • Proses <i>start-up</i> cepat 	<ul style="list-style-type: none"> • Reaksi katoda lebih cepat • Komponen murah 	<ul style="list-style-type: none"> • Memungkinkan untuk adanya CHP (<i>combined heat & power</i>) • Toleransi terhadap pengotor meningkat 	<ul style="list-style-type: none"> • Efisiensi tinggi • Bahan bakar fleksibel • Katalis beragam • Cocok untuk CHP 	<ul style="list-style-type: none"> • Efisiensi tinggi • Bahan bakar fleksibel • Katalis beragam • Elektrolit padat • Cocok untuk CHP & CHHP • Siklus Hybrid/GT
Kelemahan^c	<ul style="list-style-type: none"> • Katalis mahal • Sensitive terhadap pengotor • Temperatur zat buangan rendah 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensitif terhadap CO₂ dalam bahan bakar dan udara • Memerlukan pengaturan elektrolit 	<ul style="list-style-type: none"> • Katalis Pt • start-up panjang • Arus dan daya rendah 	<ul style="list-style-type: none"> • Korosi temperatur tinggi dan macetnya komponen sel • start-up panjang • Densitas daya rendah 	<ul style="list-style-type: none"> • Korosi temperatur tinggi dan macetnya komponen sel • start-up panjang
Status komersialisasi^a	Memasuki pasar pada kisaran 1-30 kW dan dapat digunakan dalam berbagai aplikasi. Pernah didemonstrasikan dengan ukuran 75-250 kW.	Sejauh ini digunakan dalam aplikasi-aplikasi khusus	PAFCs adalah jenis yang pertama kali digunakan dalam aplikasi stasioner, awalnya pada 40 kW kemudian menjadi 200 kW.	Saat ini secara komersil diperjualbelikan pada ukuran 300 kW dan MW.	Diharapkan segera masuk dalam pasar stasioner.

Sumber: ^aUS DOE, Types of Fuel Cell ^[9]; ^bEG&G Tech., FC Handbook (7th), h.1-8 ^[20]; ^cUS FCC, FC for Power Generation, h.5 ^[17]; telah diolah kembali.

2.1.3. Desain, Pemilihan Material, dan Pengembangan

Meskipun terdapat beragam jenis sel bahan bakar, namun demikian semuanya memiliki prinsip kerja yang sama. Oleh karena itu, secara umum suatu sel bahan bakar tersusun dari tiga bagian (Gambar 2.1.) yang saling menempel, yaitu: anoda, katoda, dan elektrolit, dengan fungsi-fungsi yang disebutkan di bagian 2.1.2. (prinsip kerja). Dalam rangka mendapatkan desain yang optimum, sel bahan bakar sebaiknya dipandang sebagai sub dari sistem yang lebih besar.

Pada level yang lebih tinggi, sebagai suatu sistem (*fuel cell system*, FCS, Gambar 2.4.), sel bahan bakar memiliki tiga bagian utama: sebuah tangki bahan bakar (*fuel cell reservoir*, FCR), sistem pengolah bahan bakar (*fuel processing subsystem*, FPS), dan satu tumpukan sel bahan bakar (*fuel cell stack*, FC). Dari tangki (*reservoir*), bahan bakar primer diumpankan ke bagian sistem pengolah bahan bakar (*processing system*), yang akan menghasilkan bahan bakar sekunder yang cocok untuk operasi dalam FC. FC akan menghasilkan daya listrik dan panas— yang sebagiannya dimanfaatkan oleh sel. Tabel B.1. menunjukkan berbagai standard FCS untuk aplikasi sumber daya dan otomotif .



Gambar 2.4. Penampang sebuah sistem sel bahan bakar (FCS).

Sumber: EG&G, Handbook of Fuel Cell, hal. 1-7, telah diolah kembali ^[20].

Kebutuhan desain dan juga aplikasi produk FCS yang beragam menyebabkan proses pemilihan material (*material selection*) menyusun komponen-komponen FC menjadi tidak sederhana. Meski demikian, ada beberapa persyaratan umum yang dapat dijadikan acuan, sebagai berikut:

- i. Hambat jenis penampang (*area-specific resistivity*, ASR) komponen-komponen penyusun sel (elektrolit, anoda, dan katoda) kurang dari $0,5\Omega\text{cm}^2$ (idealnya mendekati $0,1\Omega\text{cm}^2$)^[13].
- ii. Sebagai kelanjutan dari poin pertama ditetapkan densitas daya tinggi (*high power density*) untuk aplikasi transportasi sebesar 1 kW dm^{-3} dan 1 kW kg^{-1} ^[13].
- iii. Penurunan kinerja (*performance degradation*) kerja sel bahan bakar berkisar 0,1% per 1000 jam kerja untuk total 5.000jam kerja dalam aplikasi transportasi. Sedangkan dalam aplikasi sebagai sumber listrik tetap (*stationary*), laju penurunan kinerja samadengan waktu operasi lebih lama, yakni 40.000 jam^[13].
- iv. Tegangan listrik ideal berdasarkan temperatur operasi:(a) $V_{\text{PEFC}} = 1,17\text{ V}$ (80°C); (b) $V_{\text{AFC}} = 1,16\text{ V}$ (100°C); (c) $V_{\text{PAFC}} = 1,14\text{ V}$ (205°C); (d) $V_{\text{MCFC}} = 1,03\text{ V}$ (650°C); (e) $V_{\text{ITSOFC}} = 0,99\text{ V}$ (800°C); dan (f) $V_{\text{TOSFC}} = 0,91\text{ V}$ (1100°C). Kondisi ideal ini dicapai jika zat-zat katoda dan anoda tetap bersih, tidak dimasuki pengotor, selama operasi berlangsung^[20].
- v. Target biaya pembuatan PEMFC untuk aplikasi otomotif ditetapkan sebesar $\$45/\text{kW}_e$ (net) untuk FCS dan $\$15/\text{kW}_e$ (net) untuk FC^[21].

Parameter-parameter di atas dapat diprediksi dengan pendekatan kimia dan termodinamika melalui apa yang disebut kesetimbangan energi sel (*cell energy balance*, CEB) dan efisiensi sel (*cell efficiency*,). CEB menetapkan bahwa ‘entalpi reaktan-reaktan’ yang masuk harus sama dengan ‘entalpi produk-produk yang keluar ditambah: (i) panas bersih (*net heat*) yang dihasilkan sel, (ii) daya DC yang keluar dari sel, dan (iii) panas yang hilang (*heat loss*)’^[20]. Efisiensi sel keseluruhan, η , dirumuskan sebagai berikut^[13]:

$$\eta = \eta_g \eta_v \alpha \quad (5)$$

η_g adalah efisiensi Gibbs, η_v adalah efisiensi tegangan, dan α adalah fraksi bahan bakar yang digunakan.

$$\eta_g = \Delta G / \Delta H = nFE_0 / \Delta H \quad (6)$$

$$\eta_v = E / E_0 = (E_0 - IR_c) / E_0 \quad (7)$$

E_0 adalah tegangan sirkuit dan ΔH adalah panas dari keseluruhan reaksi.

$$\eta = nF(E_0 - IR_c)\alpha / \Delta H \quad (8)$$

R_c , adalah hambatan jenis permukaan komponen sel (anoda, katoda, dan elektroda).

Di masa mendatang, sebuah studi^[8] memprediksikan bahwa penelitian dan pengembangan FCS akan berkisar pada tujuh hal: (i) sel bahan bakar langsung (*direct FC*) tanpa reformer (pembentuk hidrogen), (ii) integrasi konsepsi panas (*heat integration*), (iii) integrasi konsepsi massa (*mass integration*), (iv) kemampuan untuk dioperasikan bersama jenis sumber bahan bakar berbeda (*hybridization*), (v) kemampuan kinerja dua arah (*reversible*) sehingga listrik merupakan satu-satunya yang bertindak sebagai input dan output; (vi) ukuran yang minimalis sehingga mudah dibawa; dan (vii) konsep pasivitas (*passivity*) guna menjaga volume, berat dan kompleksitas dari FC portable tetap rendah dan juga agar terhindar dari penggunaan daya yang merusak.

2.2. Sel Bahan Bakar Membran Elektrolit Polimer (PEMFC)

2.2.1. Keunggulan dan Tantangan

Sel bahan bakar, sebagai alat yang dapat mengubah energi kimia menjadi energi listrik, merupakan kunci ke arah teknologi-teknologi berbasis hidrogen yang lebih ekonomis. Di antara jenis sel yang ada, sel bahan bakar membran elektrolit polimer (*polymer electrolyte/ proton exchange membrane fuel cell*, PEMFC)—dengan prinsip kerja dan kinerja seperti pada Gambar 2.3. dan Tabel 2.1.—adalah yang paling banyak diperdagangkan, tercatat mendominasi industri hingga 50%^[7] untuk aplikasi transportasi dan cabut-pasang (*portable*). Keunggulan-keunggulan utama^[8] dari PEMFC yakni: (i) adanya kemungkinan untuk mendapat densitas

daya yang tinggi secara volumetris (140 W/L) dan gravimetris (120 W/kg), (ii) bahan bakar beragam, dan (iii) cepat nyala.

Bagaimanapun, PEMFC memiliki beberapa permasalahan teknis yang perlu diselesaikan sebelum betul-betul diproduksi massal meliputi: biaya produksi tinggi, berat, tingkat kepercayaan konsumen rendah, serta tidak tahan lama [22]. Oleh karenanya, komersialisasi PEMFC massal, khususnya di bidang otomotif, berhadapan dengan beberapa tantangan seperti: (i) densitas geometris dan volumetris yang lebih baik lagi, (ii) kemampuan pembentukan gas yang lebih efektif, (iii) ketahanan komponen (*durability/ longevity*), (iv) kemampuan untuk menyala (*start-up*) pada temperatur di atas 25°C layaknya mesin diesel biasa, dan (v) biaya pembuatan yang murah [8, 13, 11]. Tabel 2.2. menunjukkan target biaya pembuatan suatu sistem PEMFC yang dilansir oleh Departemen Energi Amerika Serikat (DOE).

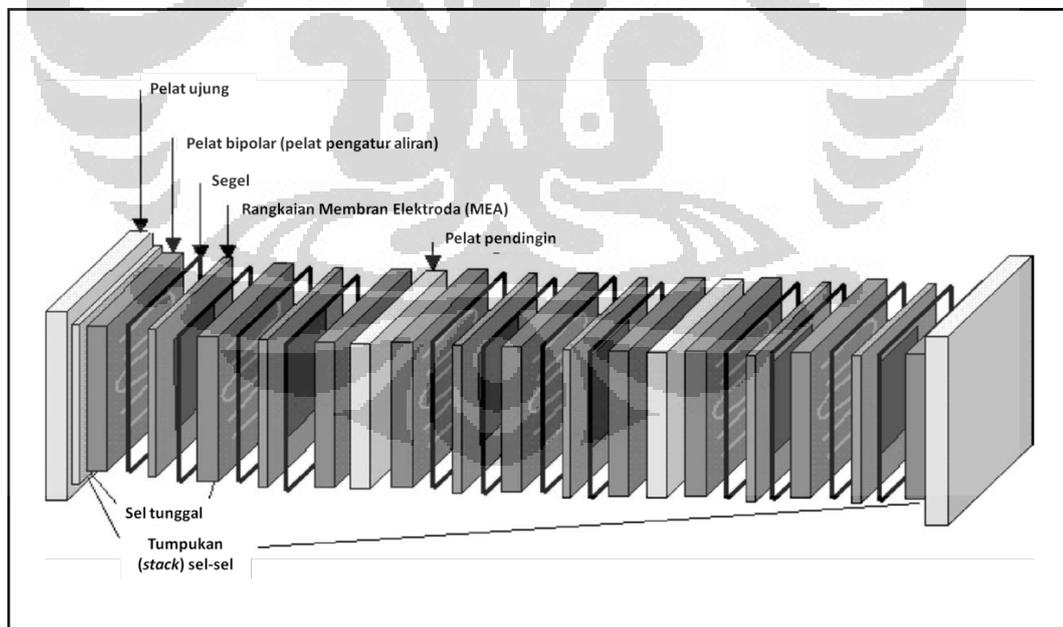
Tabel 2.2. Target DOE untuk FCS dengan sistem *direct-hydrogen* (80 kW_e).

Karakteristik	Unit	2005	2010	2015
System Cost	\$/kW _e	125	45	30
System Efficiency @ 25% Rated Power	%	60	60	60
System Efficiency @ Rated Power	%	50	50	50
System Power Density, Specific Power	W/L, W/kg	500	650	650
Stack Cost	\$/kW _e	65	30	20
Stack Efficiency @ 25% Rated Power	%	65	65	65
Stack Efficiency @ Rated Power	%	55	55	55
Stack Power Density, Specific Power	W/L, W/kg	1500	2000	2000
MEA Cost	\$/kW _e	50	15	10
MEA Performance @ Rated Power	mW/cm ²	800	1280	1280
MEA Degradation Rate	%	10	10	10
PGM Cost	\$/kW _e	40	8	6
PGM Content	g/kW _e (peak)	2,67	0,5	0,4
PGM Loading (both electrodes)	mg/cm ²	0,7	0,3	0,2
Membrane Cost	\$/m ²	200	40	40
Bipolar Plate Cost	\$/kW _e	0	6	4
CEM System Cost	\$	600	400	200

Sumber: Carlson, dkk., Cost analysis for PEM fuel cell, h.33. [23]

2.2.2. Komponen PEMFC dan Mekanisme Kerjanya

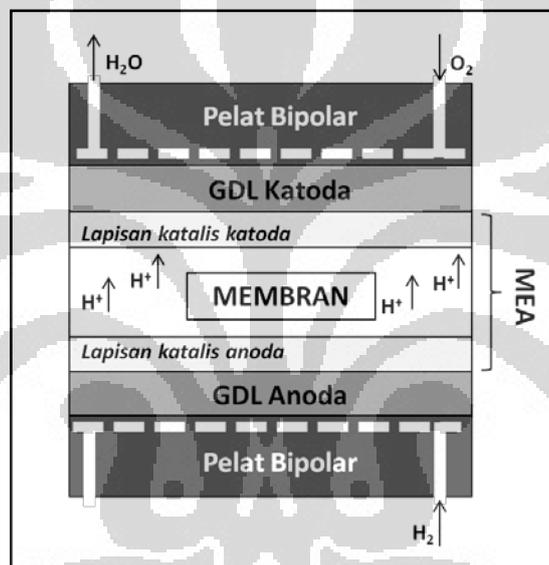
Sebuah sel PEMFC terdiri dari tiga jenis komponen, yaitu: satu rangkaian membran-elektroda (*membrane electrode assembly*, MEA), dua buah pelat bipolar (atau *flow field/ separator plate*), dan dua buah tutup (*seal*)^[6, 8, 24]. Komponen-komponen utama dari sebuah MEA meliputi: (i) sebuah membran penghantar proton, (ii) dua buah lapisan katalis-listrik (anoda dan katoda), dan (iii) elektroda-elektroda untuk difusi gas^[11]. Dalam sebuah tumpukan PEMFC, masing-masing pelat bipolar menopang dua buah sel yang berdekatan dengannya—secara lebih lengkap akan diterangkan di poin 2.3. Satu buah tumpukan merupakan gabungan dari beberapa buah sel seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.5. Pelat ujung (*end plate*), dan perangkat lainnya (baut, pegas, pipa masuk dan buang, pengunci, dan lain-lain, tidak ditampilkan dalam Gambar 2.5.) juga diperlukan untuk melengkapi sebuah tumpukan sel bahan bakar^[24]. Persyaratan-persyaratan desain komponen-komponen PEMC ini beragam, bergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan^[13].



Gambar 2.5. Skema inti sebuah PEMFC: membran elektrolit polimer (MEA).

Sumber: Mehta, dkk., Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing, h. 33.^[24]

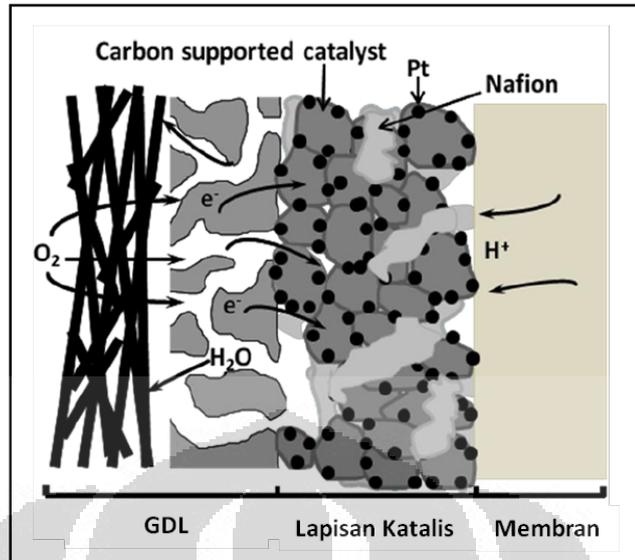
Pada sketsa dasar PEMFC yang ditunjukkan oleh Gambar 2.6., gas hidrogen diumpankan ke dalam anoda sel—gas bergerak menembus lapisan difusi gas (*gas diffusion layer*, GDL) menuju lapisan katalis anodik, tempat hidrogen mengalami oksidasi—sehingga menghasilkan: transfer proton menembus membran pertukaran proton (*proton exchange membrane*, PEM) dan transfer elektron melalui sirkuit luar. Pada saat bersamaan, oksigen yang diumpankan berdifusi ke katoda, lalu bereaksi dengan proton membentuk air. Reaksi-reaksi di katoda, anoda, dan reaksi sel keseluruhan telah ditunjukkan sebelumnya di Persamaan 5.1-5.4.



Gambar 2.6. Skema dasar PEMFC.

Sumber: Mailayagan, Components for PEM fuel cells: an overview, h.3, telah diolah kembali ^[11].

Perpindahan gas-gas, ion-ion, dan air dapat dipahami dengan lebih baik jika melihat kepada struktur elektroda secara lebih dekat, seperti yang terlihat pada Gambar 2.7. Elektroda yang efektif harus mampu menjaga keseimbangan proses-proses perpindahan yang diperlukan dalam pengoperasian sebuah sel bahan bakar. Empat jenis perpindahan (*transport*) yang diperlukan mencakup perpindahan: (i) gas-gas reaktan antar lapisan katalis dan produk antar kanal-kanal gas, (ii) elektron antara pengumpul arus dan lapisan katalis, (iii) proton-proton dari/ menuju membran dan lapisan katalis, (iv) proton-proton melalui membran dari anoda ke katoda ^[11].



Gambar 2.7 Ilustrasi perpindahan gas, proton, dan elektron dalam sebuah elektroda MEA.

Sumber: Mailayagan, Components for PEM fuel cells: an overview, h.4, telah diolah kembali ^[11].

Gas reaktan, katalis padat, dan elektrolit adalah tiga fasa yang umum ditemukan pada lapisan katalis (*catalyst layer*). Dalam rangka optimasi desain elektroda, distribusi jumlah lapisan katalis harus sesuai dengan volume ketiga fasa tersebut, agar jumlah zat yang terbuang dapat ditekan ^[11]. Mengingat daerah batas dari setiap proses perpindahan merupakan bagian vital pada operasi PEMFC, MEA disebut juga sebagai “jantung” ^[15] dari sebuah sel.

2.3. Pelat Bipolar PEMFC

2.3.1. Definisi dan Fungsi

Pelat bipolar (*bipolar plate*, BP)—disebut juga pelat pemisah, pelat pengatur distribusi gas, atau pelat pengumpul arus ^[15]—adalah sebuah pelat konduktif yang letaknya menjepit sel-sel MEA (daerah aktif) di dalam sebuah PEMFC (Gambar 2.5.). Selain pada PEMFC, istilah dan/atau fungsi pelat bipolar juga ditemukan pada jenis sel bahan bakar lainnya seperti PAFC, MCFC, dan DMFC ^[20].

Pelat bipolar PEMFC didesain untuk berbagai keperluan seperti: (i) distribusi reaktan-reaktan secara merata ke semua daerah aktif, (ii) mengerluakan panas yang berasal dari daerah aktif, (iii) memindahkan arus dari satu sel ke sel lainnya,

(iv) mencegah kebocoran reaktan, (v) melembabkan gas dan menjaga sel tetap dingin, (vi) menghubungkan serta memisahkan sel-sel tunggal menjadi satu tumpukan, (vii) mengeluarkan air dari dalam sel, dan (viii) menopang struktur PEMFC [13,15, 22, 24-26].

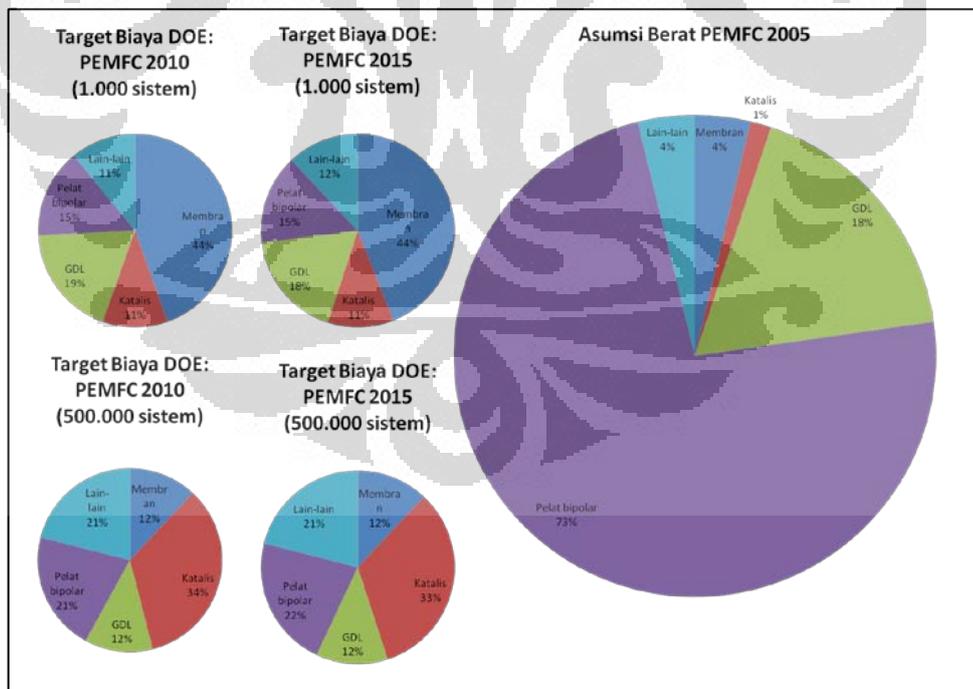
2.3.2. Persyaratan Pelat Bipolar

Idealnya suatu pelat bipolar PEMFC akan berkerja optimal jika memenuhi berbagai persyaratan berikut ini [22, 27, 28].

1. Memiliki konduktivitas listrik yang tinggi (target Departmen Energi Amerika Serikat (DOE) : $>100 \text{ S/cm}$ (*in-plane*) dan $>20 \text{ S/cm}$ (*through-plane*));
2. Memiliki kestabilan kimiawi yang baik di lingkungan asam (target DOE: Ketahanan korosi $<16 \mu\text{A/cm}^2$, target TreadStone: $<1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$);
3. Kompatibilitas kimia (tidak ada emisi yang mempengaruhi kinerja elektroda, tidak ada degradasi permukaan yang timbul);
4. Memiliki konduktivitas termal yang tinggi (target PlugPower: $>10 \text{ W(mK)}^{-1}$) dan koefisien ekspansi termal rendah;
5. Stabilitas termal pada temperatur operasi sel bahan bakar (-40 sampai 120°C untuk sel bahan bakar kendaraan);
6. Permeabilitas terhadap bahan bakar dan oksidan rendah (target DOE: permeabilitas H_2 ($<2 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$);
7. Memiliki sifat-sifat mekanik yang baik (target PlugPower: kekuatan tarik $>41 \text{ MPa}$, kekuatan fleksural $>59 \text{ MPa}$, kekuatan impak $>40,5 \text{ Jm.1}$ (0.75 ft-lb/in); target DOE: kekuatan hancur (*crush*) $>4200 \text{ kPa}$);
8. Volume rendah dan ringan (target DOE: $<1 \text{ kg/W}$), ketebalan $\leq 2 \text{ mm}$ untuk aplikasi kendaraan bermotor.
9. Biaya pembuatan murah (target DOE: $< 3 \text{ \$/kW}$ (2015), 15% dari total biaya PEMFC volume kecil) dan 20% dari total biaya PEMFC volume besar);
10. Proses pembuatan sederhana dan cepat serta material penyusun dapat didaur ulang;

2.3.3. Biaya dan Berat

Dalam sebuah tumpukan (*stack*) PEMFC, pelat bipolar pelat mengambil bagian yang cukup besar, baik dari segi biaya maupun berat. Dari sisi biaya misalkan, meski ada penurunan dari tahun-tahun sebelumnya, target DOE telah menetapkan biaya pembuatan pelat bipolar sebesar 15% (volume kecil) dan 21% (volume besar) dari total biaya keseluruhan sel bahan bakar, atau setara \$3/kW (target 2015) per pelatnya [28]. Pada tahun 2009, GratTech International Ltd. [29] mampu memproduksi pelat bipolar komposit grafit-polimer, dengan biaya yang rendah, yakni sebesar \$6,85/kW (~15% atau 21% biaya total). Angka ini terbilang cukup baik karena mendekati target DOE untuk harga sebuah pelat bipolar, yakni \$5/kW (per 2010). Angka ini juga tergolong fantastis, jika dibandingkan dengan biaya pelat-pelat konvensional yang mencapai 45-60% [22,26]. Adapun untuk berat, pelat bipolar mengkonsumsi hingga 80% [25] dari berat total sebuah PEMFC. Perbandingan konsumsi biaya dan berat dari berbagai komponen sebuah tumpukan PEMFC ditunjukkan oleh Gambar 2.8.

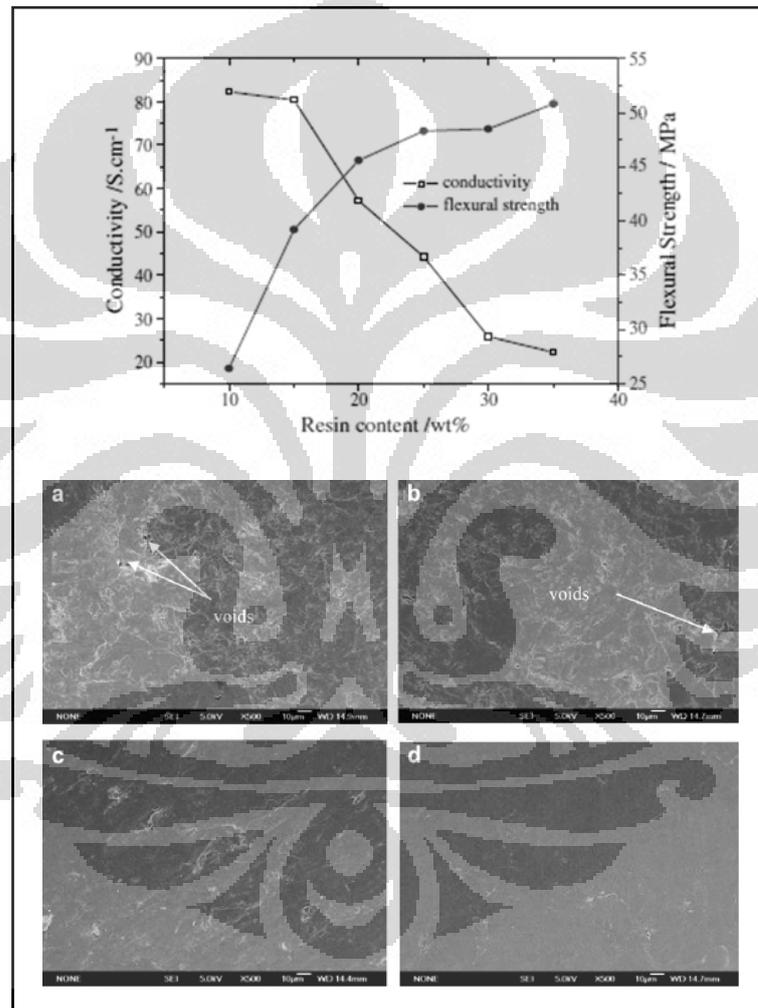


Gambar 2.8. Target biaya PEMC (target DOE)^a dan asumsi berat komponen (asumsi desain PEMFC 2005)^b.

Sumber: ^aConghua, Low cost PEM fuel cell metal bipolar Plate, h.4 [30]; ^bCost analysis of PEM fuel cell, h.43, telah diolah kembali. [28]

2.3.4. Hambatan Listrik dan Konduktivitas Pelat Bipolar

Mengacu pada persyaratan konduktivitas yang diberikan oleh DOE maka hambatan listrik—berbanding terbalik dengan konduktivitas—yang dihasilkan oleh sebuah pelat bipolar tidak boleh mempengaruhi hambatan total sel secara signifikan. Hambatan total berpengaruh pada jumlah energi hilang^[31] (*energy loss*). Jika energi hilang tinggi maka daya yang dikeluarkan sel rendah. Oleh karenanya, hambatan pelat mesti ditangani secara cermat.



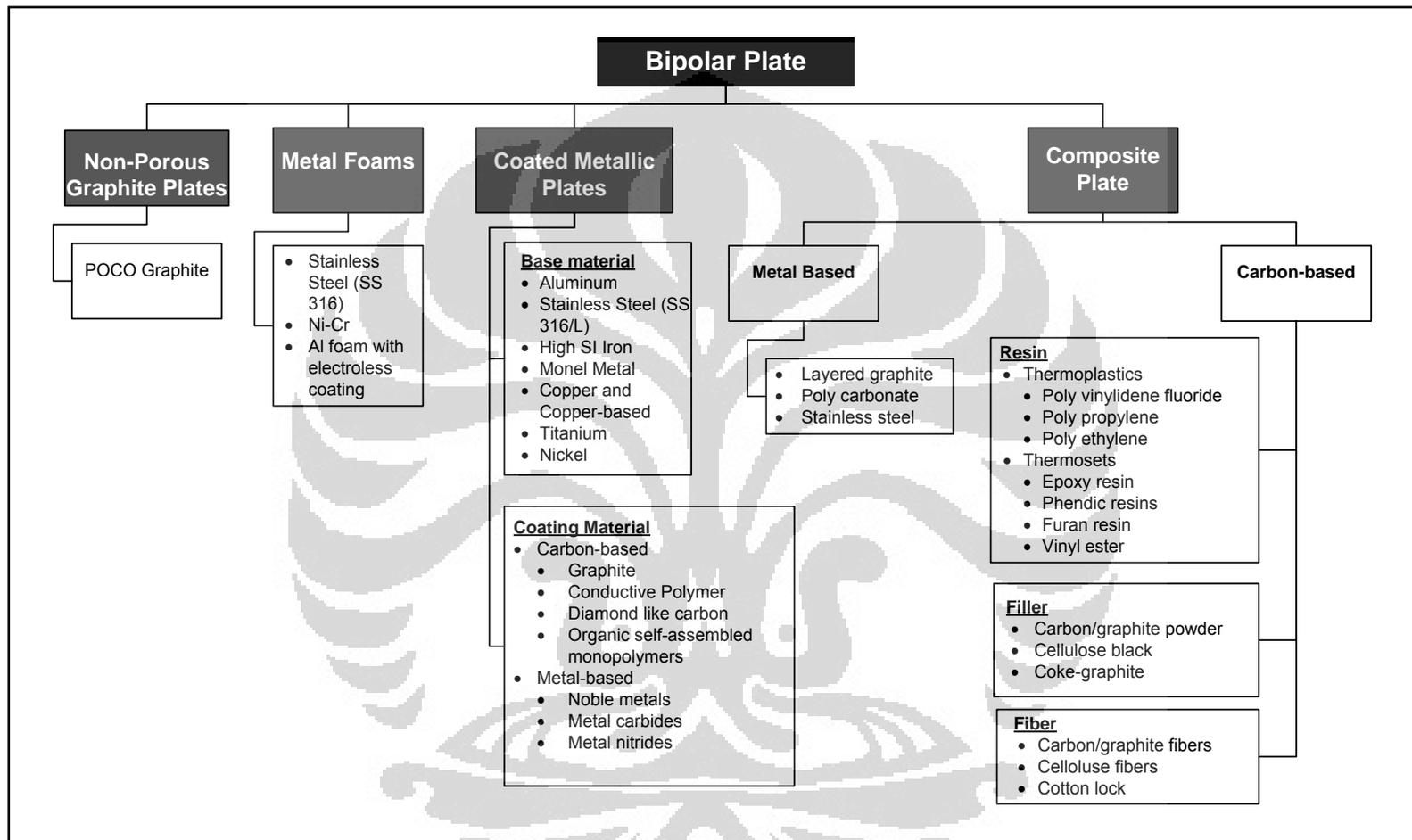
Gambar 2.9. Atas: pengaruh berat resin terhadap konduktivitas dan kekuatan fleksural pelat bipolar komposit epoksi (polimer)/grafit. Bawah: pengamatan dengan *scanning electron microscope* (SEM) terhadap pelat yang sama, dengan berat resin: (a) 10 wt%, (b) 15 wt%, (c) 20 wt%, dan (d) 30 wt%.
Sumber: Chen Hui, dkk., Study on preparation & properties of novolac epoxy/graphite composite bipolar plate for PEMFC, hal.3106^[32].

Umumnya, pelat bipolar yang terbuat dari komposit grafit dan polimer—jenis-jenis pelat dibahas pada bagian 2.3.5—dengan komposisi masing-masing secara berurutan minimal 80 wt% dan 20 wt%, akan menghasilkan konduktivitas antara 50 hingga 100 S/cm^[27]. Gambar 2.9 memperlihatkan contoh pengaruh penurunan nilai konduktivitas (hambatan meningkat) seiring meningkatnya konsentrasi resin polimer. Hal ini terjadi karena pada konsentrasi resin yang rendah jumlah partikel-partikel grafit yang saling kontak lebih banyak.

Meski demikian, perhitungan hambatan total pada pelat bipolar tidak hanya dipengaruhi oleh komposisi material. Faktor-faktor lain yang juga dapat meningkatkan hambatan pelat mencakup: (i) hambatan yang ditimbulkan oleh pelat yang dipress secara bersama-sama, (ii) kontak antara rangka area alir (*flow field*) dengan GDL di sebelahnya, dan juga yang tidak kalah penting (iii) kontak antara material pelat bipolar dan material GDL. Lebih lanjut, hambatan total ini harus lebih rendah dibandingkan hambatan yang dihasilkan oleh MEA.

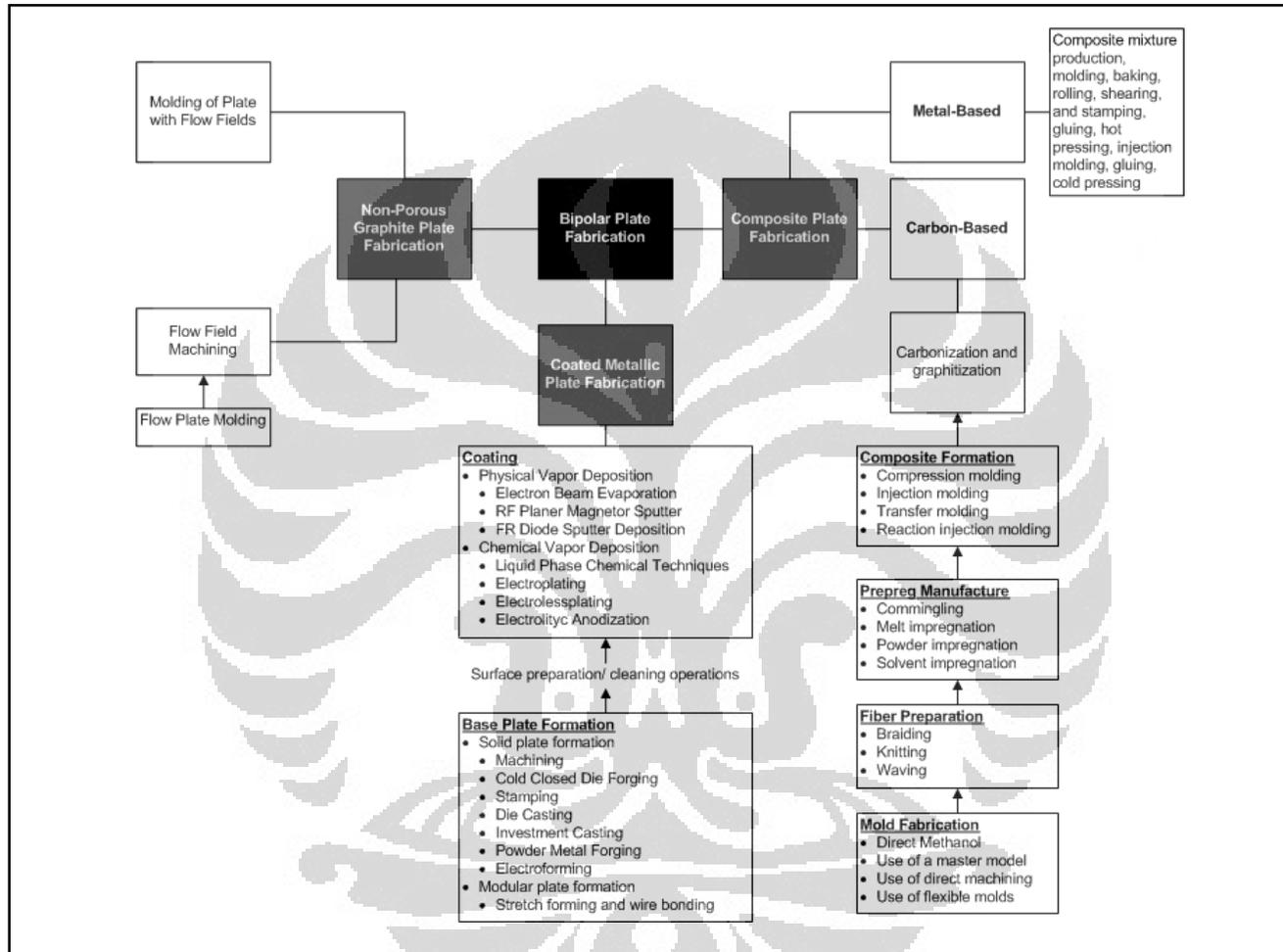
2.3.5. Jenis-jenis Pelat Bipolar

Berbagai jenis pelat bipolar PEMFC dapat dikelompokkan berdasarkan jenis material penyusunnya seperti terlihat pada Gambar 2.10. Secara umum ada tiga jenis pelat bipolar yaitu pelat bipolar berbasis grafit non-poros, logam, dan komposit polimer. Tiap-tiap jenis pelat memiliki keunggulan, kelemahan, serta proses pembuatan pelat (Gambar 2.11) yang khas, bergantung pada aplikasi dan desain pelat yang diinginkan. Sebagai suatu kesimpulan^[33] dapat disebutkan bahwa: (i) pelat komposit berbasis grafit merupakan pilihan yang tepat untuk aplikasi yang memerlukan daya tahan tinggi; (ii) pelat logam cocok digunakan untuk aplikasi yang mementingkan ukuran dan berat di atas daya tahan; (iii) jika kekuatan mekanik yang menjadi fokus maka pelat logamlah satu-satunya yang mungkin; dan (iv) jika diinginkan pelat dengan sifat-sifat yang pertengahan, maka komposit polimer adalah kandidat material yang paling memungkinkan untuk itu. Bagian berikut berisi deskripsi singkat (kecuali pada bagian pelat komposit) mengenai masing-masing pelat.



Gambar 2.10. Klasifikasi material penyusun pelat bipolar.

Sumber: Atur, Materials, design, and modeling for bipolar/end plates, h.18, telah diolah kembali. [34]



Gambar 2.11. Klasifikasi metode fabrikasi pelat bipolar.

Sumber: Mehta, V., & Cooper, J.S., Review and analysis of PEMFC design and manufacturing, h.47, telah diolah kembali [24].

2.3.5.1. Pelat Bipolar Grafit Tanpa Pori-Pori

Grafit tanpa pori-pori (*non-porous* atau *electro-graphite*) digunakan karena memiliki stabilitas kimia yang sangat baik serta memiliki konduktivitas listrik yang juga baik. Di samping itu, karena grafit bersifat hidrofobik, maka material ini juga memiliki konduktivitas termal yang baik.

Saat ini, grafit menjadi standard dalam industri sebuah tumpukan sel bahan bakar, material-material penyusun pelat bipolar dibandingkan dengan material ini ^[22]. Beberapa kelemahan pelat grafit meliputi: sangat rapuh, kekuatan mekanik rendah, dan permeabilitas rendah. Dengan demikian, pelat bipolar jenis ini umumnya berukuran tebal dan berat guna menutupi kelemahan-kelemahan tersebut. Karena alasan-alasan ini, dan juga karena alasan biaya, pelat bipolar dari grafit dipandang tidak cocok untuk keperluan peralatan *portable* dan kendaraan.

2.3.5.2. Pelat Bipolar Logam

Logam, dalam bentuk lembaran merupakan material yang potensial untuk pelat bipolar karena memiliki konduktivitas listrik, termal, serta kekuatan mekanik yang baik dan mudah difabrikasi. Namun demikian, lingkungan operasi—dengan pH 2-3 pada temperatur sekitar 80°C—membuat pelat jenis ini akan mudah terkorosi sehingga terbentuk lapisan oksida yang dapat meningkatkan hambatan listrik sel dan menurunkan jumlah daya yang dikeluarkan ^[25]. Untuk menanggulangi hal tersebut dapat digunakan logam-logam mulia yang tidak memerlukan pelindung (*non-coated metal*), seperti emas, atau menggunakan logam-logam yang lebih murah dengan stabilitas kimia rendah namun diberi lapisan tambahan (*coated metal*).

Lebih jauh, salah satu studi ^[34] menyatakan bahwa material logam dan paduannya adalah pilihan final untuk pelat bipolar—menyingkirkan kandidat lainnya seperti keramik, polimer, semikonduktor, dan komposit—karena jumlah material logam yang tersedia, untuk alasan-alasan konduktivitas, korosi, kekuatan, keuletan, dan biaya, jauh lebih banyak dibandingkan jenis material lainnya.

2.3.5.3. Pelat Bipolar Komposit

Sesuai dengan prinsip aksi gabungan (*principle of combined action*)^[35], penggunaan lebih dari satu jenis material (komposit) dalam menyusun pelat bipolar akan menghasilkan sifat-sifat material yang lebih baik, asalkan material-material tersebut berada dalam jumlah yang sesuai. Dibanding dua jenis pelat sebelumnya, pelat komposit dianggap lebih unggul karena dua alasan utama yaitu ringan, dan dapat dibentuk menjadi berbagai bentuk dengan beragam ukuran^[25].

Pelat bipolar komposit dapat dibedakan menjadi pelat berbasis logam (*metal-based*) dan berbasis karbon (*carbon-based*); masing-masing dengan tambahan sejumlah resin polimer (termoplastik dan termoset) beserta sejumlah serat dan pengisi. Sifat-sifat pelat bipolar komposit—seperti pada umumnya sebuah komposit—ditentukan oleh faktor-faktor: (i) sifat material-material penyusun (makro konstituen), yakni matriks dan fasa terdispersi; (ii) jumlah relatif/konsentrasi konstituen; dan (iii) geometri fasa terdispersi (pengisi/ penguat) yang mencakup bentuk, ukuran, distribusi, serta arah pengisi/penguat.

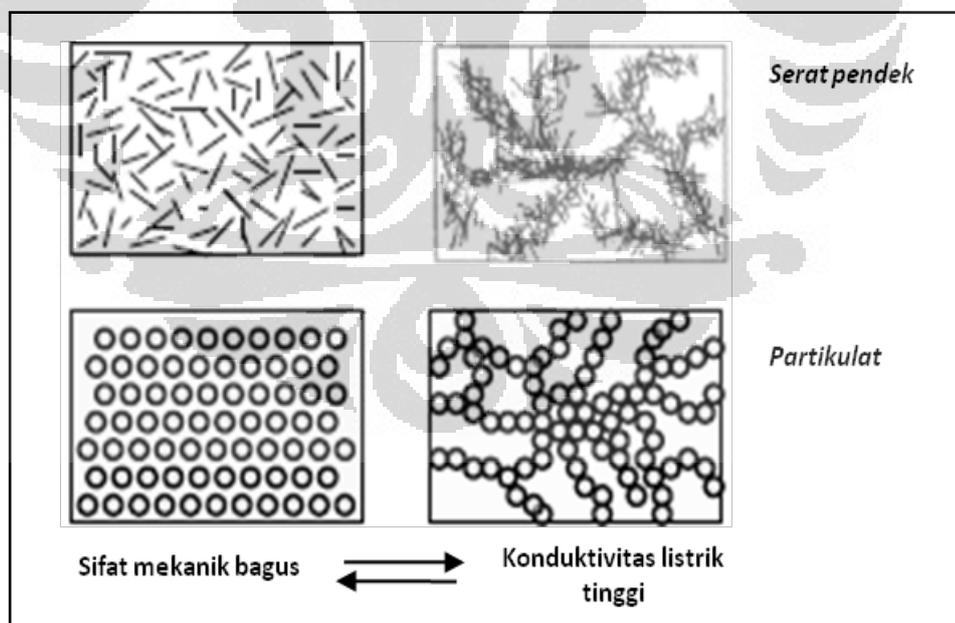
Pelat komposit berbasis logam, yang tersusun dari polikarbonat, grafit berpori, dan baja tahan karat, telah berhasil dikembangkan Los Alamos National Laboratory^{[24] [25]}. Pada pelat ini, grafit berpori, yang berfungsi sebagai penahan korosi, dipilih karena lebih murah dan mudah diproduksi dibanding grafit yang tidak berpori. Impermeabilitas sistem komposit akan dibebankan kepada baja tahan karat (*stainless steel*) yang juga berfungsi memberikan kekakuan pada material. Sedangkan resin polikarbonat menghasilkan ketahanan kimia dan mampu alir/proses yang baik terhadap komposit.

Seperti diperlihatkan oleh Gambar 2.10., pelat dengan basis karbon dapat dibuat dari beragam resin dengan pengisi konduktif dan dengan atau tanpa serat penguat (*reinforcement*). Banyak penelitian menunjukkan bahwa pelat bipolar komposit berbasis karbon menunjukkan kinerja yang baik. Beberapa hasil penelitian di bidang pelat bipolar komposit berbasis karbon diperlihatkan secara ringkas pada Tabel 2.3 dan—secara lebih deskriptif pada Lampiran A.

2.3.5.3.1. Konflik dalam desain pelat bipolar komposit polimer

Untuk mendapatkan pelat bipolar komposit dengan kekuatan mekanik dan kerapatan gas yang baik sesuai target DOE, maka fasa terdispersi (pengisi dan penguat) harus tersebar merata (*well-dispersed*) dan terurus dengan baik (*normally-aligned*) di dalam matriks polimer. Di sisi lain, target konduktivitas listrik dan termal DOE bisa dipenuhi jika pengisian partikel-partikel konduktif tinggi. Dengan konsentrasi yang tinggi, partikel-partikel terdispersi mampu beralomerasi, atau ada dalam jarak yang cukup dekat satu sama lain, sehingga dapat membentuk jalur perpindahan elektron (*electron conductive path*). Dua persyaratan ini menghasilkan konflik desain manakala hanya digunakan satu jenis fasa terdispersi saja. Ilustrasi konflik ditunjukkan oleh Gambar 2.12.

Konflik ini lebih terlihat dampaknya manakala jenis partikel pengisi yang digunakan berbentuk partikulat (dimensi partikel terdispersi hampir sama dalam semua arah ^[35]). Penelitian ^[36] menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi pengisi berbentuk serat, seperti MWNT dan serat karbon, berdampak pada naiknya nilai konduktivitas listrik dan kekuatan fleksural komposit.



Gambar 2.12. Ilustrasi konflik dalam desain pelat bipolar komposit dengan satu jenis fasa terdispersi dalam rangka mendapatkan sifat mekanik dan konduktivitas listrik yang baik.

Sumber: Ling Du, 2008, Highly conductive epoxy/graphite, h.22, telah diolah kembali. ^[22]

Lebih jauh, peningkatan konsentrasi pengisi dalam bentuk partikulat (seperti grafit dan karbon hitam, akan menaikkan nilai konduktivitas listrik sekaligus juga dapat menurunkan sifat mekanik komposit [36]. Salah satu cara menghindari konflik ini yakni dengan menggunakan lebih dari satu jenis pengisi dalam sistem komposit. Komposit seperti ini dikenal dengan nama *hybrid composite*, contohnya pada Tabel 2.3. Secara umum, komposit jenis ini menghasilkan kombinasi sifat-sifat yang lebih baik dibandingkan komposit polimer dengan pengisi atau penguat tunggal.

Tabel 2.3. Ikhtisar penelitian komposit hibrida untuk aplikasi pelat bipolar.

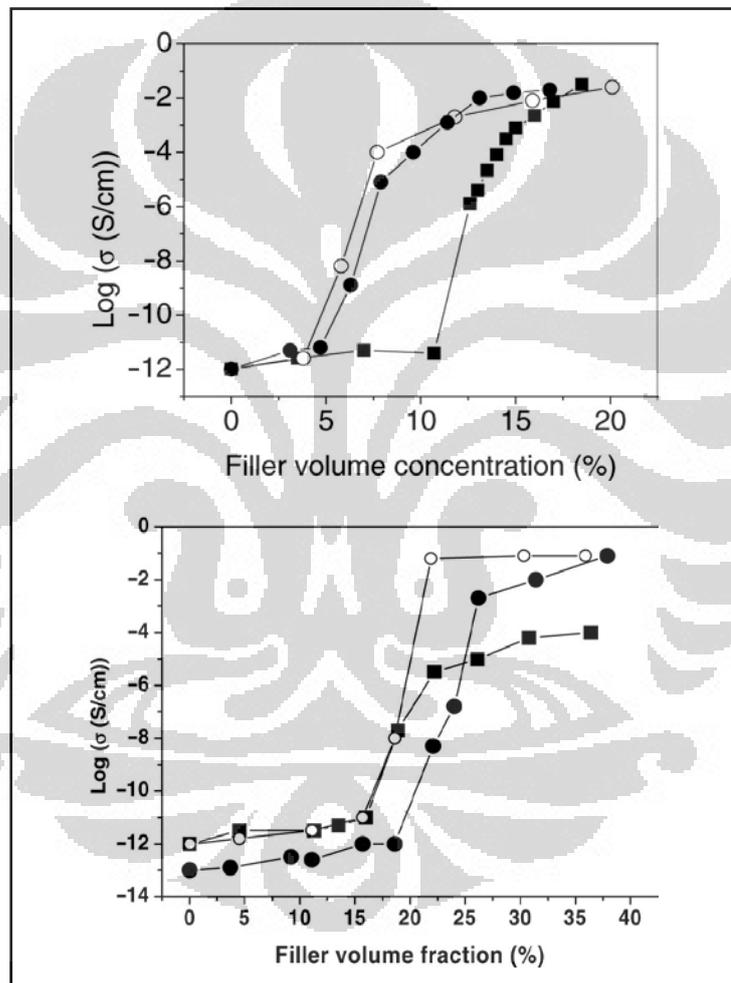
Publikasi Penelitian	Kondisi Optimum (target DOE: >100 S/cm, >59 MPa, & >41 MPa)						
	Resin (x wt%)	Jenis Resin	Pengisi (filler) (x wt%)	Serat penguat (fiber) (x wt%)	Konduktivitas (S/cm)	Kuat Fleksural (MPa)	Kuat Tarik (MPa)
Oktober 2010	Venol faromal-dehida	Termoset	Grafit	CNT ^{*)}	185.6	72.5	?
Agustus 2010	Epoksi	Termoset	Grafit	Beragam	87	?	?
Maret 2010	Venolik (35)	Termoset	Grafit (65)	MWNCT (1%)	178 (<i>in-plane</i>) 30 (<i>through-plane</i>)	56	?
Desember 2009	Polipropilena (79.5)	Termoplastik	CUNP ^{***)} (1,5)	Karbon hitam (20)	55,90	?	452,2
Agustus 2009	Novolak epoksi (15)	Termoset	Grafit	Karbon hitam	120	>38	?
Juli 2008	Polipropilena (20)	Termoplastik	Grafit (80)	MWCNT (4phr)	266 ^x 330 ^{xx} 548 ^{xxx}	± 25 ^x ± 26 ^{xx} ± 33 ^{xxx}	?
2008	Epoksi (50)	Termoset	EG ^{***)} (50)	Karbon hitam (5)	>200 (<i>in-plane</i>) 79 (<i>through-plane</i>)	44	26

?: tidak disebutkan; ^{*)} *carbon nanotube*, ^{**)} *multi-walled carbon nanotube*, ^{***)} *expanded graphite*;
⁺ditambah POA2000-DEGBA, ⁺⁺ditambah POA400-DGEBA; ^xHC-PP, ^{xx}MC-PP, ^{xxx}LC-PP.

Sumber: berbagai sumber (Lampiran A).

2.3.5.3.2. Konsep “percolation threshold”

Telah disebutkan sebelumnya bahwa seiring meningkatnya jumlah fasa terdispersi di dalam matriks polimer maka sifat-sifat komposit secara umum akan semakin baik. Dalam komposit polimer untuk aplikasi pelat bipolar, penambahan pengisi utamanya untuk meningkatkan sifat konduktivitas. Gambar 2.13 menunjukkan contoh perbandingan nilai konduktivitas listrik suatu komposit polimer dengan beragam jenis pengisi berbentuk serbuk.



Gambar 2.13. Variasi nilai konduktivitas listrik sebagai fungsi kandungan pengisi dalam komposit polimer. *Atas:* (○) karbon hitam, (●) karbon sintetis, dan (■) karbon aktif. *Bawah:* (○) timah, (●) tembaga, dan (■) seng.

Sumber: Pinto, dkk., Critical filler concentration, h. 1,2, telah diolah kembali ^[37].

Konsep “*percolation threshold*” dalam rekayasa komposit polimer memegang peranan penting guna mendapatkan konsentrasi optimum fasa terdispersi. Hal ini karena, bagaimanapun, meningkatnya pengisian partikel di dalam matriks polimer akan menurunkan sifat mekanik material (pada kasus pengisi partikulat) dan mampu alir komposit (pada pengisi berbentuk serat). Dengan kata lain, jika titik *percolation threshold* dapat diturunkan maka persyaratan konduktivitas dapat dicapai tanpa harus mengorbankan sifat-sifat mekanik secara signifikan. Titik ini secara umum dipengaruhi oleh jenis (Gambar 2.13.), ukuran, dan bentuk partikel pengisi serta teknik pencampuran konstituen komposit.

Jing dkk. ^[38] mempelajari pengaruh kuat *aspect ratio* (rasio panjang terhadap diameter, α) pengisi nano grafit (GNP) dan CNT terhadap *percolation threshold* (P_c) nanokomposit (resin epoksi), dengan pendekatan jarak antar partikel (*interparticle distance*, IPD). Penelitian berhasil menghitung bahwa P_c berbanding terbalik dengan α dan α^2 untuk sistem GNP/epoksi dan CNT/epoksi secara berturut-turut, dengan asumsi partikel terdispersi sempurna. Selain itu, dispersi partikel di dalam nanokomposit juga berpengaruh terhadap P_c , yakni semakin rendah kualitas dispersi maka P_c akan semakin tinggi. Oleh peneliti, teknik IPD direkomendasikan sebagai teknik yang cocok untuk memprediksi P_c nanokomposit.

Pada waktu berbeda, Benito dan Olmos ^[39] meneliti pengaruh teknik pencampuran nanokomposit terhadap tingkat dispersi. Tim menemukan bahwa metode mekanik (*solid state method*) menggunakan mesing giling (*high-energy ball milling*, HEBM) menghasilkan dispersi partikel nano yang homogen di dalam matriks (polimer semikristalin dan amorfus); ditinjau dari kristalinitas dan sifat tembus cahaya. Dengan demikian, metode ini dapat menggantikan metode kimiawi basah atau teknik lelehan yang memerlukan bahan tambahan (pelarut) dan temperatur tinggi.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

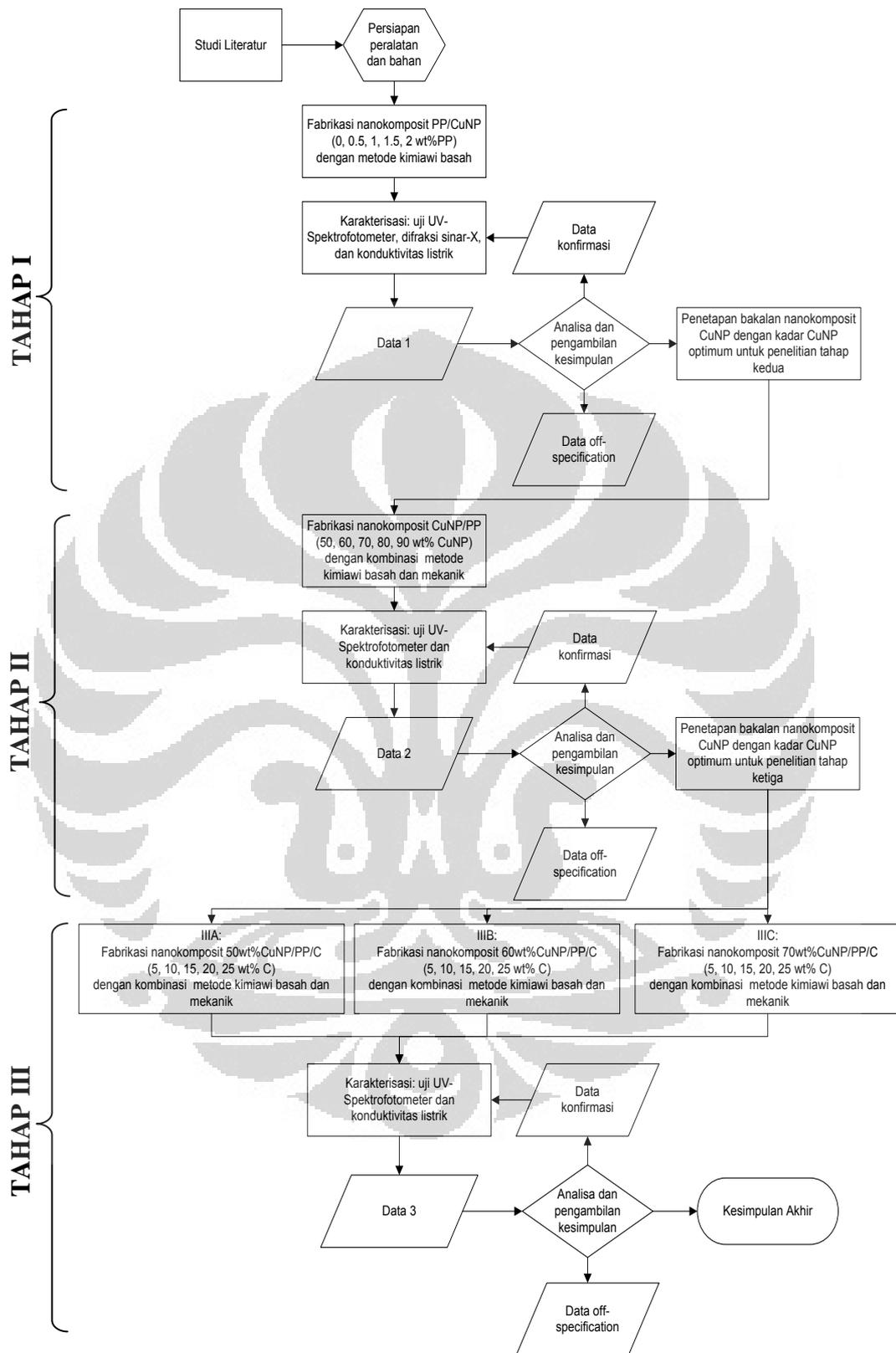
3.1. Diagram Alir Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan kerja sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 3.1. Secara umum penelitian dilaksanakan dalam tiga tahapan sebagai berikut:

Pada tahap pertama, dilakukan fabrikasi bakalan nanokomposit dengan mengisikan nanopartikel tembaga (CuNP) ke dalam matriks Polipropilena (PP). Peresentase CuNP yang ditambahkan bervariasi yakni 0; 0,5; 1; 1,5; dan 2 wt%. Selanjutnya, bakalan nano komposit dikarakterisasi guna mengetahui pengaruh pengisian CuNP terhadap nanokomposit PP/CuNP. Karakterisasi meliputi uji UV-Spektroskopi, difraksi sinar-X, dan konduktivitas listrik. Hasil-hasil uji diolah dan dianalisis untuk mendapatkan sebuah kesimpulan. Kesimpulan yang diperoleh menjadi dasar dalam penelitian tahap kedua.

Pada tahap kedua, dengan mengacu kepada kesimpulan tahap pertama dilakukan fabrikasi bakalan nanokomposit CuNP/PP. Berbeda dari tahap pertama, pada tahap ini konsentrasi CuNP ditingkatkan jauh melampaui tahap sebelumnya. Bakalan nanokomposit divariasikan berdasarkan persentase CuNP yaitu sebanyak 50; 60; 70; 80; dan 90 wt%. Bakalan dikarakterisasi melalui uji UV-Spektroskopi dan konduktivitas. Data-data hasil pengujian dianalisa untuk melihat pengaruh presentase CuNP dalam sistem nanokomposit CuNP/PP, khususnya terhadap sifat konduktivitas listrik. Kesimpulan yang diperoleh pada tahap ini menjadi dasar penelitian pada tahap ketiga.

Pada tahap ketiga, bakalan nanokomposit dibuat dengan mencampur tiga makro konstituen yaitu CuNP, PP, dan karbon hitam (C). Karena variasi berat lebih kompleks, pada tahap ini penelitian dibagi menjadi:



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian keseluruhan.

- *Tahap IIIA*, pada tahap ini persentase CuNP dibuat tetap yakni sebesar 50 wt%, sedangkan persentase C adalah 5, 10, 15, 20, dan 25 wt%. Persentase berat PP disesuaikan dengan persentase berat CuNP dan C dalam sistem CuNP/PP/G.
- *Tahap IIIB*, pada tahap ini persentase CuNP dibuat tetap yakni sebesar 60 wt%. Variasi persentase C adalah 5, 10, 15, 20, dan 25 wt%. Persentase berat PP disesuaikan dengan persentase berat CuNP dan G dalam sistem CuNP/PP/G.
- *Tahap IIIC*, pada tahap ini persentase CuNP dibuat tetap yakni sebesar 70%. Variasi persentase C adalah 5, 10, 15, 20, dan 25 wt%. Persentase berat PP disesuaikan dengan persentase berat CuNP dan GC dalam sistem CuNP/PP/G.

Setiap bakalan dikarakterisasi guna mengetahui pengaruh pengisian partikel CuNP dan G dalam nanokomposit CuNP/PP/G.

3.2. Peralatan dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam riset ini adalah sebagai berikut:

- | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| • Magnetik Stirred Heat (MSH), | • Pengaduk kaca |
| • Thermometer | • Alumunium Foil Plastik sampel |
| • Corong kaca | • Sarung tangan plastik |
| • Kacamata pelindung | • Penutup hidung dan mulut |
| • Timbangan Digital | • UV-Vis spectrophotometer |
| • Alat pengerus | • Mesin uji XRD |
| • Kertas ampelas | • Mesin uji konduktivitas listrik |
| • Labu Erlenmeyer | • Alat press |
| • Gelas Ukur | • Brinell hardness tester |
| • Pipet tetes | • Kamera Digital |

Sedangkan bahan-bahan yang dipakai dalam pembuatan nanokomposit tembaga dan karbon pada penelitian ini, adalah:

- Xylene (pelarut organik) PA,
- Nanopartikel tembaga (CuNP)
- PP-g-MA
- Karbon hitam (C)
- Polipropilena (PP) untuk injection molding – HI 35 HO

3.3. Material Komposit

Dalam menyusun material komposit digunakan beragam material dasar (*raw material*) yang terdiri dari: PP, PP-g-MA, CuNP, dan G. Penampang material-material ini ditunjukkan oleh Gambar 3.2. berikut ini.



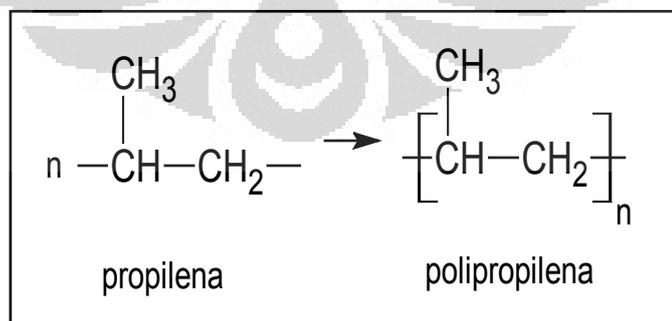
Gambar 3.2. Material penyusun nanokomposit.

3.3.1. Matriks: Polipropilena

Polimer matriks yang digunakan dalam penelitian ini adalah homopolimer polipropilena (PP) yang diproduksi oleh PT Tri Polyta Indonesia Tbk (sekarang PT Chandra Asri Petrochemical Tbk) Anyer-Banten; dengan kode HI 35 PO (MFR 35 g/10 min dan densitas 0,903 g/cm², Lampiran C). PP dengan kode ini, merupakan salah satu bahan baku untuk produksi massal dengan metode *injection molding*. Dalam konteks penelitian ini, resin termoplastik PP dipilih karena memiliki kelebihan dari sisi produksi masal dan dapat dilelehkan ulang, dibanding resin termoset.

Polipropilena merupakan jenis termoplastik kristalin, tersedia dalam kondisi homopolimer, kopolimer (bersama etilena), serat, atau film, dengan beragam kelas (*grade*). Polipropilena diperoleh dengan cara polimerisasi monomer propilena. Rantai PP homopolimer (Gambar 3.3.) memiliki tiga stereoisomerisme: *syndiotactic*, *isotactic*, dan *atactic*. PP *syndiotactic* dan *isotactic* menunjukkan pola kristalin, sedangkan PP *atactic* bersifat amorf.

Sifat-sifat polipropilena meliputi: (i) densitas paling rendah dibanding termoplastik lain; (ii) ketahanan panas baik; (iii) ketahanan kimia baik, kecuali terhadap bensin, Xylene, dan larutan-larutan terklorinasi; (iv) penyerapan air sangat kecil (dapat diabaikan), (v) hambatan listrik sangat tinggi, dan mudah diproses. Sifat-sifat PP isotaktik Kelemahan utama PP adalah sangat rapuh pada temperatur sekitar 0°C. [40-42]



Gambar 3.3. Reaksi pembentukan homopolimer polipropilena.

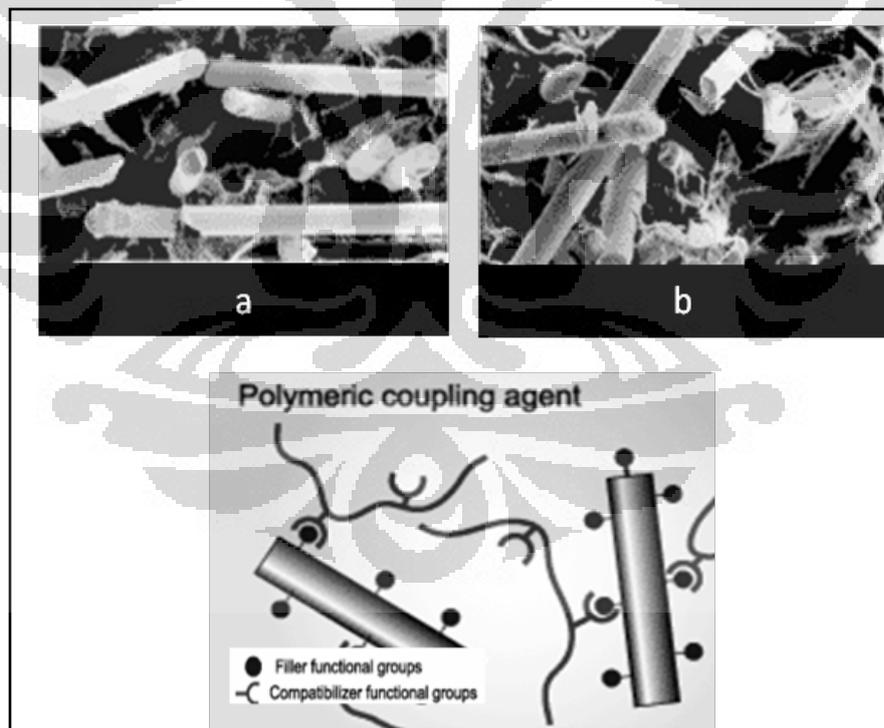
Beberapa sifat material polipropilena isotaktik adalah sebagai berikut ^[43]:

- Berat molekul $[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)-]$ sebesar $42,7 \text{ g mol}^{-1}$;
- Densitas antara $0,90 - 0,91 \text{ g m}^{-3}$ pada 25° untuk aplikasi transportasi;
- Derajat kristalinitas 50-70 %;
- Temperatur transisi gelas (T_g) $10,7^\circ\text{C}$ (30 Hz) dan $2,5^\circ\text{C}$ (1 Hz);
- Indeks refraksi/pembiasan (n_D) $1,5030$ (20°C , densitas $0,9075 \text{ g cm}^{-3}$);
- Temperatur leleh (T_m) $\sim 186^\circ\text{C}$ (100% kristalin);
- *Yield stress* $34,5 \text{ MPa}$ (ASTM D368);
- *Yield strain* 10% (ASTM D638);
- Modulus fleksural 1.389 MPa (ASTM D790);
- Kekuatan impak izod 27 J m^{-1} (ASTM D256);
- Kekerasan (*hardness*) R90 (ASTM D875);
- Temperatur defleksi (pelengkungan) 107°C (ASTM D648);
- Konstanta dielektrik (ϵ') $2,2-2,3$ (1 KHz) dan $2,1-2,3$ (1 MHz);
- Kekuatan dielektrik $240.000 \text{ V cm}^{-1}$ (25°C);
- Hambatan volum (*volume resistivity*) $10^{16}-10^{17} \Omega\text{-cm}$ (ASTM D257);
- Kecepatan alir (*melt flow rate, MFR*) $0,2 \rightarrow 500 \text{ g (10 min)}^{-1}$ (ASTM D 1238);
- Indeks oksigen 17,4% (ASTM D2863);
- Temperatur dekomposisi 350°C (TGA dalam helium);
- Temperatur pembakaran 463°C ;

3.3.2. Aditif: PP-g-MA

PP-g-MA (*polypropylene-graft-maleic anhydride*) bertindak sebagai *coupling agent* (CA), diproduksi oleh Aldrich Chemistry – Amerika Serikat. PP-g-MA bertugas memperbaiki ikatan antara dua fasa tak seragam (*dissimilar phase*)^[41], yakni matriks polimer dan pengisi inorganik^[40], dengan cara menjadi “jembatan”^[44] antara permukaan matriks dengan pengisi (Gambar 3.4.). PP-g-MA diperoleh dengan teknik kopolimerisasi cabang (*graft copolymerization*) padatan PP isotaktik^[45]. Rumus senyawa PP-g-MA yang digunakan adalah $C_7H_8O_3$ dengan titik didih (*melting point*) pada temperatur $156^{\circ}C$.

Reaksi kimia^[41] antara CA dengan resin dan pengisi komposit, menjadikan komposit lebih tahan lama dan kuat, serta terjadi peningkatan pada sifat-sifat mekanik dan listrik. CA yang ditambahkan bisa dalam fasa gas atau larutan^[46]. Gambar 3.4. memperlihatkan struktur mikro komposit PP dengan dan tanpa CA.



Gambar 3.4. Atas: Penampang mikrostruktur homopolimer PP + 30% serat gelas: (a) tanpa dan (b) ditambah 5% *coupling agent*. **Bawah:** Ilustrasi kerja PP-g-MA: satu tangan berikatan dengan PP dan tangan yang lain bergandengan CuNP.

Sumber: www.specialchem4polymers.com, telah diolah kembali^[47].

3.3.3. Pengisi 1: Nanopartikel Tembaga

Serbuk nanotembaga (CuNP) berlapis karbon (*carbon coated*) digunakan sebagai bahan pengisi konduktif (listrik). CuNP yang berasal dari Nabond Technologies Co.Ltd – Cina ini, memiliki ukuran 25 nm (rata-rata), densitas 0,15-0,35 g/cm³, dan *specific surface area* 30-50 m²/g. Serbuk CuNP berwarna hitam kecoklatan (Gambar 3.5) serta mengandung: Cu (>93,58%), Si (<0,006%), Ca (<0,08%), S (<0,003%), dan karbon (<2,08%). CuNP diproduksi secara fisika dengan metode penguapan laser (*laser evaporation*)^[48]. Penanganan material meliputi: (i) CuNP bersifat mudah terbakar^[48] sehingga harus dipak dalam kondisi vakum serta disimpan di ruang yang dingin dan kering—kehadiran gas akan mempengaruhi dispersi dan kinerja^[49], (ii) CuNP tidak boleh berada di bawah tekanan^[49], (iii) umur simpan (*shelf life*) lebih dari dua tahun^[48], dan (iv) dihindarkan dari muatan listrik statis^[50].



Gambar 3.5. CuNP (*carbon coated*) diproduksi oleh NaBond Technologies Co., Ltd.

Sumber: Nabond's Cu nanopowder specification, h.1^[48].

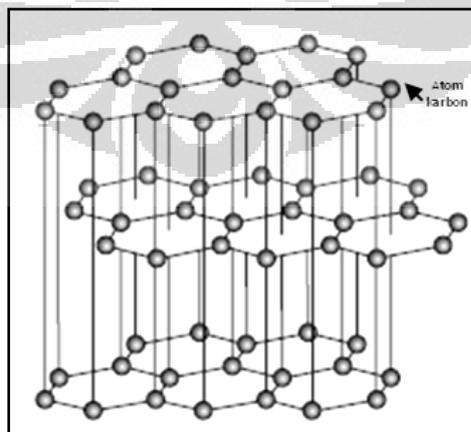
3.3.4. Pengisi 2: Grafit

Serbuk grafit (*graphite*, G) digunakan sebagai pengisi (*filler*) dan penguat, diimpor dari China, tanpa keterangan. Penambahan grafit diharapkan berdampak pada peningkatan sifat listrik dan juga sifat mekanis bakalan nanokomposit.

Karbon adalah salah satu unsur dengan beragam polimorf dan tidak betul-betul masuk dalam salah satu kategori: logam, keramik, atau polimer^[35]. Salah satu polimorf karbon adalah grafit, polimorf paling stabil yang sering diklasifikasikan

sebagai keramik. Dibandingkan dengan intan (*diamond*, polimorf karbon lainnya), grafit adalah mineral paling lunak dengan konduktivitas listrik yang baik dan buram^[51]. Grafit secara natural muncul lewat metamorphosis material organik^[51] yang terdapat pada bebatuan seperti marmer, *schist*, dan *gneiss*^[52]. Grafit dapat pula disintesis (*synthetic graphite* atau *artificial graphite*) dengan cara menggrafitisasi karbon-karbon non-grafit yang amorf^[53] yang berasal dari senyawa hidrokarbon, menggunakan teknik *chemical vapour deposition* (CVD) pada temperatur di atas 2500 K^[54].

Grafit memiliki struktur kristalin yang sangat anisotropik^[55]. Atom-atom karbon dalam grafit tersusun secara heksagonal (Gambar 3.6.) dan membentuk lapisan-lapisan. Antar atom terbentuk ikatan kovalen yang kuat, sementara antar lapisan terbentuk ikatan van der Wals yang lemah^[35]. Ikatan antar lapisan (*interplanar bonds*) yang lemah menyebabkan material ini sangat lembek (*soft*). Akan tetapi, manakala grafit diubah bentuknya menjadi serat-serat (disebut *graphite* atau *carbon fibre*^[44]) lalu dipilin menjadi benang-benang dan digunakan bersama resin pengikat (misalnya epoksi) maka akan dihasilkan komposit dengan kekuatan mekanis yang sangat baik^[51]. Sifat-sifat grafit merupakan gabungan dari sifat logam dan non-logam^[52]. Sifat logam yang ada pada grafit meliputi: konduktivitas listrik (mencapai 5×10^2 S/cm untuk grafit sintetis^[38]) dan termal, sedangkan sifat non-logam meliputi: inert, ketahanan termal, dan kemampuan untuk melumasi (*lubricity*).



Gambar 3.6. Struktur grafit.

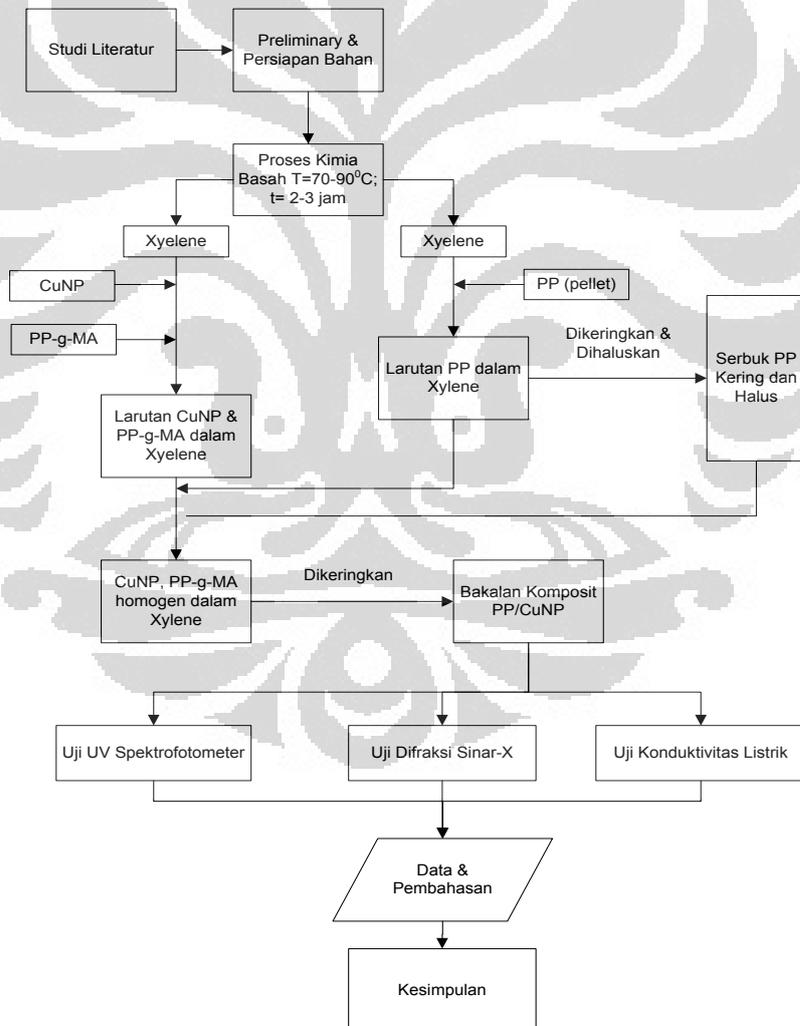
Sumber: Callister, Materials science & engineering, h.401, telah diolah kembali^[35].

3.3.5. Xylene

Sebagai tambahan, dalam fabrikasi nanokomposit dengan teknik kimiawi basah juga digunakan pelarut organik Xylene. Xylene yang digunakan adalah Xylene untuk analisis (*xylene for analysis*) diproduksi oleh Merck – Jerman. Rumus senyawa Xylene yang digunakan adalah $C_6H_4(CH_3)_2$. Unsur-nsur lain yang juga turut hadir di dalam Xylene mencakup Al, B, Ba, Ca, Co, Cd, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Sn, dan Zn.

3.4. Penelitian Tahap Pertama

Rangkaian kerja tahap pertama ditunjukkan oleh Gambar 3.7.



Gambar 3.7. Diagram alir penelitian tahap pertama.

Sumber: Yuwono, dkk., Laporan Penelitian Hibah Bersaing, h.13, telah diolah kembali ^[15].

Telah disebutkan sebelumnya, di antara tujuan penelitian ini yakni melakukan perbaikan terhadap penelitian serupa berjudul “Pembuatan Pelat Bipolar Sel Bahan Bakar Membran Polimer dengan Nanokomposit Tembaga dan Karbon dalam Matrik Polipropilena” oleh Yuwono dkk. Dalam rangka itu, penelitian tahap pertama^[15] pada penelitian tersebut akan diulang kembali dalam penelitian ini, serta ditetapkan sebagai tahap pertama pula.

3.4.1. Persentase (%) PP Terlarut dalam Xylene

Polipropilena adalah senyawa organik yang larut dalam pelarut organik Xylene. Kelarutan PP dalam Xylene membantu pembuatan bakalan nanokomposit dengan metode kimiawi basah. Penelitian sebelumnya menetapkan bahwa 30-25 gram pelet PP larut dalam 150 ml Xylene, dengan parameter alat stir MSH: temperatur (T)=4 dan putaran (M)=3. Pada kondisi demikian, kecepatan pelarutan PP dalam Xylene berkisar 30–60/menit. Informasi-informasi tersebut dikonfirmasi ulang dalam penelitian ini. Dalam pada itu, pada penelitian ini dilakukan fabrikasi blanko PP dengan rasio 1:6 dan 1:5, untuk PP dan Xylene secara berturut-turut.

3.4.1.1. Fabrikasi Blanko PP/Xylene Rasio 1:6

Pada tahap ini ditempuh langkah-langkah berikut:

- i. Disiapkan 50 gram PP dan 300 ml Xylene (rasio 1: 6).
- ii. 300 ml Xylene dalam tabung Erlenmeyer diletakkan pada mesin MSH.
- iii. Mesin MSH dinyalakan dan berputar pada temperatur 140°C.
- iv. 50 gram PP ditambahkan sedikit demi sedikit ke dalam larutan Xylene sampai habis.
- v. Setelah semua PP sudah ditambahkan, pengadukan (*stirring*) dengan MSH tetap berlangsung dan pada kecepatan yang sama.
- vi. Setelah ±48 jam, semua PP sudah terlarut sempurna.
- vii. Proses pengadukan dengan MSH dihentikan.

- viii. Campuran PP/Xylene dalam labu Erlenmeyer ditutup dengan aluminum foil dan dikeringkan pada temperatur ruang.

Hasil yang diperoleh berupa padatan blanko PP berwarna putih susu, rapuh, dan beraroma Xylene. Hasil ini ditetapkan layak pakai (*on-spec*).

3.4.1.2. Fabrikasi Blanko PP/Xylene Rasio 1:5

Pada tahap ini ditempuh langkah-langkah berikut:

- i. Disiapkan 31,60 gram PP dan 150 ml Xylene (rasio ~1:5).
- ii. 150 ml Xylene dalam tabung Erlenmeyer diletakkan pada mesin MSH.
- iii. Mesin MSH dinyalakan dan berputar pada temperatur 140°C.
- iv. 31,60 gram PP ditambahkan sedikit demi sedikit ke dalam larutan Xylene sampai habis.
- v. Setelah semua PP sudah ditambahkan, pengadukan dengan MSH tetap berlangsung dan pada kecepatan yang sama.
- vi. Setelah ± 28 jam, teramati bahwa PP tidak larut dan hanya mengembang.
- vii. Proses pengadukan diputuskan untuk dihentikan.

Hasil pada tahap ini ditetapkan tidak layak (*off-spec*). Diperkirakan kegagalan bersumber dari sampel PP yang kotor. Dengan demikian tahapan ini akan diulangi guna mendapatkan hasil yang lebih baik.

3.4.1.3. Rekonfirmasi Fabrikasi Blanko PP/ Xylene Rasio 1:5

Kegiatan yang dilakukan pada poin ini sama dengan yang dilakukan pada poin 3.4.1.2., hanya saja PP yang digunakan lebih bersih. Hasilnya PP terlarut sempurna setelah ± 48 jam. Blanko PP yang didapat memiliki wujud dan aroma yang sama dengan blanko rasio 1:6. Blanko ditetapkan sebagai layak pakai.

3.4.2. Perbandingan CuNP dengan PP-g-MA

Perbandingan CuNP dengan PP-g-MA yang optimum berguna agar partikel CuNP yang dilarutkan bersama PP-g-MA di dalam Xylene dapat diikat oleh gugus MA.

Hal ini membantu proses pembuatan bakalan nanokomposit PP/CuNP dengan metode kimiawi basah. Perbandingan CuNP dan PP-g-MA pada penelitian ini mengikuti rasio yang ditetapkan oleh penelitian sebelumnya, yakni 20:1. Dengan rasio ini CuNP terlarut sempurna bersama PP-g-MA di dalam Xylene.

3.4.3. Pembuatan bakalan nanokomposit PP/CuNP

Bakalan nanokomposit PP/CuNP difabrikasi melalui metode kimiawi basah. Persentase CuNP yang akan dipakai dihitung dengan mengikuti persamaan berikut:

$$wt\%Cu = \frac{\text{gram Cu}}{\text{gram Cu} + \text{gram PP-g-MA} + \text{gram PP}} \times 100\% \quad (8)$$

Mengacu pada hasil penelitian sebelumnya, kadar setiap komponen penyusun bakalnanokomposit dengan variasi berat CuNP ditunjukkan oleh Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Parameter proses fabrikasi nanokomposit PP/CuNP

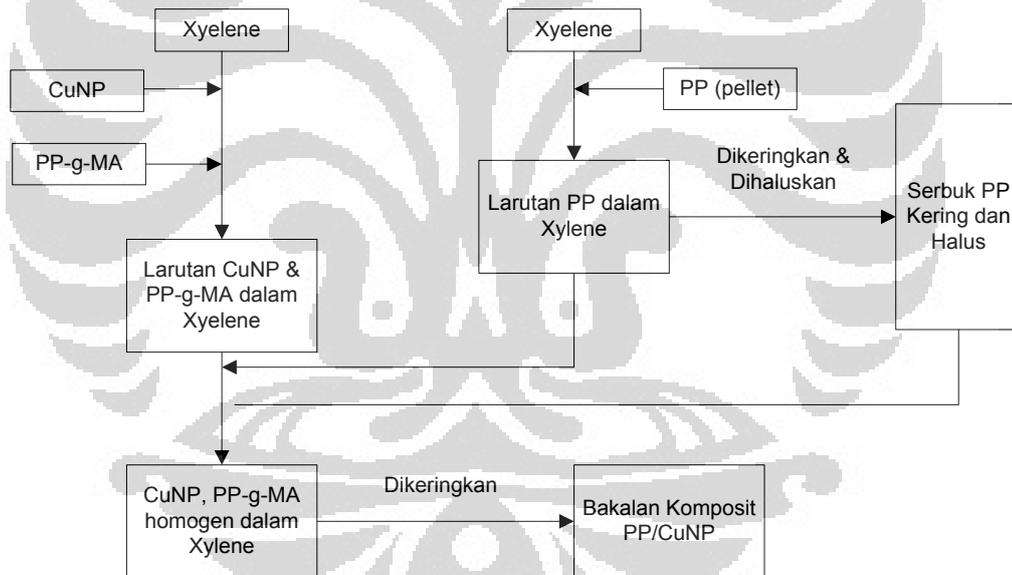
Jenis sampel (wt% CuNP)	MSH I				MSH II		
	CuNP (gr)	PP-g-MA (gr)	Xylene (ml)	MSH	PP (gr)	Xylene (ml)	MSH
0,5	0,1	2	150	T=4, M=3	17,8	150	T=4 M=3
1	0,4	8	150		31,6	150	
1,5	0,2	4	150		9,13	150	
2	0,8	16	150		23,2	150	

Secara garis besar, tahapan fabrikasi bakalan nanokomposit PP/CuNP dengan teknik kimiawi basah (Gambar 3.8.) untuk setiap sampel adalah sebagai berikut:

- i. Penimbangan massa CuNP, PP-g-MA, dan PP sesuai dengan Tabel 3.1. di atas.
- ii. Di atas masing-masing MSH pertama dan MSH diletakkan satu labu erlemeyer berisi 150 ml Xylene.
- iii. Kedua MSH lalu dinyalakan pada T =4 dan M=3.
- iv. Pada MSH pertama, CuNP dimasukkan sedikit demi sedikit ke dalam Xylene pada MSH pertama sampai gumpalan-gumpalan hilang. Setelah

itu, PP-g-MA ikut dimasukkan secara perlahan sampai tidak ada lagi partikel CuNP yang mengendap di dasar labu.

- v. Pada MSH kedua, PP dimasukkan sedikit demi sedikit hingga terlarut sempurna.
 - vi. PP yang sudah terlarut sempurna di MSH kedua kemudian dimasukkan ke dalam MSH pertama, yang berisi CuNP/PP-g-MA, sedikit demi sedikit sampai homogen.
 - vii. Setelah selesai sampel dikeringkan pada temperatur ruang selama ± 24 jam.
- Hasil yang diperoleh adalah empat jenis bakalan nanokomposit PP/CuNP dengankadar CuNP: 0,5; 1; 1,5; dan 2 wt%. Bakalan berwarna putih kecoklatan, rapuh, dan beraroma Xylene.



Gambar 3.8. Diagram alir fabrikasi nanokomposit PP/CuNP dengan teknik kimiawi basah.

Sumber: Sumber: Katili, dkk., Laporan Penelitian Hibah Bersaing, h.19, telah diolah kembali ^[15].

3.4.4. Pembuatan Sampel Uji Nanokomposit PP/CuNP

Setelah semua bakalan nanokomposit PP/CuNP (0,5-2 wt%) berhasil didapatkan, langkah berikutnya adalah melakukan preparasi sampel terhadap bakalan-bakalan tersebut. Langkah awal yang ditempuh dalam preparasi sampel PP/CuNP adalah

mengubah bentuk bakalan-bakalan dari padatan menjadi serbuk dengan cara digerus (*manual crushing*). Serbuk-serbuk ini, bersama serbuk blanko 100 wt% PP, 100 wt% CuNP, dan 100 wt% grafit akan digunakan sebagai sampel uji UV-Spektroskopi, difraksi sinar-X, dan uji konduktivitas. Untuk keperluan uji konduktivitas sampel serbuk dibentuk padatan yang lebih kompak dengan geometri selaras mesin uji melalui teknik *hot press* (Gambar 3.10.).

3.5. Penelitian Tahap Kedua

Hasil pengujian pada tahap pertama menunjukkan nilai konduktivitas listrik yang sangat kecil—sekalipun pada penelitian terdahulu nilai konduktivitas listrik yang diperoleh cukup baik (antara 5-14 S/cm) ^[15]. Hal ini terutama sekali disebabkan oleh metode uji konduktivitas listrik yang berbeda antara penelitian ini penelitian terdahulu. Metode-metode ini akan dibahas lebih lanjut di bagian 3.7.3. Karena konduktivitas sampel tahap pertama terlampau kecil, maka pada tahap kedua konsentrasi CuNP dalam PP/CuNP ditingkatkan secara signifikan. Dengan teknik preparasi sampel yang hampir sama diharapkan nilai konduktivitas listrik sampel-sampel meningkat tajam. Untuk membedakan dengan tahap pertama, nama sampel diubah dari PP/CuNP menjadi CuNP/PP.

3.5.1. Fabrikasi bakalan nanokomposit CuNP/PP

Metode fabrikasi bakalan nanokomposit yang ditempuh dalam tahap ini adalah kimiawi basah yang mirip dengan tahap pertama (Gambar 3.8.). Tabel 3.2. menunjukkan kadar masing-masing komponen penyusun nanokomposit CuNP/PP.

Tabel 3.2. Parameter proses fabrikasi nanokomposit PP/CuNP

Jenis Sampel (wt% CuNP)	MSH I				MSH II		
	CuNP (gr)	PP-g-MA (gr)	Xylene (ml)	MSH	PP (gr)	Xylene (ml)	MSH
50	2,5	0,5	150	T=4, M=3	2	150	T=4 M=3
60	3	0,4	150		1,6	150	
70	3,5	1,2	150		0,3	150	
80	4,0	0,2	150		0,8	150	
90	4,5	0,1	150		0,4	150	

Langkah-langkah yang ditempuh dalam fabrikasi sebagai berikut:

- i. Penimbangan massa CuNP, PP-g-MA, dan PP sesuai Tabel 3.2.
- ii. Di atas masing-masing, MSH pertama dan MSH, diletakkan satu labu erlemeyer berisi 150 ml Xylene.
- iii. Kedua MSH lalu dinyalakan pada $T = 4$ dan $M = 3$.
- iv. Pada MSH pertama, CuNP dimasukkan sedikit demi sedikit sampai habis ke dalam Xylene.
- v. Setelah itu, PP-g-MA ikut dimasukkan secara perlahan sampai tidak ada lagi partikel CuNP yang mengendap di dasar labu.
- vi. Pada MSH kedua, PP dimasukkan sedikit demi sedikit hingga terlarut sempurna di dalam Xylene.
- vii. PP yang sudah terlarut sempurna di MSH kedua kemudian dimasukkan ke dalam MSH pertama, yang berisi CuNP/PP-g-MA, sedikit demi sedikit sampai homogen.
- viii. Setelah selesai, sampel dikeringkan pada temperatur ruang selama ± 24 jam.

Hasil yang diperoleh adalah lima jenis bakalan nanokomposit CuNP/PP dengan kadar CuNP: 50, 60, 70, 80, dan 90 wt%. Bakalan berwarna putih kecoklatan, rapuh, dan beraroma Xylene.

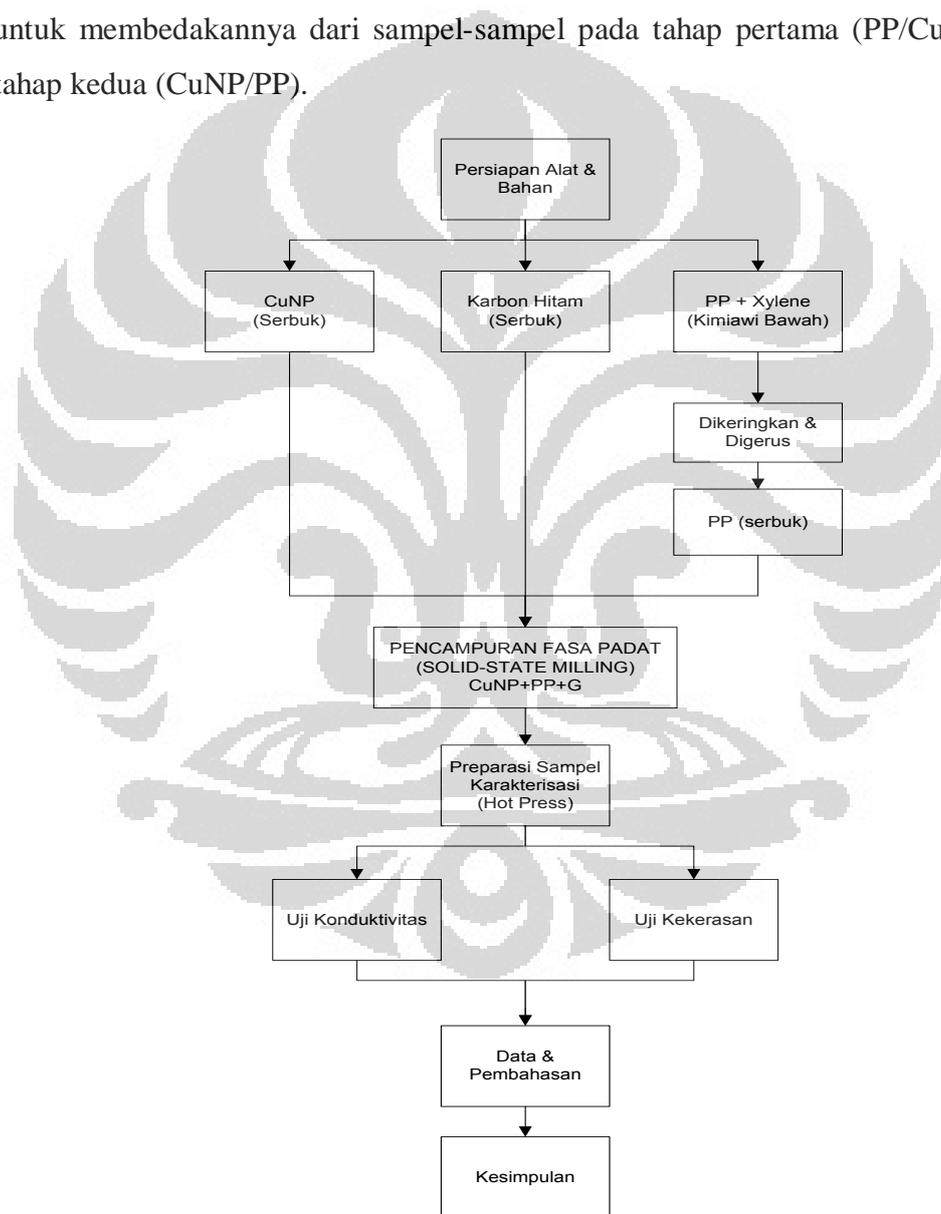
3.5.2. Pembuatan Sampel Uji Nanokomposit CuNP/PP

Bakalan nanokomposit CuNP/PP yang sudah kering diubah ke dalam bentuk serbuk untuk keperluan uji UV-Spektroskopi dan uji konduktivitas listrik. Perlakuan sampel pada tahap preparasi sama dengan yang dilakukan pada bakalan nanokomposit PP/CuNP.

3.6. Penelitian Tahap Ketiga

Jika pada tahap pertama dan kedua penelitian difokuskan untuk mencari pengaruh kadar CuNP dalam sistem PP/CuNP dan CuNP/PP, maka di tahap ketiga (Gambar

3.9.) akan dipelajari pengaruh penambahan kadar grafit (G) terhadap sifat mekanis dan listrik bakalaan nanokomposit. Dalam sistem ini CuNP berfungsi sebagai pengisi konduktif, PP sebagai resin pengikat partikel-partikel CuNP dan G, sedangkan G berfungsi sebagai penguat (*reinforcement*) sekaligus juga sebagai pengisi konduktif (*conductive filler*). Kadar masing-masing komponen dalam bakalan nanokomposit ditunjukkan oleh Tabel 3.3. Total ada 15 buah sampel nanokomposit yang akan diamati. Sampel di tahap ini diberi nama CuNP/PP/G untuk membedakannya dari sampel-sampel pada tahap pertama (PP/CuNP) dan tahap kedua (CuNP/PP).



Gambar 3.9. Diagram alir penelitian tahap ketiga.

Pada tahap ini, nanokomposit CuNP/PP/G tidak difabrikasi dengan metode kimiawi basah melainkan dengan cara mengaduk (*milling*) secara manual serbuk CuNP, PP, dan G sampai homogen. Cara pencampuran seperti ini dikenal sebagai teknik pencampuran fasa-padat (*solid state mixing*). Pencampuran seperti ini lebih mudah dibanding teknik kimiawi basah karena tidak memerlukan pelarut (Xylene), aditif (PP-g-MA), dan bisa dilakukan pada temperatur rendah. Di samping itu, berdasarkan penelitian sebelumnya ^[39] terbukti teknik ini mampu menghasilkan dispersi pengisi yang efisien. Meski begitu, teknik kimiawi basah tetap digunakan untuk melarutkan pelet PP guna mendapatkan resin berbentuk serbuk halus.

Tabel 3.3. Parameter proses fabrikasi nanokomposit CuNP/PP/G

No	wt% CuNP	gr CuNP	wt% PP	gr PP	wt% G	gr G	Kode Sampel
1	50	5	45	4,5	5	0,5	-
2	50	5	40	4	10	1	-
3	50	5	35	3,5	15	1,5	-
4	50	5	30	3	20	2	-
5	50	5	25	2,5	15	2,5	-
6	60	6	35	3,5	5	0,5	N1K10
7	60	6	30	3	10	1	N1K1
8	60	6	25	2,5	15	1,5	N35K37
9	60	6	20	2	20	2	K38
10	60	6	15	1,5	15	2,5	N5K11
11	70	7	25	2,5	5	0,5	-
12	70	7	20	2	10	1	-
13	70	7	15	1,5	15	1,5	-
14	70	7	10	1	20	2	-
15	70	7	5	0,5	15	2,5	-

3.6.1. Pembuatan bakalan nanokomposit 50CuNP/PP/G (IIIA)

Langkah-langkah yang ditempuh adalah sebagai berikut:

- i. PP dipersiapkan dengan metode kimiawi basah lalu dikeringkan dan digerus.
- ii. CuNP, PP, dan G ditimbang sesuai dengan parameter proses pada Tabel 3.3.
- iii. CuNP, PP, dan G dimasukkan ke dalam lumpang kemudian digerus.

- iv. Penggerusan dilakukan sampai ketiga zat homogen, yakni sampai warna sampel rata.

Hasil yang diperoleh berupa lima jenis serbuk nanokomposit 50CuNP/PP/G dengan kadar C: 5, 10, 15, 20, dan 25 wt%. Serbuk berwarna coklat kehitaman.

3.6.2. Pembuatan bakalan nanokomposit 60CuNP/PP/G (IIIB)

Langkah-langkah yang ditempuh adalah sebagai berikut:

- i. PP dipersiapkan dengan metode kimiawi basah lalu dikeringkan dan digerus.
- ii. CuNP, PP, dan G ditimbang sesuai dengan parameter proses pada Tabel 3.3.
- iii. CuNP, PP, dan G dimasukkan ke dalam lumpang kemudian digerus.
- iv. Penggerusan dilakukan sampai ketiga zat homogen, yaitu sampai warna sampel rata.
- v. Untuk menghomogenkan sampel, mengingat PP yang dihasilkan cukup ulet, campuran sampel dari langkah sebelumnya dilarutkan dalam 20 ml Xylene dan dipanaskan.
- vi. Setelah itu sampel dikeringkan pada temperatur ruang.
- vii. Setelah kering sampel digerus kembali sampai homogen.

Hasil yang diperoleh berupa lima jenis serbuk nanokomposit 60CuNP/PP/G dengan kadar C: 5, 10, 15, 20, dan 25 wt%. Serbuk berwarna coklat kehitaman.

3.6.3. Pembuatan bakalan nanokomposit 70%CuNP/PP/G (IIIC)

Langkah-langkah yang ditempuh adalah sebagai berikut:

- i. PP dipersiapkan dengan metode kimiawi basah lalu dikeringkan.
- ii. CuNP, PP, dan G ditimbang sesuai dengan parameter proses pada Tabel 3.3.
- iii. CuNP, PP, dan G dimasukkan ke dalam lumpang kemudian digerus.

- iv. Penggerusan dilakukan sampai ketiga zat homogen, yaitu sampai warna sampel rata.

Hasil yang diperoleh berupa lima jenis serbuk nanokomposit 70CuNP/PP/G dengan kadar C: 5, 10, 15, 20, dan 25 wt%. Serbuk berwarna coklat kehitaman.

3.6.4. Pembuatan Sampel Uji Nanokomposit CuNP/PP/G

Serbuk-serbuk nanokomposit 50-70CuNP/PP/G dicetak dengan mesin *hot press* (Gambar 3.10.) menjadi kepingan bulat dengan geometri: tebal 2-5 mm dan diameter ± 2 cm. Langkah-langkah yang ditempuh adalah sebagai berikut:

- i. Semua sampel serbuk disiapkan.
- ii. Cetakan/*die* disiapkan.
- iii. Masing-masing serbuk dimasukkan ke dalam rongga cetakan secukupnya sampai memenuhi rongga cetakan.
- iv. Cetakan di tekan dengan mesin hot press.
- v. Sampel dikeluarkan kemudian didinginkan di temperatur ruang.
- vi. Hasil kompaksi dikeluarkan dari cetakan.

Hasil yang didapat berupa lima belas buah silinder berdiameter 2 cm. Silinder yang dihasilkan digunakan untuk uji konduktivitas dan uji kekerasan.



Gambar 3.10. Preparasi sampel menggunakan mesin *hot press*: (1) serbuk nanokomposit, (2) cetakan, (3) serbuk nanokomposit dimasukkan ke dalam cetakan, (4) cetakan berisi serbuk nanokomposit, (5) mesin penekan, dan (6) produk silinder dengan diameter dan tebal rata-rata 2 cm dan 2-5 mm.

3.7. Karakterisasi dan pengujian

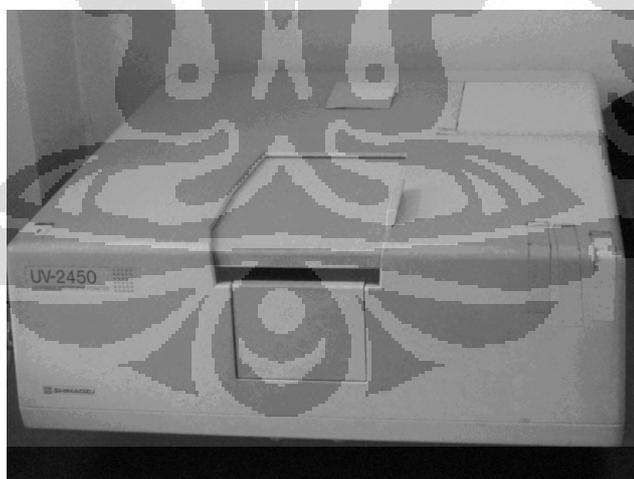
3.7.1. Pengujian UV-Spektroskopi

3.7.1.1. Tujuan

Pengujian spektroskopi UV-Vis dilakukan untuk mengetahui perilaku optis sampel, atas respon terhadap cahaya dengan intensitas tinggi. Dalam hal ini, perilaku optis berkaitan erat dengan sifat-sifat elektronik material yang selanjutnya dapat dijadikan sandaran untuk menganalisis kemampuan transfer elektron. Akhirnya, dengan kemampuan transfer elektron ini, maka dapat diperkirakan tingkat konduktivitas material. ^[15]

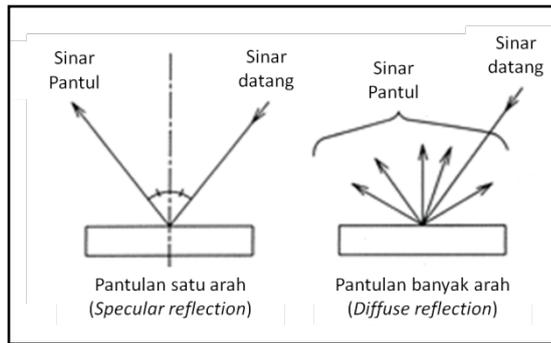
3.7.1.2. Mesin dan Metode Pengujian

Dalam pengujian ini digunakan alat yang sama dengan penelitian terdahulu ^[15], yakni menggunakan UV-Vis Spectrophotometer (Shimadzu-UV 2450, Gambar 3.11.) ^[56], Laboratorium Afiliasi – Departemen kimia FMIPA UI) dengan rentang panjang gelombang dari 200 – 800 nm.



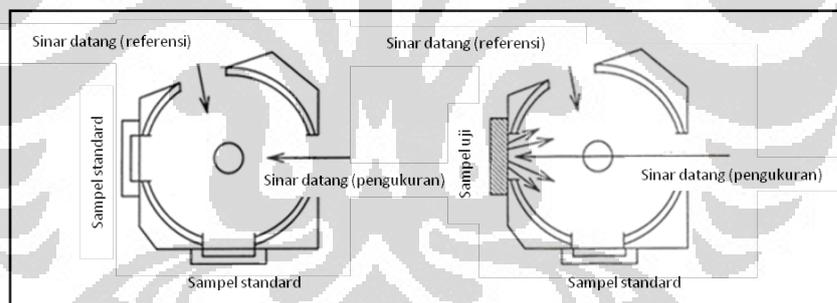
Gambar 3.11. Penampang mesin Shimadzu-UV 2450.

Uji spektroskopi ini memanfaatkan mekanisme sinar datang dan sinar pantul. Sinar yang ditembakkan ke atas sebuah sampel buram dapat dipantulkan ke satu arah (*specular reflection*) dan/atau ke banyak arah (*diffuse reflection*). Gambar 3.12 ^[56]. menunjukkan dua mekanisme pemantulan sinar pada permukaan buram.



Gambar 3.12. Dua jenis pemantulan sinar pada permukaan buram (tidak tembus cahaya): ke satu arah (*specular reflection*) dan ke banyak arah (*diffuse reflection*).

Mekanisme kerja UV-Vis Shimadzu 2450 adalah sebagai berikut: (i) sinar datang (*incident beam*) tegak lurus ke arah sampel, (ii) sinar datang dipantulkan ke arah yang berbeda-beda (*diffuse reflection*), (iii) dengan menggunakan bantuan bola berlapis sulfat (*sulfate-coated*), sinar-sinar pantul difokuskan ke detektor, (iv) sinar yang sampai ke detektor selanjutnya dibandingkan dengan sampel referensi menghasilkan data uji. Mekanisme kerja ini diilustrasikan pada Gambar 3.13. [56] berikut ini.



Gambar 3.13. Prinsip kerja UV-Vis Shimadzu 2450 dengan sudut datang 0° .

Sinar datang (*incident beam*) sebesar 0° menyebabkan sinar pantul yang sejajar sinar datang (*specular reflection*) akan membentur bola sulfat sehingga tidak terbaca oleh detektor. Dengan demikian, hanya sinar pantul terhamburkan saja yang direkam dan diperhitungkan oleh mesin, menghasilkan data berupa reflektansi. Satuan reflektansi adalah % terhadap reflektansi sampel referensi. Data reflektansi (terhadap panjang gelombang) selanjutnya diolah dengan menggunakan perangkat lunak PeakFit[®] dan metode Kubelka-Munk untuk memperoleh nilai energi celah pita (*band gap energy*) dari masing-masing sampel.

3.7.1.3. Penghalusan Data Uji UV-Vis dengan PeakFit®

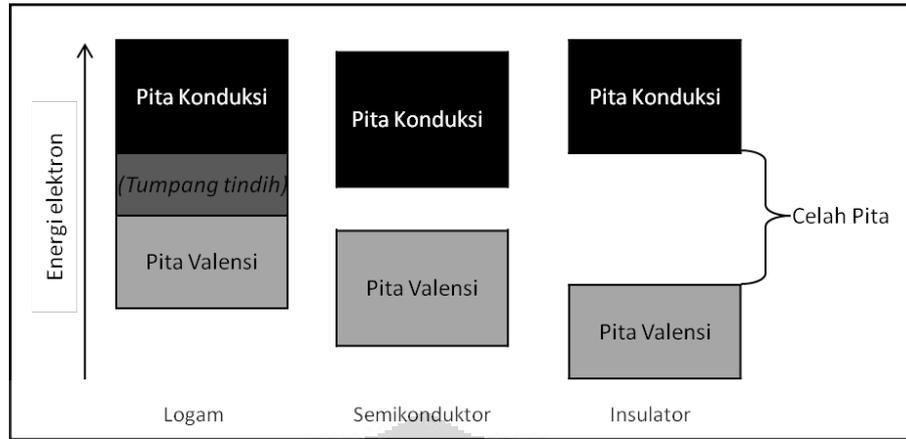
Perangkat lunak PeakFit® versi 4.12 keluaran SeaSolve Software, Inc., digunakan untuk menghaluskan (*smoothing*) data-data mentah yang diperoleh dari mesin UV-Vis. Terdapat empat metode penghalusan data: FFT Filtering, Loess, Gaussian Convolution, dan Savitzky-Golay. Dalam penelitian ini digunakan metode Loess karena paling cocok untuk data dengan nilai sumbu X yang tidak seragam (*non-uniform*).

Level penghalusan (% *smoothing*) 10%, sebagai contoh, mengandung arti jendela (*window*) hasil penghalusan mengandung 10% data. Untuk mendapatkan hasil yang baik juga digunakan mode “AI Expert”, yang berfungsi mencari level penghalusan optimum secara otomatis. Level optimum menunjukkan titik terbesar yang paling mungkin untuk mengurangi data-data pengganggu (*noise data*) tanpa harus mengorbankan hal-hal penting di dalam data secara keseluruhan.

3.7.1.4. Energi Celah Pita

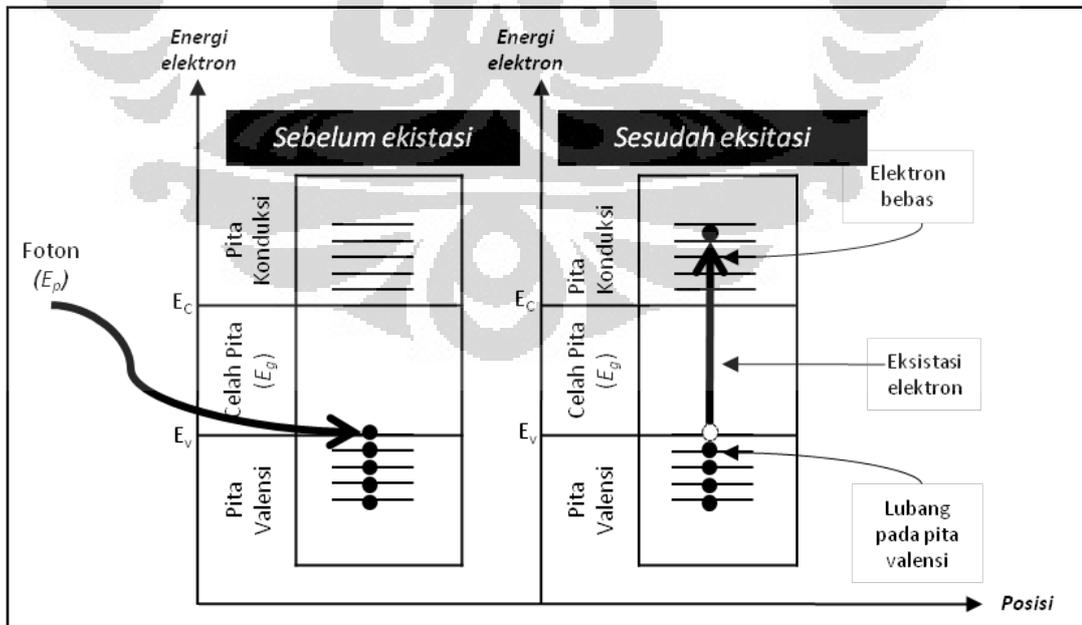
Dalam sebuah material, atom tidak lagi dipandang sebagai entitas tunggal melainkan sebagai kelompok atom-atom. Pada kondisi ini dan pada jarak tertentu, kulit dan subkulit sebuah atom dipengaruhi oleh atom-atom di sebelahnya hingga terjadi interaksi antar elektron-elektronnya. Interaksi mengakibatkan subkulit-subkulit yang berenergi sama bergabung membentuk ‘pita energi elektron’ (*electron energy band*).

Sebuah pita dapat terisi penuh atau sebagian atau tidak sama sekali oleh elektron. Elektron dari satu pita dapat berpindah ke pita yang lain guna menghasilkan listrik. Pada semikonduktor dan insulator, di antara pita yang kosong dan yang terisi penuh terdapat celah (*gap*) yang kosong dari elektron—karena tidak memiliki energi pada kisaran ini ^[35]. Elektron dapat melewati celah dengan menyerap energi tertentu. Ilustrasi celah pita ditunjukkan oleh Gambar 3.14. Untuk menghasilkan listrik pada semikonduktor (komposit) dan insulator, harus ada cukup elektron bebas yang dapat berpindah dari bagian valensi ke bagian konduktif (Gambar 3.15.).



Gambar 3.14. Ilustrasi celah pita pada berbagai material.

Perpindahan elektron memerlukan energi, baik melalui penyerapan panas atau foton (cahaya) ^[57] dengan besar minimal sama dengan ‘besar perbedaan energi’ ^[35] antara bagian valensi dan bagian konduktir. Energi ini disebut energi celah pita (*band gap energy*, E_g , satuan eV). Nilai E_g untuk semikonduktor umumnya <2 eV, sedangkan untuk insulator >2 eV ^[35]. Dengan demikian, sifat-sifat listrik semikonduktor dan insulator akan sangat tergantung pada energi celah pita yang dihasilkan oleh struktur pita elektron dan memiliki hubungan dengan sifat optik suatu material.



Gambar 3.15. Kondisi elektron pada semikonduktor dan insulator sebelum (kiri) dan sesudah (kanan) eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi.

3.7.1.5. Teori Kubelka-Munk

Cahaya yang ditembakkan ke material memiliki panjang gelombang beragam. Spektrum cahaya yang memiliki nilai panjang gelombang besar (energi foton rendah) tidak diserap oleh sampel, sebaliknya cahaya dengan panjang gelombang pendek akan diserap (*absorbed*).

Pada Gambar 13.15. ditunjukkan bahwa elektron pada posisi E_v berpindah dengan menyerap sejumlah energi foton yang besarnya sama dengan energi celah pita ($E_p = E_g$). Jumlah elektron yang pindah akan meningkat seiring meningkatnya E_p . Rentang energi foton yang masih dapat diserap oleh material untuk menggerakkan elektron-elektron disebut ujung penyerapan (*absorption edge*).

Secara matematis, ujung penyerapan merupakan fungsi dari koefisien absorpsi (*absorption coefficient*, α) kuadrat dan E_p . Jika dituangkan dalam bentuk grafik α^2 (sumbu y, tanpa satuan) vs. E_p , (sumbu x, eV), maka ujung penyerapan ditunjukkan oleh garis lurus^[58] pada grafik. Untuk α sendiri, oleh Green dan Allen^[58] dirumuskan sebagai:

$$\alpha = K_d (E_p - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

dengan K_d adalah konstanta proporsionalitas tanpa satuan. Dengan demikian, jika garis lurus (ujung penyerapan) ditarik memotong sumbu x maka akan diperoleh nilai α^2 sama dengan nol. Ini berarti nilai E_p akan sama dengan E_g . Dengan kata lain, jika nilai α^2 sudah didapatkan maka nilai E_g dengan sendirinya akan dapat dihitung.

Dalam pada itu, penelitian ini akan menentukan nilai-nilai α untuk setiap panjang gelombang dengan memanfaatkan teori Kubelka-Munk yang lazim digunakan sebagai model untuk menghitung reflektansi. Menurut teori ini, sinar-sinar datang yang ditembakkan pada sampel homogen sebagian akan dipantulkan dan sebagian yang lain akan diserap sehingga cahaya akan melemah pada kedua arah tersebut^[58]. Teori Kubelka-Munk bekerja dengan sangat baik untuk material-material yang memantulkan >50% dan meneruskan (*transmission*) <20% sinar datang^[59]. Teori ini banyak digunakan untuk menghubungkan total pantulan banyak arah

(diffuse reflection) dengan penghamburan (scattering) dan penyerapan (absorption) cahaya pada suatu material [60]. Berikut langkah-langkah menghitung energi celah pita melalui pendekatan teori Kubelka-Munk.

Pertama-tama, nilai Kubelka-Munk (KM) dirumuskan sebagai berikut:

$$KM = \frac{(1 - R)^2}{2R} \quad (10)$$

dengan R adalah reflektansi (dalam persen).

Selanjutnya, besar energi foton yang diserap sampel (E_p) diturunkan dari rumus:

$$E_p = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (11)$$

dengan f adalah frekuensi, h adalah konstanta Planck ($4,13566733 \times 10^{-15}$ eV s), c adalah simbol kecepatan cahaya (299792458 m/s), dan λ adalah panjang gelombang (nm). Dengan memasukkan nilai-nilai tersebut ke dalam persamaan diperoleh (10) diperoleh:

$$E_p \approx \frac{1240 \text{ eV nm}}{\lambda(\text{nm})} \quad (12)$$

Setelah semua data λ dan R dimasukkan ke dalam persamaan (10) dan (12) maka akan diperoleh nilai KM dan E_p yang cukup untuk membuat sebuah grafik KM^2 (y) vs. E_p (x).

Sampai di sini, KM yang tidak memiliki satuan sudah dapat disetarakan dengan α , sehingga diperoleh hubungan antara KM dengan persamaan (8):

$$KM \approx K_d (E_p - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$\frac{KM^2}{K_d^2} = E_p - E_g \quad (14)$$

Jika KM ditetapkan sebesar nol, agar diperoleh garis potong dengan sumbu-x, persamaan (14) dapat diubah ke dalam persamaan berikut:

$$KM^2 \approx E_p - E_g \quad (15)$$

Akhirnya, dari persamaan (15) akan didapatkan nilai E_g yang besarnya sama dengan E_p pada KM^2 sama dengan nol.

3.7.2. Pengujian difraksi sinar-X

3.7.2.1. Tujuan

Pengujian difraksi sinar-X terhadap sampel serbuk dilakukan untuk mengidentifikasi fasa-fasa yang ada pada sampel, baik sampel tunggal ataupun sampel campuran (nanokomposit). Pada sampel tunggal, identifikasi fasa digunakan untuk konfirmasi data bawaan material (versi pensuplai) dengan kondisi sebenarnya. Untuk sampel nanokomposit polimer, identifikasi fasa lebih lanjut dapat digunakan untuk menentukan tingkat dispersi partikel-partikel di dalam resin dan tingkat kristalinitas sampel. Dispersi partikel yang baik menjamin adanya sifat mekanik dan kelistrikan yang baik. Sedangkan nilai kristalinitas menjadi acuan dalam sifat mekanis material, yaitu semakin tinggi kristalinitas sampel berarti sampel semakin rapuh.

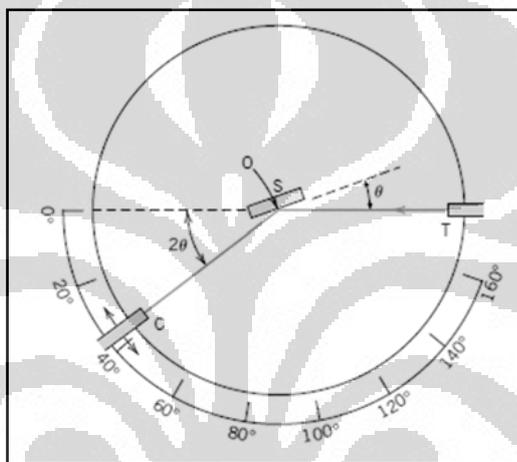
3.7.2.2. Mesin dan Metode Pengujian

Pengujian difraksi sinar-X (*x-ray diffraction*, XRD) dilakukan dengan menggunakan mesin uji sinar-X yang dimiliki Badan Tenaga Nuklir Nasional, PUSPIPTEK, Serpong-Banten. Secara umum, prinsip kerja suatu mesin uji difraksi sinar-X adalah merekam difraksi sinar-X yang diakibatkan oleh penembakan sinar dengan sudut datang tertentu ke arah permukaan sampel. Hasil rekam dituangkan dalam bentuk kurva intensitas cahaya (tanpa satuan, sumbu y)) versus 2θ (derajat, sumbu x). Ilustrasi kerja ditunjukkan oleh Gambar 3.15.

Puncak pada kurva muncul ketika aturan Bragg terpenuhi oleh bidang kristalografi tertentu^[61]. Daerah-daerah di bawah puncak menunjukkan jumlah fasa yang ada pada sampel^[62]. Penting untuk dicatat, bahwa ketika sinar-X menghampiri fasa kristalin maka sinar pasti mengalami difraksi. Setiap fasa kristalin memiliki pola tertentu; dan setiap fasa yang sama selalu menunjukkan pola yang sama. Dalam sebuah campuran setiap fasa menghasilkan pola difraksinya masing-masing tanpa dipengaruhi oleh fasa lainnya.

Sampel uji XRD adalah serbuk dan setiap serbuk dihitung sebagai satu kristal; dengan begini orientasi partikel-partikel menjadi tidak seragam/acak guna

menjamin semua tipe bidang kristalografi yang mungkin dihasilkan dapat diradiasi^[61]. Jenis sampel XRD bisa berupa sampel kristalin tunggal, polikristalin (serbuk)^[62], ataupun amorf^[63]. Kriteria sampel XRD meliputi: (i) mempunyai susunan atom yang teratur dan berulang, (ii) jarak antar atom-atom kira-kira sama dengan panjang radiasi sinar-X yang ditembakkan ke sampel, (iii) satu unit kristal adalah sebuah kristal sempurna dengan ukuran sekitar 3mm (kristalin tunggal) atau 0,002-0,005 mm (polikristalin), (iv) sampel homogen, dan (v) permukaan lembut^{[62] [63]}.



Gambar 3.16. Skema prinsip kerja mesin difraksi sinar-X; T = sumber sinar-X, S = sampel, C = detektor, dan O = sumbu acuan untuk rotasi sampel dan detektor; $2\theta = 10-80^\circ$. Ketika S dan C berputar pada sumbu O mesin merekam intensitas sinar-sinar difraksi sebagai fungsi 2θ .

Sumber: Callister, Student learning resources, h.W-4^[61].

Aplikasi XRD meliputi: (i) menentukan struktur kristal, (ii) menentukan orientasi kristalografi pada kristal tunggal, (iii) identifikasi kimia kualitatif dan kuantitatif, (iv) prediksi tegangan sisa, (v) ukuran kristal, (vi) menakar dispartikel (sempurna jika tidak ada puncak khusus), (vii) menghitung jarak antarlapisan (*interlayer distance*)^[8, 61, 64-66].

3.7.2.3. Pencarian Puncak dengan Match!

Match! versi 1.10 keluaran Crystal Impact-Jerman adalah perangkat lunak yang digunakan untuk mengidentifikasi fasa dari data pengujian sinar-X dengan sampel serbuk. Langkah-langkah identifikasi fasa dengan Match! sebagai berikut:

1. Data hasil pengujian difraksi sinar-X terhadap sampel serbuk berupa kurva intensitas vs. 2θ disebut data mentah.
2. Data mentah diimpor ke dalam perangkat lunak Match!.
3. Karena data difraksi secara umum masih mentah, Match! akan melakukan “*raw data processing*” yang meliputi:
 - memotong *alpha-2-radiation* (jika ada),
 - menghaluskan data (*smoothing*),
 - *background subtraction*,
 - pencarian puncak (*peak*),
 - pencocokan bentuk kurva (*profile fitting*),
 - koreksi eror.

Tujuan dari langkah ini adalah untuk mendapatkan sejumlah puncak (nilai 2θ dan intensitas) dengan kemungkinan presisi tertinggi. Proses ini dilakukan seakurat mungkin agar mendapatkan hasil yang baik.

4. Jika ada informasi tambahan (seperti densitas, warna, dll.) akan digunakan untuk sebagai kontrol dalam perhitungan.
5. Setelah terdapat daftar puncak-puncak telah didapat, proses *search-match* utama dapat dilakukan: Match! Akan membandingkan setiap pola difraksi pada database (referensi) dengan pola pada difraksi pada sampel. Match! menggunakan suatu nilai yang disebut “*figure-of-merit*” (FoM) untuk menunjukkan kecocokan antara data referensi dengan data hasil pengujian.
6. Setelah selesai, kandidat-kandidat yang mungkin diurutkan berdasarkan nilai FoMnya. Entri dengan nilai FoM tertinggi adalah entri yang paling mungkin ada di dalam sampel.
7. Pengguna akan menganalisa entri-entri kandidat pada bagian atas daftar entri dan memilih entri-entri yang dianggap paling cocok dengan kondisi sampel.

8. Terakhir, dilakukan perbaikan Rietveld ^[67] terhadap fasa-fasa yang sudah dipilih. Perbaikan (*refinement*) data yang baik menunjukkan bahwa fasa yang diidentifikasi sudah betul dan lengkap.

3.7.3. Pengujian Konduktivitas Listrik

3.7.3.1. Tujuan

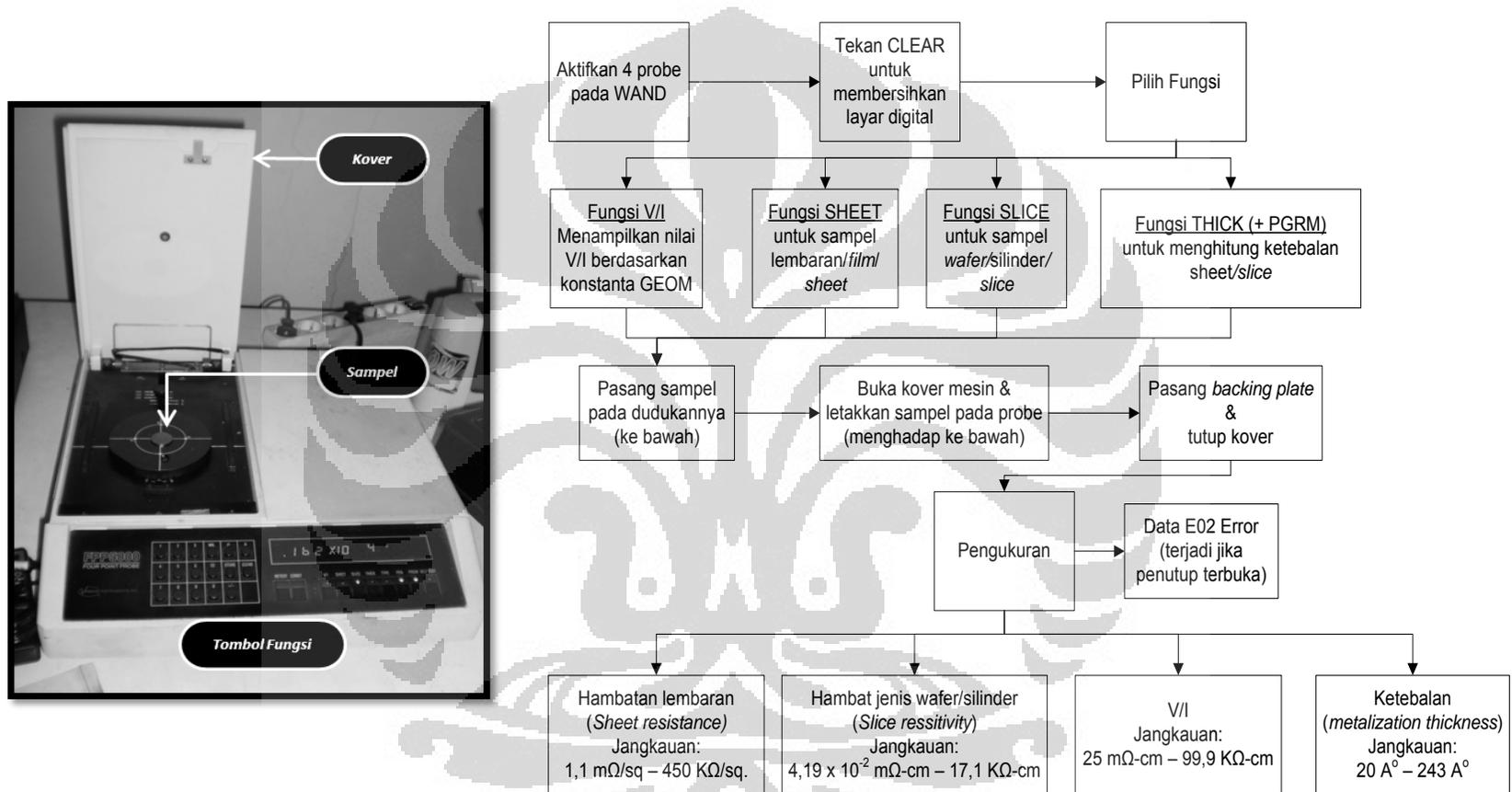
Pengujian konduktivitas listrik dilakukan untuk mencari pengaruh penambahan pengisi nano tembaga dan grafit di dalam resin polipropilena terhadap nilai konduktivitas listrik nanokomposit.

3.7.3.2. Mesin dan Metode Pengujian

Pengukuran konduktivitas listrik dengan memanfaatkan mesin Veeco FPP 5000. Laboratorium Departemen Fisika, PUSPIPTEK, Serpong-Banten. Metode pengujian yang digunakan adalah *in-line four point probe* dengan standard pengujian ASTM 1529-97. Penampang mesin uji dan langkah-langkah pengujian dengan mesin Veeco FPP 5000 ditunjukkan oleh Gambar 3.17. Dalam penelitian ini diambil nilai hambatan jenis silinder ($\Omega\text{-cm}$, $\text{kg}\cdot\text{m}^3\text{s}^{-3}\text{A}^{-2}$). Nilai ini kemudian diubah menjadi nilai konduktivitas listrik (S/cm , $\text{A}^2\text{s}^3\text{m}^{-3}\text{kg}^{-1}$) berdasarkan Tabel 3.4. berikut ini.

Tabel 3.4. Konversi nilai hambatan jenis ke konduktivitas listrik ^[68].

Hambat Jenis	Konduktivitas Listrik
$1 \Omega\cdot\text{m} = 10^{-3} \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$	$1 \text{ S/m} = 1000 \text{ mS/m}$
$1 \Omega\cdot\text{m} = 100 \Omega\cdot\text{cm}$	$1 \text{ S/m} = 10^{-2} \text{ S/cm}$
$1 \Omega\cdot\text{m} = 39,97 \Omega\cdot\text{in}$	$1 \text{ S/m} = 2,54 \times 10^{-2}$
$1 \Omega\cdot\text{m} = 3,2808 \Omega\cdot\text{ft}$	$1 \text{ S/m} = 0,3048 \text{ S/ft}$
$1 \Omega\cdot\text{m} = 10^6 \Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$	$1 \text{ S/m} = 10^{-6} \text{ S m/mm}^2$



Gambar 3.17. Kiri: Penampang mesin uji konduktivitas listrik Veeco FPP 5000 metode *in-line four point probe*. Kanan: Langkah pengukuran hambatan jenis (*resistivity*) dengan mesin Veeco FPP 500.

3.7.4. Pengujian kekerasan untuk mendapatkan nilai kekuatan tarik

3.7.4.1. Tujuan

Pengujian kekerasan (*hardness*) digunakan untuk mempelajari pengaruh penambahan pengisi CuNP dan G terhadap sifat mekanis nanokomposit CuNP/PP/G. Nilai kekerasan yang diperoleh akan dikonversi menjadi nilai kuat tarik (*tensile strength*) yang batal dilakukan karena keterbatasan jumlah sampel. Diharapkan penambahan pengisi akan menghasilkan nilai kekuatan tarik yang sesuai dengan target.

3.7.4.2. Mesin dan Metode Pengujian

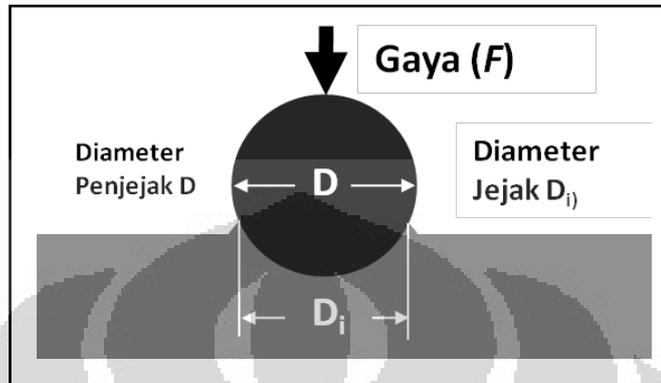
Mesin uji kekerasan yang digunakan dalam penelitian ini adalah mesin uji kekerasan Brinell (*Brinell hardness tester*), Departemen Metalurgi dan Material FTUI, Depok. Standard pengujian yang digunakan adalah ASTM E10. Mesin ini dipilih karena pertimbangan material nanokomposit CuNP/PP/G mengandung mayoritas unsur logam (50-70% CuNP). Di samping itu, penggunaan mesin ini akan memudahkan perhitungan konversi nilai kekerasan menjadi nilai kekuatan tarik.

Kekerasan (*hardness*) didefinisikan sebagai ketahanan material terhadap deformasi akibat abrasi atau gaya pada permukaan; sedangkan kekuatan tarik (*tensile strength*) didefinisikan sebagai nilai tegangan maksimum yang dapat diterima material sebelum patah^[35]. Prinsip uji kekerasan Brinell adalah dengan menjejakkan sebuah bola penjejak pada permukaan material logam. Nilai kekuatan tarik dapat didekati dengan nilai kekerasan.

Gaya dan diameter jejak akan menentukan nilai kekerasan yang dirumuskan sebagai berikut:

$$BHN = \frac{F}{\frac{\pi}{2} D (D - \sqrt{D^2 - D_i^2})} \quad (16)$$

dengan F adalah gaya (kgf), D_i adalah diameter jejak, D adalah diameter bola penjejak (mm), dan BHN adalah nilai kekeran Brinell (HB). Gambar 3.18. melukiskan ilustrasi penjejakan Brinell pada sebuah material.



Gambar 3.18. Ilustrasi penjejakan dengan metode Brinell.

Hasil pengukuran Brinell umumnya ditampilkan dalam pola XXHBYY/ZZZ/SS. Sebagai contoh, 75HB10/500/30 mengandung informasi: nilai kekerasan material sebesar 75 HB, diameter penjejak 10 mm, berat beban 500 kg, dan waktu penjejakan selama 30 detik^[69]. Selanjutnya, hubungan kekerasan Brinell dengan kekuatan tarik (TS) ditunjukkan oleh persamaan berikut^[35]:

$$TS(\text{MPa}) = 3,45 \times \text{HB} \quad (17)$$

$$TS(\text{Psi}) = 500 \times \text{HB} \quad (18)$$

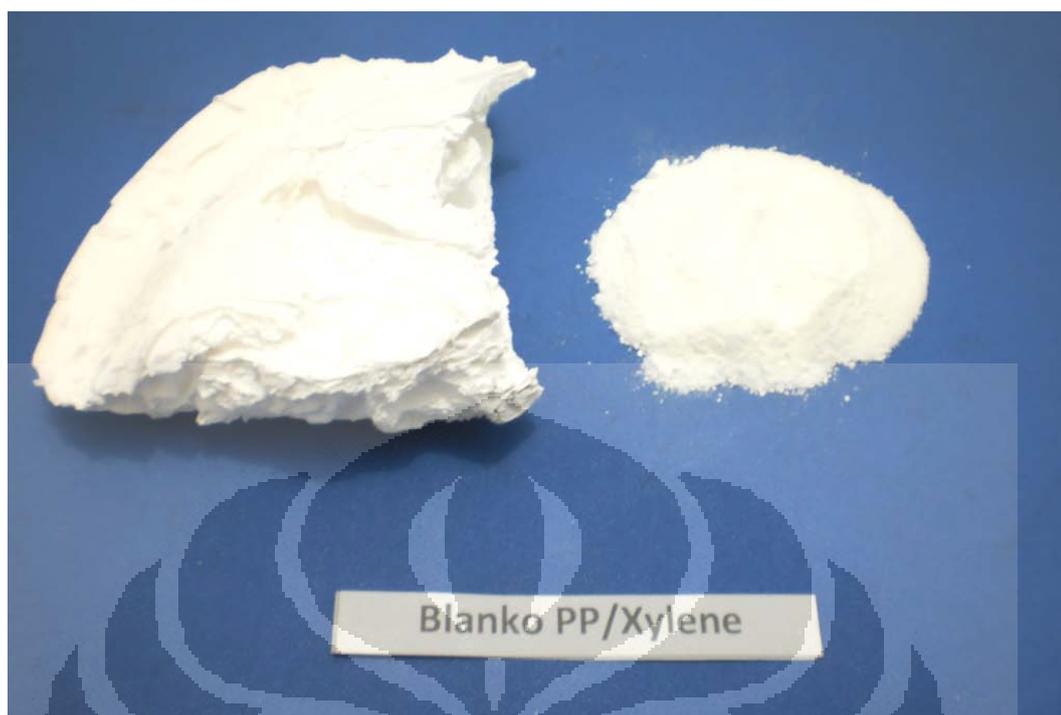
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Fabrikasi Nanokomposit

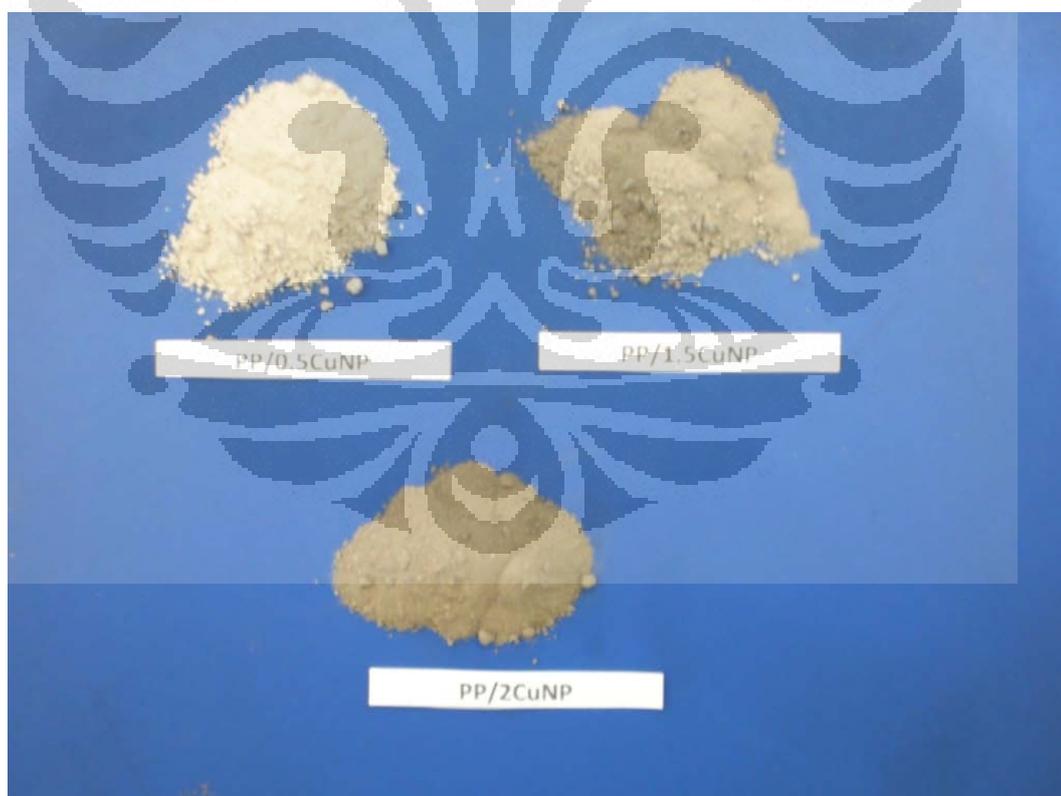
Pada penelitian ini berhasil diperoleh 24 buah sampel nanokomposit berbasis PP, CuNP, dan G yang dikelompokkan menjadi: PP/CuNP (empat buah), CuNP/PP (lima buah), dan CuNP/PP/G (15 buah). Di samping itu, juga berhasil diperoleh blanko PP/Xylene yang berasal dari pelarutan pelet polipropilena di dalam pelarut organik Xylene. Blanko PP/Xylene serta sampel-sampel PP/CuNP dan PP/CuNP diperoleh dengan teknik pencampuran kimiawi basah. Sedangkan sampel-sampel CuNP/PP/G diperoleh melalui teknik penggilingan fasa padat.

Blanko PP/Xylene tampak berwarna putih cemerlang, rapuh, serta memiliki bau khas Xylene, dan ulet ketika digerus (Gambar 4.1.). Sampel-sampel PP/CuNP berwarna putih buram, rapuh, ulet ketika digerus, dan berbau khas Xylene. Semakin tinggi kadar CuNP warna-warna sampel PP/CuNP semakin coklat (Gambar 4.2.). Sampel-sampel CuNP/PP berwarna coklat kehitaman, rapuh, ulet ketika digerus dan berbau CuNP (Gambar 4.3.). Sampel-sampel CuNP/PP/G berbentuk serbuk kehitaman dan memiliki bau CuNP (Gambar 4.4. – 4.6.).

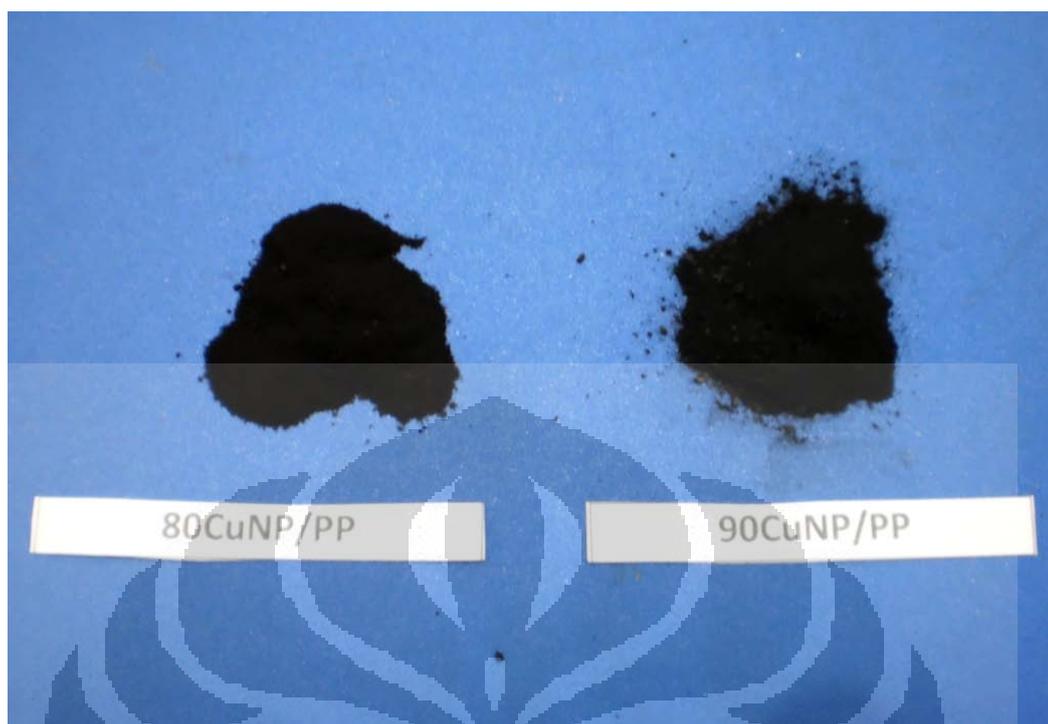
Secara makroskopis, wujud sampel menunjukkan bawah baik pencampuran atau penggilingan menghasilkan dispersi partikel pengisi (CuNP dan G) yang baik di dalam resin PP. Warna coklat pada PP/CuNP dan CuNP/PP menunjukkan CuNP (coklat tua) tercampur dengan baik dalam resin PP. Pada CuNP/PP/G warna coklat kehitaman berasal dari CuNP dan grafit (hitam) yang terdispersi di dalam resin PP. Pengamatan makroskopis ini akan dikonfirmasi dengan pengujian yang meliputi uji UV-spektroskopi, uji difraksi sinar-X, uji konduktivitas listrik, dan uji kekerasan. Hasil pengujian berupa sifat-sifat nanokomposit PP/CuNP, CuNP/PP, dan CuNP/PP/G yang meningkat merupakan bukti penguat bahwa partikel-partikel pengisi telah terdispersi dengan baik di dalam resin.



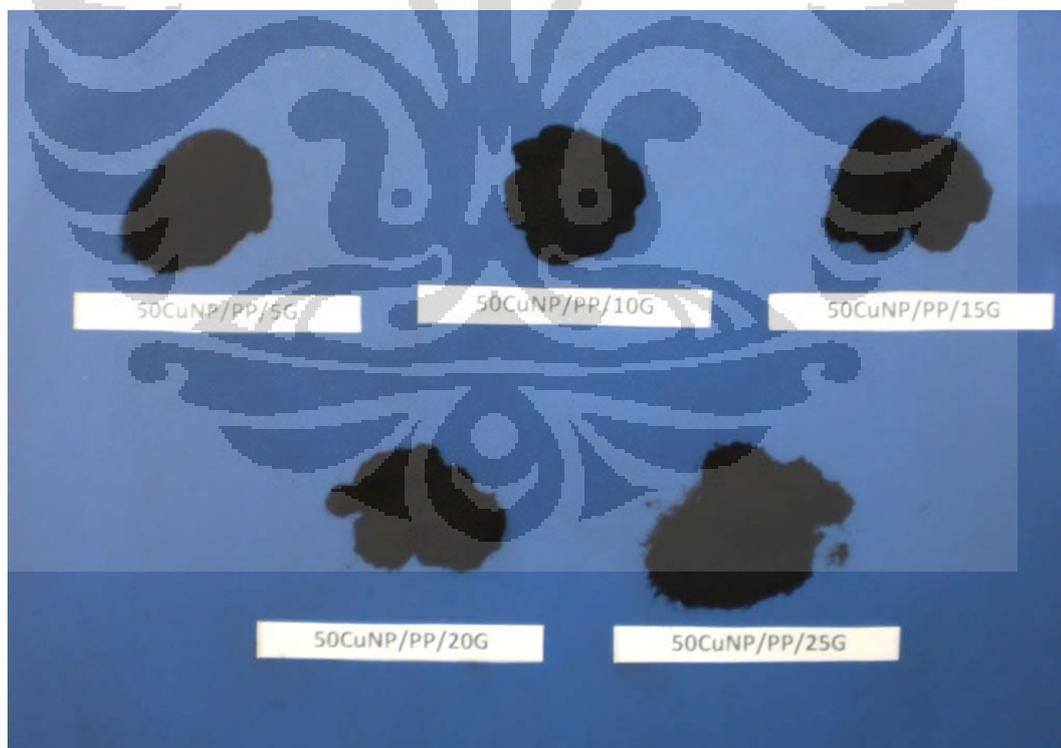
Gambar 4.1. Blanko PP/Xylene.



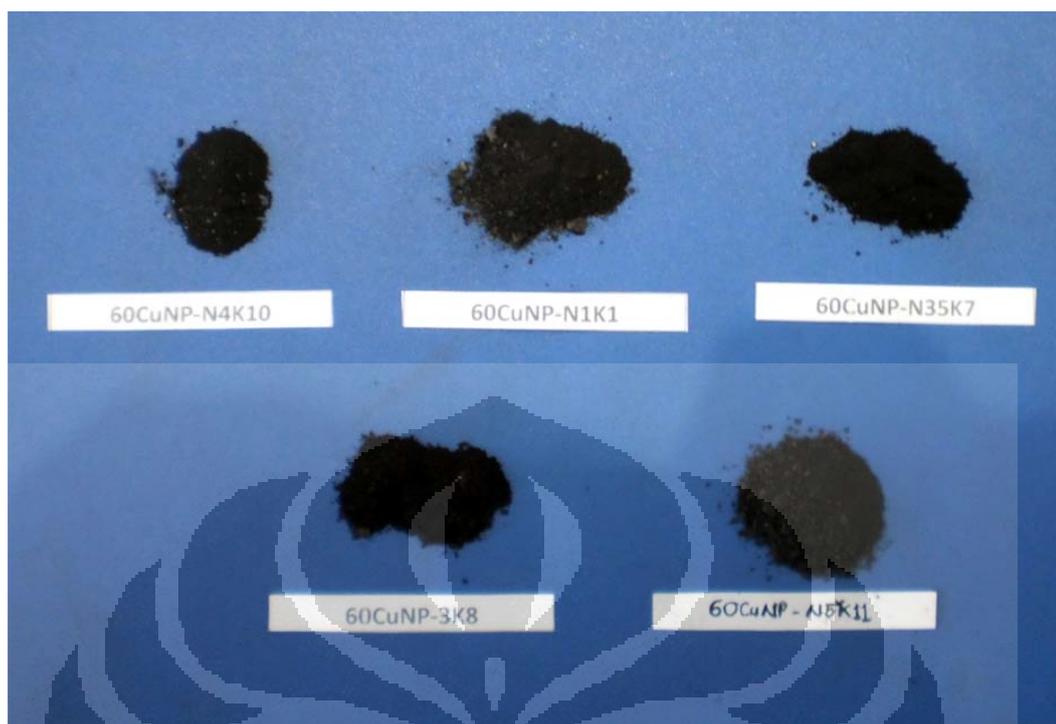
Gambar 4.2. Serbuk nanokomposit PP/CuNP.



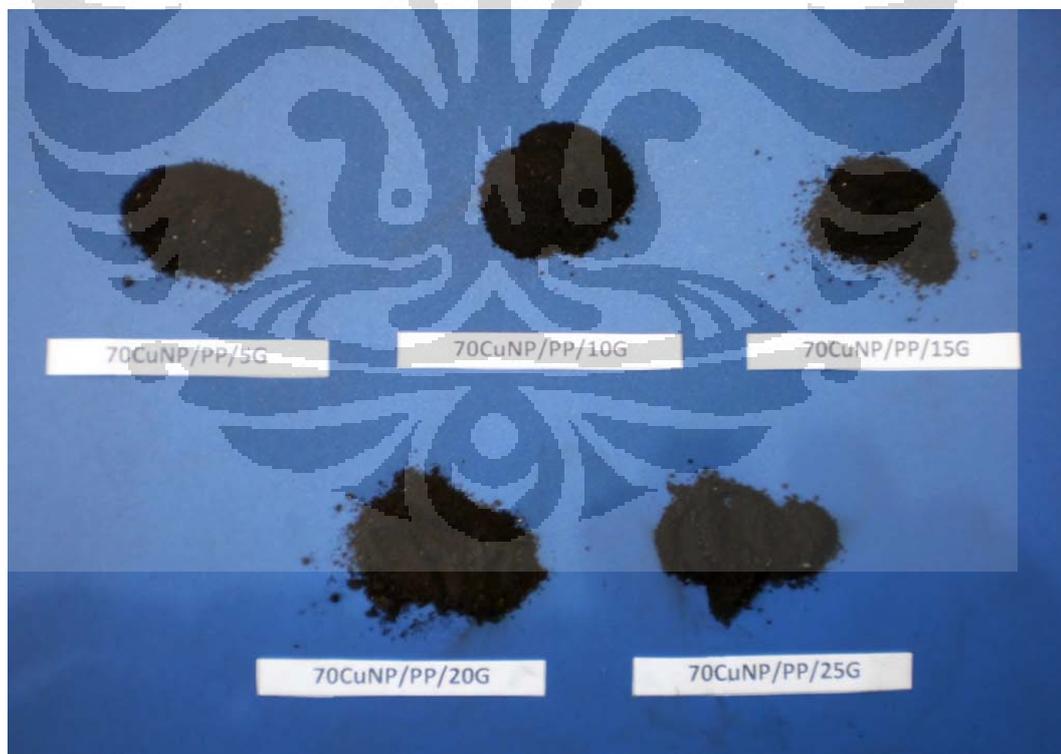
Gambar 4.3. Serbuk nanokomposit CuNP/PP.



Gambar 4.4. Serbuk nanokomposit 50CuNP/PP/G.



Gambar 4.5. Serbuk nanokomposit 60CuNP/PP/G.



Gambar 4.6. Serbuk nanokomposit 70CuNP/PP/G.

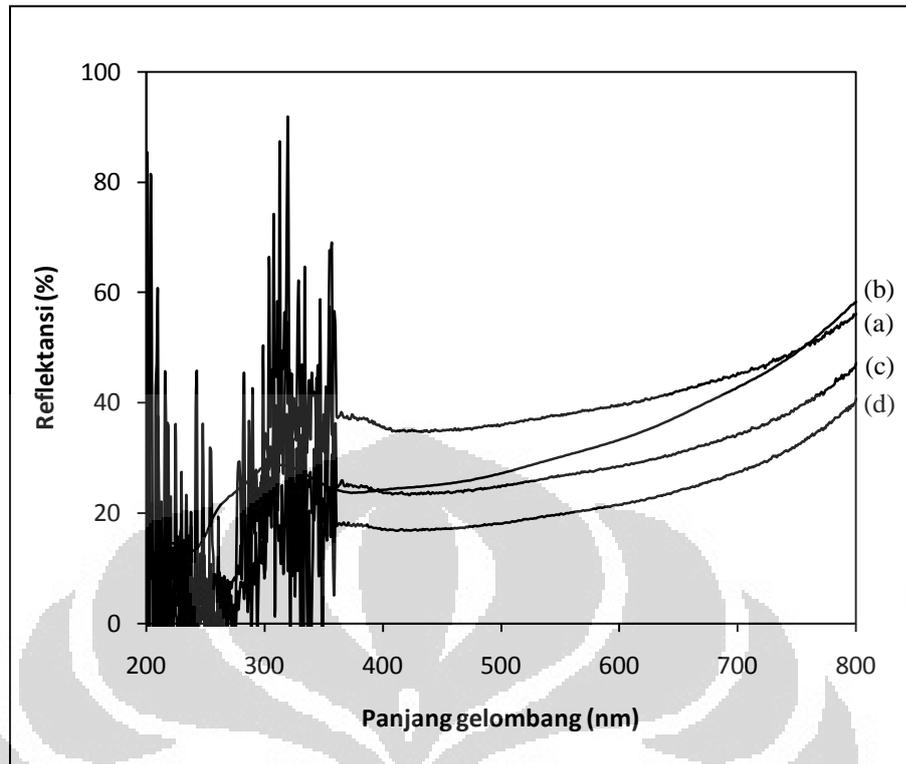
4.2. Nanokomposit PP/CuNP

4.2.1. Analisis UV-Vis

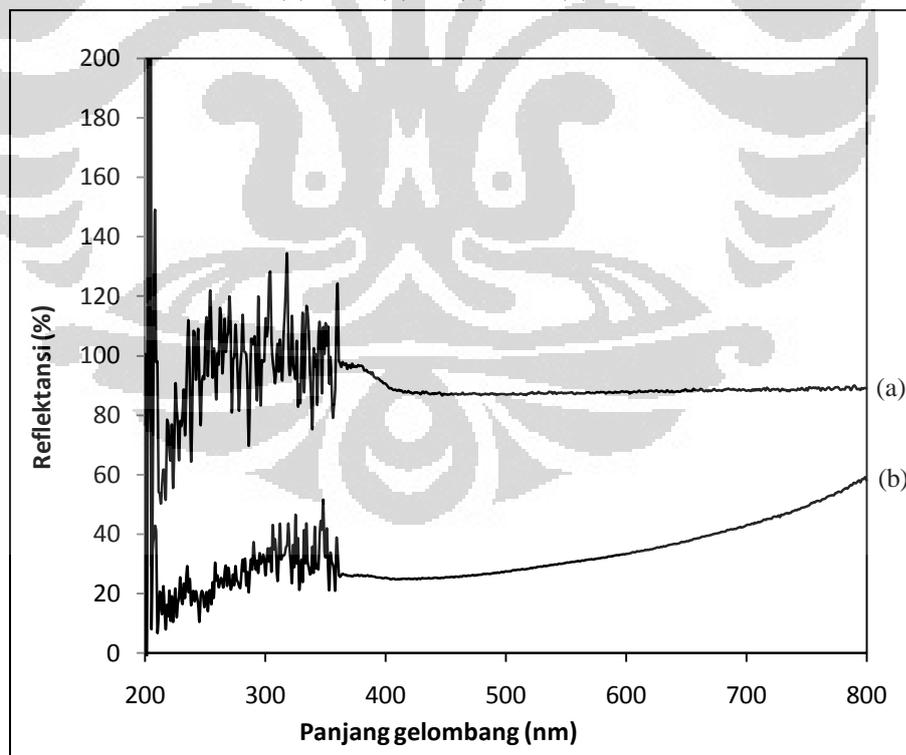
Sifat optis nanokomposit PP/CuNP dipelajari melalui UV-Vis spektrofotometer. Gambar 4.7. menunjukkan hasil pengujian UV-Vis untuk sampel-sampel CuNP berupa reflektansi (%) dan panjang gelombang. Sementara Gambar 4.8. adalah hasil pengujian UV-Vis untuk sampel-sampel PP dan CuNP. Jika Gambar 4.7. dibandingkan dengan Gambar 4.8., didapati bahwa kurva-kurva reflektansi sampel PP/CuNP relatif lebih rendah daripada kurva reflektansi CuNP, namun masih lebih tinggi daripada kurva reflektansi PP.

Secara teoritis, sampel-sampel CuNP tergolong *opaque* (buram) karena memiliki warna tertentu. Pada sampel jenis ini, cahaya yang ditembakkan ke permukaan dapat dipantulkan dan/atau diserap tetapi tidak dapat diteruskan. Pada Gambar 4.2. sebelumnya, tampak bahwa warna sampel PP/CuNP semakin gelap seiring meningkatnya konsentrasi CuNP di dalam resin PP. Semakin gelapnya warna sampel akan menyebabkan tingkat penyerapan cahaya (*absorbance*, I_A) sampel meningkat. Sebagai konsekuensinya, tingkat pemantulan (*reflectance*, I_R) turun agar jumlah intensitas tetap sama dengan jumlah intensitas awal ($I_0 = I_A + I_R$)^[35]. Hal ini menjelaskan mengapa pada Gambar 4.7. posisi grafik-grafik semakin rendah, yang berarti reflektansi sampel menurun, seiring dengan meningkatnya konsentrasi CuNP.

Posisi grafik-grafik yang seperti ini dapat pula dikonfirmasi dengan penelitian-penelitian sebelumnya. Yuwono dkk.^[15] menyatakan bahwa ukuran CuNP telah mempengaruhi sifat elektronik sampel—disebut efek kuantum—yang ditunjukkan dengan bergesernya ujung pemantulan (*reflectance edge shift*). Di kesempatan lain, Singh dkk.^[70] mengidentifikasi bahwa konsentrasi ion-ion Cu di dalam PP akan mengakibatkan tingkat penyerapan cahaya tampak oleh sampel (PP yang diradiasi dengan ion Cu) semakin tinggi. Lebih jauh, menurut Singh dkk. kehadiran ion Cu mengakibatkan terjadinya pembentukan gugus baru pada PP yang berujung pada pergeseran ujung penyerapan optik (*optical absorption edge*).



Gambar 4.7. Reflektansi spektrum sampel PP/CuNP dengan variasi wt% CuNP: (a) 0,5; (b) 1; (c) 1,5; (d) 2.

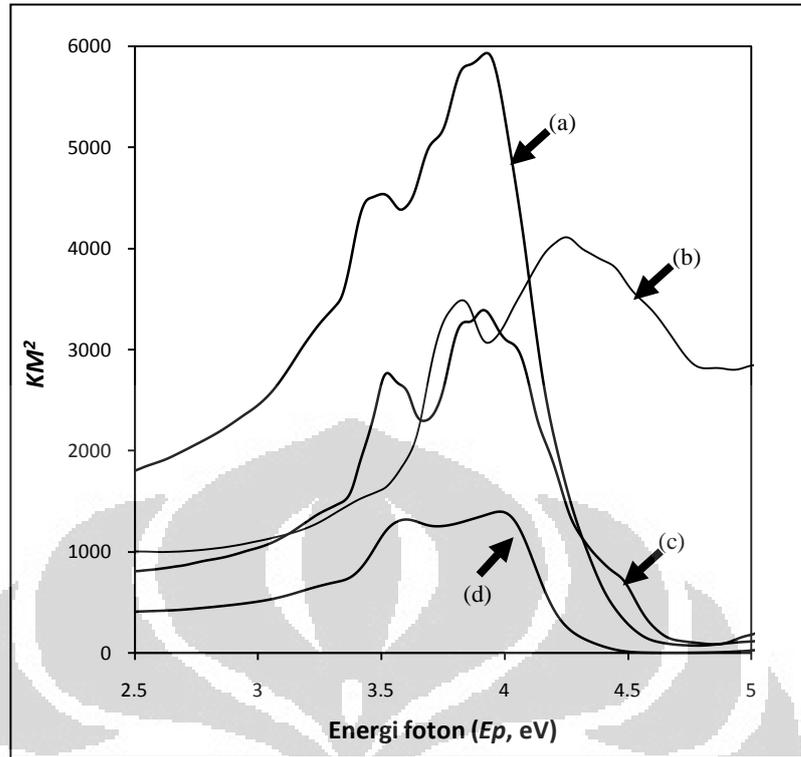


Gambar 4.8. Reflektansi spektrum sampel: (a) 100 wt% CuNP dan (b) 100 wt% PP.

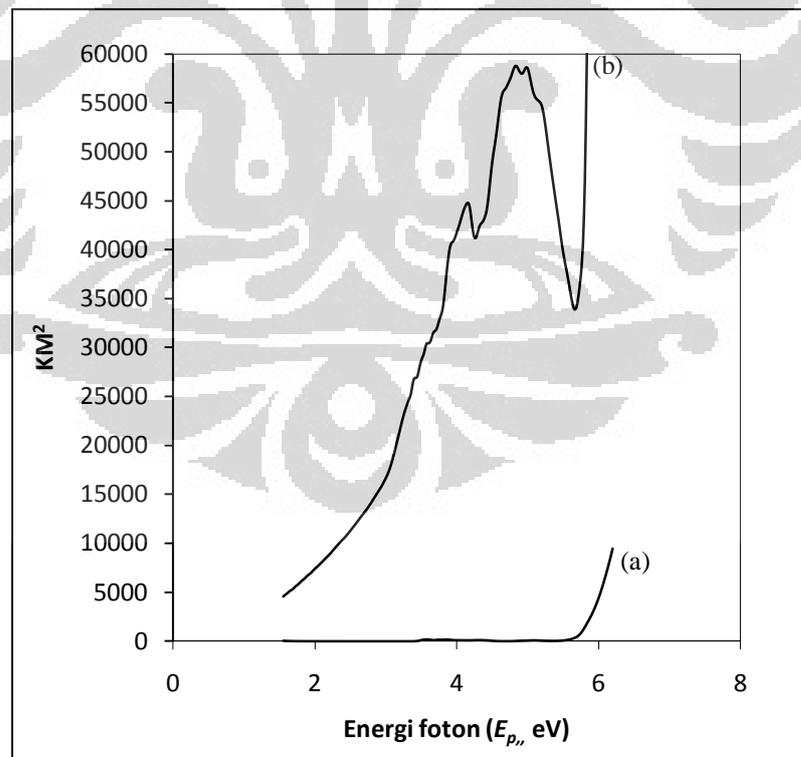
Dari Gambar 4.7. dan 4.8., terlihat pula bahwa reflektansi PP/CuNP secara umum berada pada kisaran nilai reflektansi dari CuNP yang bersifat opak dan PP yang dasarnya tidak berwarna. Partikel-partikel CuNP, sebagaimana logam-logam lain, sejatinya akan menyerap cahaya dalam jumlah besar namun kemudian diemisikan kembali (*reemitted*) pada panjang gelombang yang sama dalam bentuk reflektansi; oleh karena itu kurva reflektansi CuNP terlihat lebih tinggi daripada baik PP maupun PP/CuNP. Pada PP yang insulator, kurva reflektansi lebih rendah berkaitan dengan tingginya jumlah energi yang diserap untuk perpindahan elektron (bagian 3.7.1.4.). Hal ini menyebabkan kurva reflektansi PP paling kecil dibanding PP/CuNP dan CuNP. Dengan demikian, hasil yang ditampilkan oleh Gambar 4.7. mengindikasikan bahwa partikel-partikel CuNP berada dalam kondisi dispersi yang relatif cukup baik di dalam resin PP; ditunjukkan dengan sifat optis nanokomposit PP/CuNP yang merupakan kompromi dari sifat-sifat makro konstituen penyusunnya.

Baik pada Gambar 4.7. maupun Gambar 4.8., terlihat bahwa data-data pengujian dimulai dengan pola yang tidak teratur. Pada gambar-gambar terlihat bahwa nilai reflektansi untuk daerah 200-360 nm terdeteksi berada di luar jangkauan (*bandwidth*) panjang gelombangnya. Data ini dipastikan sebagai data salah (*stray light*). Mengacu pada persamaan penyerapan energi (persamaan (11)), semakin kecil panjang gelombang maka energi foton yang diserap akan semakin besar; dalam grafik ini ditunjukkan dengan nilai reflektansi yang rendah. Dengan demikian, seharusnya semakin kecil panjang gelombang nilai reflektansi akan semakin kecil pula^[71] tidak sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 4.7. dan 4.8. Data salah ini kemungkinan disebabkan oleh orde difraksi yang terlalu tinggi, penghamburan (*scattering*), dan/atau desain mesin yang tidak sesuai^[72].

Dalam pada itu, untuk menghitung nilai energi celah pita, pertama-tama grafik-grafik pada Gambar 4.7. dan 4.8. akan dihaluskan (*smoothing*) menggunakan perangkat lunak PeakFit[®] (bagian 3.7.1.3.). Data-data yang sudah dihaluskan kemudian diolah dengan metode Kubelka-Munk (bagian 3.7.1.5.) menghasilkan grafik KM^2 vs. energi foton (energi yang diserap, E_p) seperti terlihat pada Gambar 4.9. dan 4.10. berikut ini.



Gambar 4.9. Kurva Kubelka-Munk sampel PP/CuNP dengan variasi wt% CuNP: (a) 0,5; (b) 1; (c) 1,5; dan (d) 2.

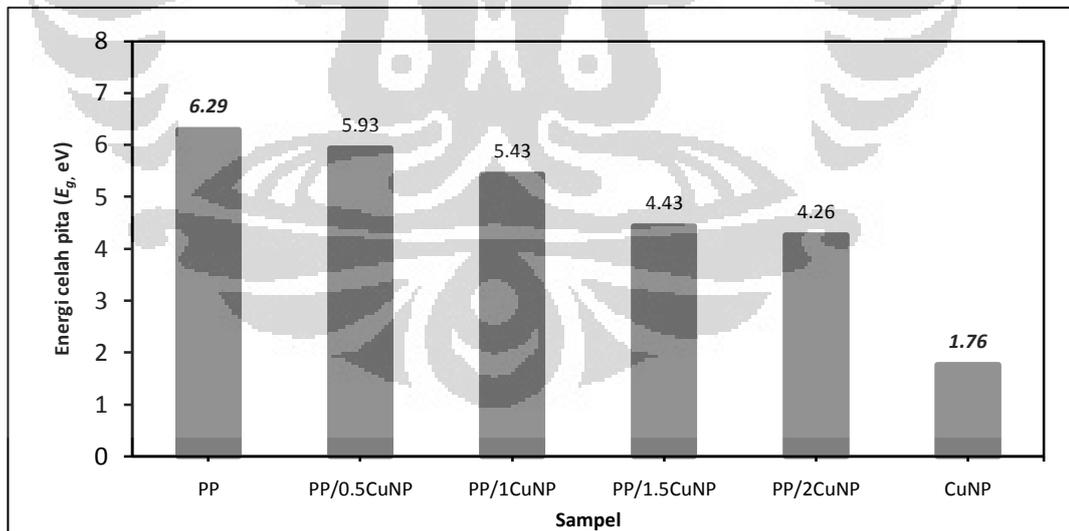


Gambar 4.10. Kurva Kubelka-Munk sampel: (a) 100 wt% CuNP; dan (b) 100 wt% PP.

Dari masing-masing kurva Kubelka-Munk akan dicari daerah penurunan pada kurva yang merupakan daerah terjadinya celah pita (*band gap*). Daerah ini ditunjukkan dengan garis kurva yang menurun. Sebagai contoh, pada CuNP daerah ini ditemukan pada kisaran E_p antara 1,6 – 1,7 eV. Berikutnya, pola kecenderungan garis-garis ditetapkan guna mendapatkan persamaan Kubelka-Munk yang dapat digunakan untuk menghitung E_g (energi celah pita) pada KM^2 sama dengan nol. Hasil pencarian kecenderungan garis-garis (*trendline*) ditampilkan pada Lampiran D. Tabel 4.1. dan Gambar 4.11. menunjukkan perolehan nilai energi celah pita untuk sampel-sampel PP, CuNP, dan PP/CuNP.

Tabel 4.1. Energi celah pita sampel PP, CuNP, dan PP/CuNP dihitung dengan metode Kubelka-Munk.

Material	Persamaan Kubelka Munk	Y (KM^2)	X (E_g , eV)	E_g (literatur) (eV)
PP	$y = -50190x + 315898$	0	6.29	6,33 ^[70]
CuNP	$y = -202.13x + 356.4$	0	1.76	2.7 (Cu) ^[73]
PP/0.5CuNP	$y = -158.4x + 938.94$	0	5.93	4,72 ^[15]
PP/1CuNP	$y = -3874.8x + 21033$	0	5.43	4,26 ^[15]
PP/1.5CuNP	$y = -7546x + 33542$	0	4.43	3,98 ^[15]
PP/2CuNP	$y = -6162.4x + 26262$	0	4.26	3,78 ^[15]



Gambar 4.11. Energi celah pita untuk PP, PP/CuNP, dan CuNP.

Dari Gambar 4.11. terlihat bahwa semakin tinggi tingkat pengisian CuNP maka nilai energi celah pita PP/CuNP akan semakin rendah. Selain itu, dapat pula diamati bahwa penurunan energi celah pita terbesar terjadi pada daerah antara

PP/1CuNP dan PP/1.5CuNP. Hal ini mengindikasikan adanya daerah pengisian optimum (*percolation threshold*, bagian 2.3.5.3.2.) antara PP/1CuNP dan PP/1.5CuNP. Untuk penetapan yang lebih akurat, keberadaan daerah ini perlu dikonfirmasi dengan hasil uji konduktivitas. Sebagai tambahan, pada penelitian Yuwono dkk.^[15] *percolation threshold* terjadi pada daerah antara PP-1 CuNP dan PP-1.5CuNP (sudut pandang penurunan energi celah pita) dan antara PP-0.5CuNP dengan PP-1CuNP (sudut pandang kenaikan nilai konduktivitas).

Lebih jauh, jika ditetapkan panjang gelombang cahaya tampak (*visible*) maksimal (λ_{\min}) dan minimal (λ_{\max}) berturut-turut sebesar 0,4 μm dan 0,7 μm , maka dari persamaan (11) dapat diperoleh nilai E_g min dan E_g max berturut-turut sebesar 1,8 eV dan 3,1 eV^[35]. Kedua nilai E_g ini menjadi acuan bahwa: (i) material dengan nilai E_p (E_g) < 1,8 eV akan menyerap semua energi foton dan material dengan $1,8 < E_p$ (E_g) < 3,1 eV akan menyerap sebagian energi, yang berarti keduanya bersifat semikonduktor; dan (ii) material dengan nilai E_p (E_g) > 3,1 eV akan bersifat insulator, karena energi yang dibutuhkan untuk memindahkan elektron ke daerah pita konduksi (bagian 3.7.1.4.) lebih besar daripada energi yang diserap dari cahaya tampak.

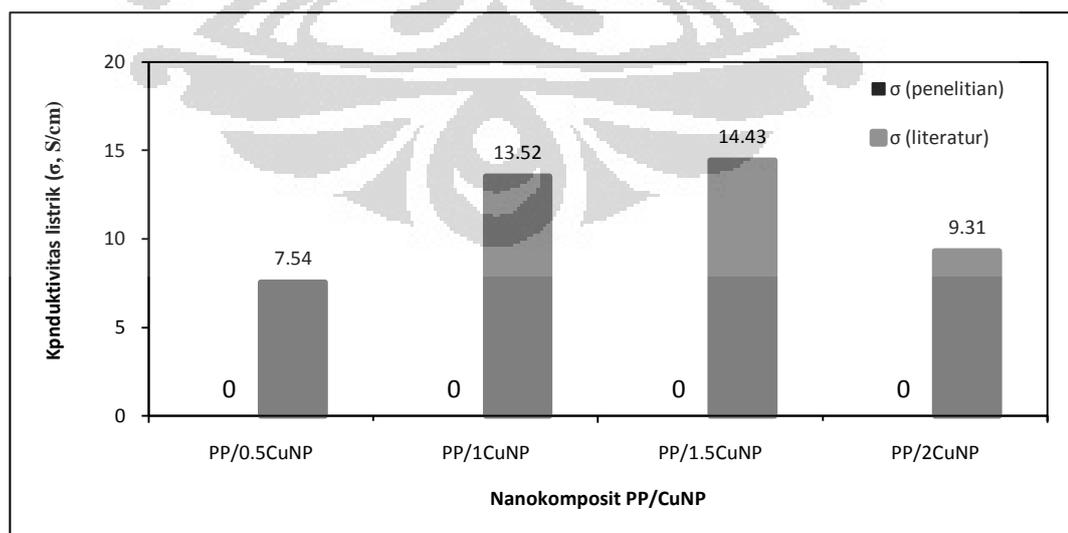
Berdasarkan acuan ini dan dari data-data pada Tabel 4.1, dapat diketahui hubungan antara sifat-sifat optis sampel dengan sifat-sifat listriknya. PP yang berwarna putih bersih menyerap sebagian energi foton yang berasal dari spektrum cahaya tampak. Namun demikian, jumlah energi foton yang diserap lebih kecil daripada energi celah pita yang dimiliki PP (6,29 eV) sehingga energi yang diserap tidak dapat memicu terjadinya perpindahan elektron. Hal ini menyebabkan PP bersifat insulator. CuNP yang berwarna coklat tua menyerap energi foton yang sama atau lebih besar dari energi celah pitanya (2,7 eV) sehingga CuNP bersifat semikonduktor. Pada PP/CuNP yang didominasi PP, berlaku hal yang sama seperti PP sehingga PP/CuNP bersifat insulator. Penetapan sifat-sifat ini akan diteliti lebih lanjut melalui analisis hasil uji konduktivitas masing-masing sampel.

4.2.2. Analisis Uji konduktivitas

Dari data-data yang diperoleh pada pengujian sebelumnya sudah terindikasi adanya pengaruh pengisian pengujian CuNP terhadap sifat kelistrikan PP/CuNP. Lewat hasil uji konduktivitas indikasi-indikasi tersebut akan semakin diperkuat dengan adanya nilai konduktivitas listrik yang memadai. Dalam pada itu, telah dilakukan pengukuran nilai konduktivitas listrik sampel-sampel CuNP dan PP/CuNP melalui perantaraan nilai hambatan jenis yang dikarakterisasi dengan teknik sebagaimana dijelaskan pada bagian 3.7.3. Hasil pengukuran nilai konduktivitas sampel-sampel PP, CuNP, dan PP/CuNP ditunjukkan oleh Tabel 4.2. dan Gambar 4.12. Nilai konduktivitas yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan bahwa penetapan sifat-sifat sampel sebelumnya adalah benar, yaitu PP dan PP/CuNP bersifat insulator sementara CuNP adalah semikonduktor.

Tabel 4.2. Hasil pengukuran konduktivitas sampel CuNP dan PP/CuNP dengan metode *in-line four probe*.

Jenis	Hambat jenis, ρ (Ω -cm)	Konduktivitas, σ (S/cm)	σ literatur (S/cm)
PP	$10^{16} - 10^{17}$ [43]	~ 0	5,45 [15]
CuNP	0.02	53.25	0.596×10^6 [74]
PP/0.5CuNP	Besar	~ 0	7.54 [15]
PP/1CuNP	Besar	~ 0	13.52 [15]
PP/1.5CuNP	Besar	~ 0	14.43 [15]
PP/2CuNP	Besar	~ 0	9.31 [15]



Gambar 4.12. Nilai konduktivitas listrik untuk sampel PP/CuNP.

Dari Tabel 4.2. dan Gambar 4.12. terlihat bahwa nilai konduktivitas PP/CuNP yang diperoleh dalam penelitian ini jauh berbeda dengan yang diperoleh pada penelitian sebelumnya oleh Yuwono dkk. ^[15] Hal ini terutama didasarkan pada metode penghitungan konduktivitas yang digunakan pada masing-masing penelitian. Mereka menggunakan standard pengujian ASTM B193 yang ditujukan untuk menghitung konduktivitas material logam konduktor ^[75]. Sementara itu, dalam penelitian ini digunakan metode ASTM F 1529 – 97 yang ditujukan untuk menghitung konduktivitas pada semikonduktor ^[76].

Bagaimanapun, nilai konduktivitas suatu material dapat berbeda hingga 20 kali lipat ^[77] dari material lainnya pada temperatur ruang. Dengan perbedaan yang sangat luas seperti ini, tidak ada satu alat yang dapat betul-betul mengukur dengan tepat konduktivitas untuk seluruh jenis material. Dalam pada itu, konduktivitas dan hambatan jenis material (*resistivity*) material akan dapat dipahami secara lebih akurat manakala dibarengi dengan pengetahuan yang mendalam mengenai mekanika kuantum ^[35, 77]. Meski demikian, nilai konduktivitas yang diperoleh dalam penelitian ini dianggap lebih mendekati sifat-sifat PP/CuNP yang seharusnya, karena lebih sejalan baik dengan teori-teori maupun fakta-fakta yang telah digunakan dan ditemukan di dalam penelitian ini.

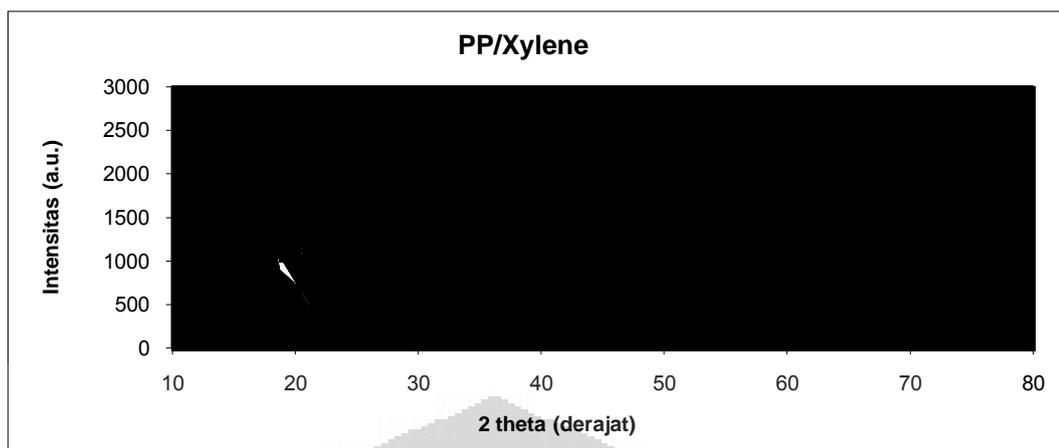
Lebih jauh, nilai konduktivitas CuNP yang dihasilkan tergolong tinggi meskipun masih jauh dari nilai konduktivitas sampel Cu murni, sebagaimana yang terlihat pada Tabel 4.2. Hal ini mengindikasikan bahwa sampel CuNP yang digunakan kemungkinan mengandung lebih dari satu fasa material di dalamnya, sejalan dengan spesifikasi material yang diberikan oleh NaBond Technologies Co., Ltd. Di samping itu, masih terdapat indikasi kemungkinan lainnya, yaitu: (i) bahwa Cu yang berada dalam CuNP bukan Cu melainkan senyawa oksida Cu yang juga bersifat konduktif, dan (ii) reaksi CuNP dengan Xylene dan PP-g-MA telah mengakibatkan perubahan struktur dan sifat pada material CuNP. Indikasi-indikasi ini akan dipelajari lebih lanjut pada bagian 4.4.5. Hasil pengujian konduktivitas juga menunjukkan bahwa nilai-nilai konduktivitas sampel PP/CuNP masih sangat kecil, yang berarti bahwa hambatan listrik di dalam sampel tersebut

masih sangat tinggi. Hal ini dapat dipahami karena memang dalam sistem PP/CuNP jumlah resin PP jauh lebih tinggi daripada jumlah partikel CuNP. Akibatnya partikel CuNP, yang berdasarkan pengamatan makroskopis (Gambar 4.2.) tampak terdispersi dengan baik, tidak berada dalam jarak (*interparticle distance*, IPD) ^[38] yang cukup dekat untuk dapat membuat suatu jembatan perpindahan elektron (*electron conductive path*) di dalam resin.

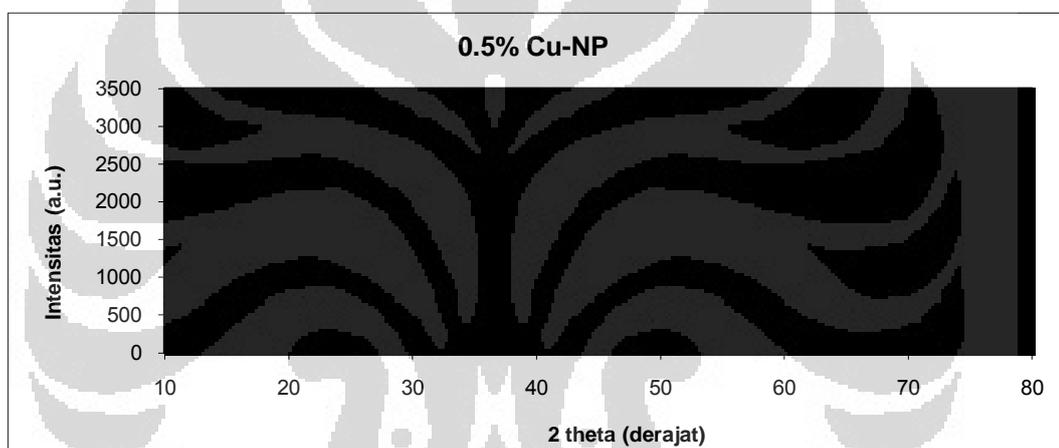
Lebih lanjut, hasil pengujian konduktivitas juga memperlihatkan bahwa tidak terdapat daerah *percolation threshold* yang dapat diamati untuk sistem PP/CuNP sebagaimana yang disinggung pada bagian 4.2.1. Telah diterangkan di bagian 2.3.5.3.2. bahwa yang dimaksud titik awal *percolation threshold* (P_c) adalah titik awal dimana material yang tadinya bersifat insulator mulai bertransisi secara signifikan menjadi semikonduktor ^[38]. Dengan kata lain, selama titik awal P_c belum ditemukan maka selama itu pula nanokomposit akan tetap bersifat insulator meskipun, tentu saja, dengan kadar yang semakin berkurang. Kesimpulan ini, sejalan dengan fakta penelitian yang menunjukkan bahwa nilai energi celah pita dan nilai konduktivitas listrik PP/CuNP sama-sama masih berada pada rentang material insulator. Sebagai penguat akan hal ini, pada bagian selanjutnya akan dianalisis hasil uji difraksi sinar-X guna mengetahui dispersi partikel CuNP di dalam PP/CuNP.

4.2.3. Analisis Uji Difraksi Sinar-X

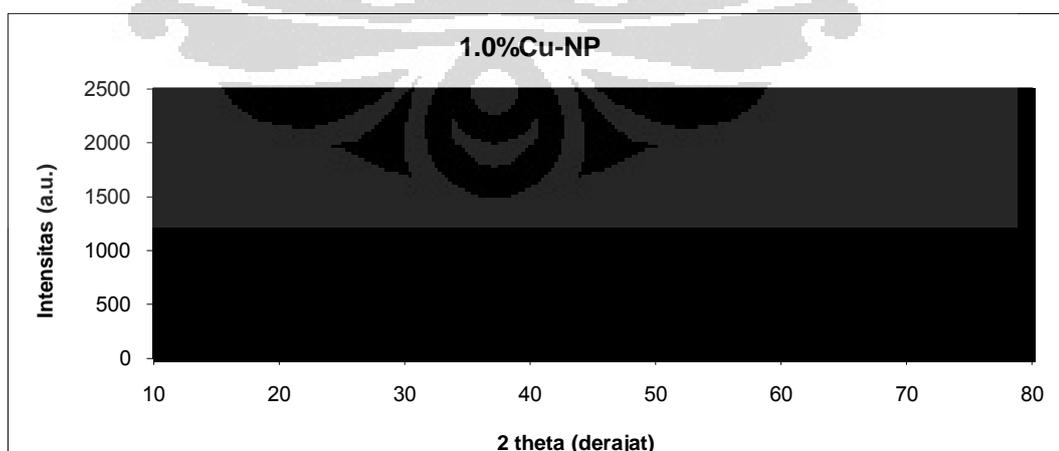
Dispersi partikel-partikel CuNP sejauh ini terbukti bertolak belakang dengan pengamatan makroskopis (Gambar 4.2.), yaitu partikel CuNP tidak terdispersi dengan baik di dalam sampel resin, terutama karena jumlahnya yang sangat sedikit. Hasil uji difraksi sinar-X akan memberikan pengetahuan tambahan mengenai dispersi partikel CuNP di dalam PP/CuNP. Sebagai suatu acuan umum dapat dirumuskan bahwa jika hasil XRD menunjukkan tidak terdapat puncak-puncak fasa yang berbeda maka dispersi partikel di dalam CuNP dipasatkan relatif bagus ^[66]. Hasil-hasil uji difraksi sinar-X pada sampel-sampel di tunjukkan oleh Gambar 4.13. – 4.17.



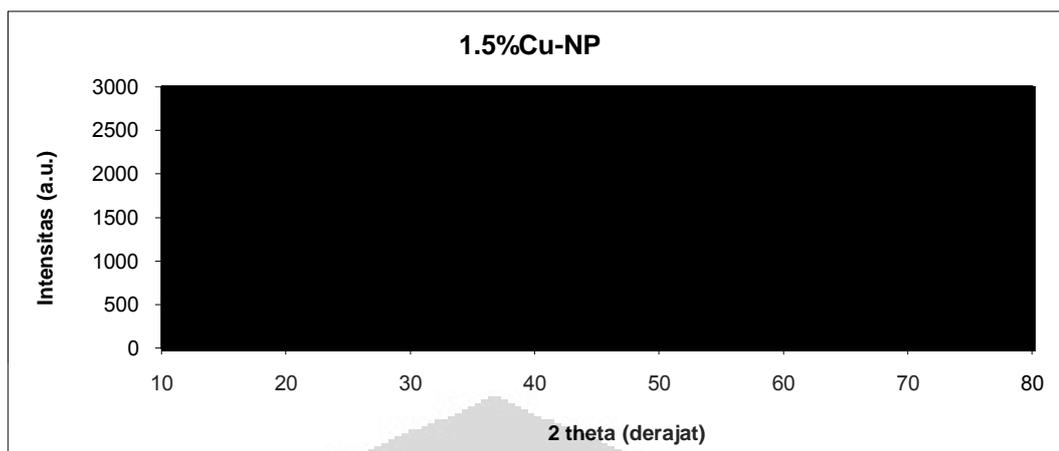
Gambar 4.13. Hasil uji difraksi sinar-X pada sampel PP/Xylene dengan kemungkinan fasa: (a) $C_{24}H_{32}O_7$, (b) $C_{15}H_{13}ClN_2O$, dan (c) $C_{24}H_{18}O$.



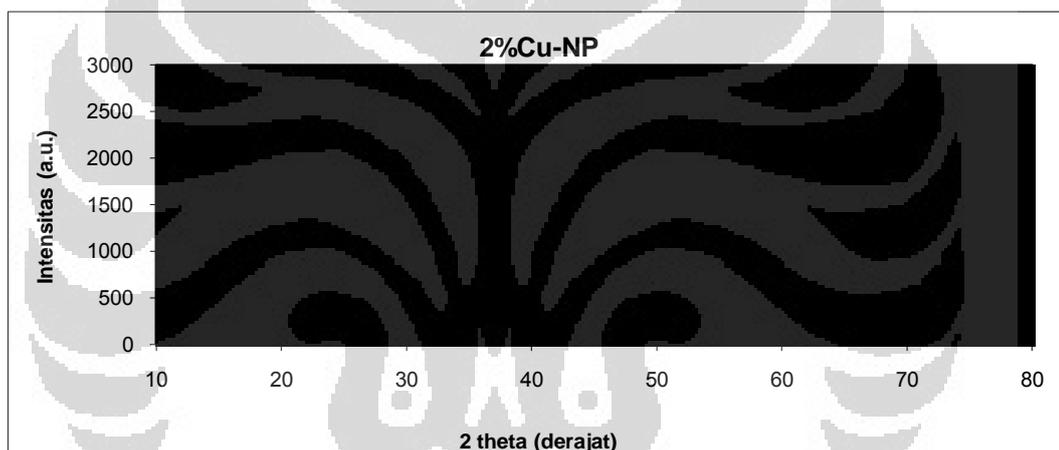
Gambar 4.14. Hasil uji difraksi sinar-X pada sampel PP/0,5CuNP dengan kemungkinan fasa: (a) dan (b) $C_{20}H_{22}N_4O_6$; dan (c) $C_{20}H_{34}NiO_{19}$.



Gambar 4.15. Hasil uji difraksi sinar-X pada sampel PP/1CuNP dengan kemungkinan fasa: (a) $C_{13}H_{12}ClNO$ dan (b) $C_{32}H_{30}Fe_2N_4O_2$.



Gambar 4.16. Hasil uji difraksi sinar-X pada sampel PP/1,5CuNP dengan kemungkinan fasa: (a) $C_{24}H_{32}O_7$, (b) $C_{11}H_{18}O_4S$, (c) $C_{18}H_{15}N_5OS$, (d) $C_{15}H_{13}ClN_2O$, dan (e) $C_6H_{12}CuN_2O_8S$.



Gambar 4.17. Hasil uji difraksi sinar-X pada sampel PP/2CuNP dengan kemungkinan fasa: (a) $C_{24}H_{32}O_7$, (b) $C_{30}H_{50}O_2$, (c) $As_3Co_2H_{47}N_{12}O_{16}$, (d) $C_{33}H_{28}S_4$.

Pada gambar-gambar terlihat bahwa bentuk serta puncak-puncak kurva-kurva PP/CuNP relatif mirip dengan grafik difraksi sinar-X pada PP. Hal ini mengindikasikan bahwa fasa-fasa di dalam nanokomposit PP/CuNP masih didominasi oleh fasa yang berasal dari PP dan partikel CuNP tidak terdispersi dengan baik di dalam material. Hal ini menjadi semakin jelas manakala kurva-kurva dianalisis secara semi kuantitatif dengan menggunakan perangkat lunak Match!. Hasil olah software Match! tersebut, dengan ketentuan sebagaimana diterangkan di bagian 3.7.2.3., menghasilkan informasi sebagai berikut:

- Sampel PP/Xylene menunjukkan ada 15 kandidat fasa yang cocok dengan data XRD; fasa dengan nilai FoM tertinggi ada pada $C_{24}H_{32}O_7$ (*schizandrol A*).
- Sampel PP/0.5CuNP menunjukkan ada 20 kandidat fasa yang cocok dengan data XRD; fasa dengan nilai FoM tertinggi ada pada $C_{20}H_{34}NiO_{19}$ (*hexaaquanickel(II) bis[2-(4-carboxyphenoxy)propionate] trihydrate*).
- Sampel PP/1CuNP menunjukkan ada enam kandidat fasa yang cocok dengan data XRD; fasa dengan nilai FoM tertinggi ada pada $C_{13}H_{12}ClNO$ (*N-(o-chlorophenyl)-2,5-dimethylpyrrole-3-carbaldehyde*).
- Sampel PP/1.5CuNP menunjukkan ada sembilan kandidat fasa yang cocok dengan data XRD; fasa dengan nilai FoM tertinggi ada pada $C_{24}H_{32}O_7$ (*schizandrol A*).
- Sampel PP/2CuNP menunjukkan ada sembilan kandidat fasa yang cocok dengan data XRD; fasa dengan nilai FoM tertinggi ada pada $C_{24}H_{32}O_7$ (*schizandrol A*).

Informasi fasa-fasa ini secara lengkap ditunjukkan oleh Tabel 4.3. Dari keseluruhan fasa yang berhasil didapatkan, tidak ditemukan puncak untuk fasa Cu. Satu-satunya puncak yang mengindikasikan terdapat CuNP ditemukan pada kurva difraksi PP/1.5CuNP (Gambar 4.16., puncak (e)) berupa senyawa $C_6H_{12}CuN_2O_8S$ dengan fraksi berat sebesar 7,74 %. Jika dilihat dari rumusnya, senyawa ini kemungkinan merupakan hasil reaksi antara Cu, PP-g-MA ($C_7H_8O_3$), dan Xylene [$C_6H_4-1,4-(CH_3)_2$].

Sebagai tambahan, berdasarkan hasil analisis dengan Match! juga ditemukan bahwa ada dua senyawa yang paling sering muncul pada senyawa-senyawa PP dan PP/CuNP yaitu $C_{24}H_{32}O_7$ dan $C_{15}H_{13}ClN_2O$. Senyawa-senyawa ini mengindikasikan bahwa telah terjadi reaksi kimia antara PP dengan Xylene, CuNP, dan juga PP-g-MA yang menghasilkan gugus baru^[70] dalam PP/CuNP. Hal ini berkesesuaian dengan teknik kimiawi basah yang digunakan dalam fabrikasi blanko PP/Xylene dan PP/CuNP.

Tabel 4.3. Kandidat-kandidat fasa dalam sampel-sampel PP dan PP/CuNP diperoleh melalui teknik analisis semi kuantitatif menggunakan Match!.

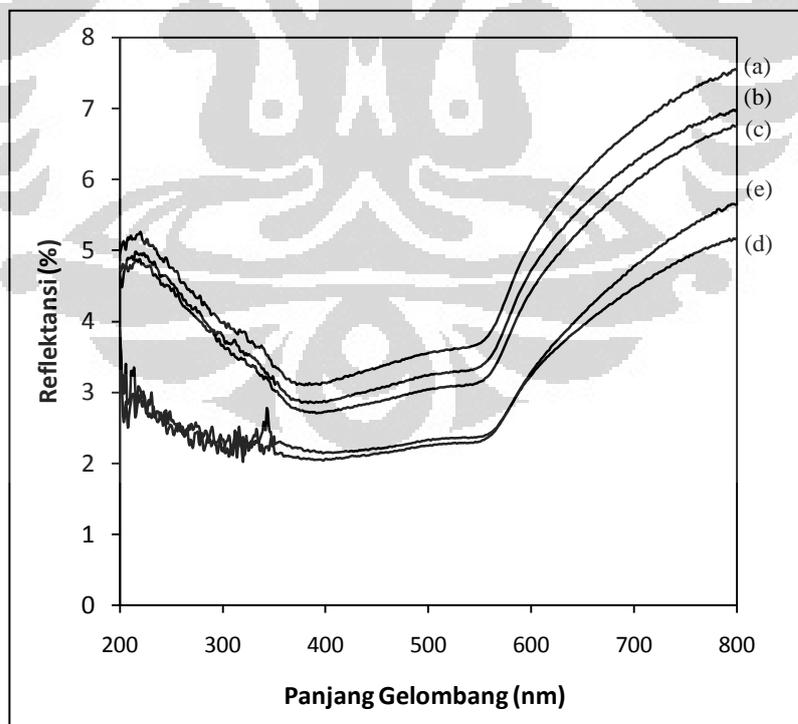
No	Fasa	FoM	wt%	No	Fasa	FoM	wt%
PP/Xylene				PP/1CuNP			
A	C ₂₄ H ₃₂ O ₇ [*]	0.94	10.66	A	C ₁₃ H ₁₂ ClNO	0.90	<u>28.19</u>
B	C ₁₅ H ₁₃ ClN ₂ O ^{**}	0.91	<u>11.29</u>	B	C ₃₂ H ₃₀ Fe ₂ N ₄ O ₂	0.86	14.68
C	C ₉ H ₁₄ N ₂ O ₂	0.90	6.60	C	C ₄₀ H ₅₄ O ₆	0.81	23.97
D	C ₉ H ₁₄ N ₂ O ₂	0.87	7.90	D	C ₃₀ H ₅₀ O ₂ [^]	0.75	11.30
E	C ₂₆ H ₁₄ F ₆ N ₂ S ₂	0.82	5.14	E	C ₅₆ H ₄₆ N ₄ O ₈	0.70	10.38
F	C ₃₀ H ₃₅ N ₅	0.79	7.33	F	C ₂₀ H ₂₆ BF ₄ O ₂ Rh	0.65	4.18
G	C ₂₇ H ₂₂ O ₃	0.75	1.99	G	C ₁₃ H ₂₂ B ₁₀ FeO	0.62	7.30
H	C ₄₂ H ₅₀ O ₄	0.72	2.41	PP/1.5CuNP			
I	C ₂₆ H ₃₀ FeN ₄ O ₄	0.71	1.41	A	C ₂₄ H ₃₂ O ₇ [*]	0.91	19.15
J	C ₂₄ H ₂₀ BFFeN ₂	0.68	2.49	B	C ₁₈ H ₁₅ N ₅ OS	0.88	<u>16.91</u>
K	C ₂₄ H ₂₄ O ₄ ^{***}	0.68	10.83	C	C ₁₅ H ₁₃ ClN ₂ O ^{**}	0.85	14.29
L	C ₁₈ H ₁₉ IN ₂ Pt [^]	0.67	0.93	D	C ₂₈ H ₂₈ N ₆ O	0.81	13.45
M	C ₃₁ H ₄₂ N ₂ O ₂	0.65	12.83	E	C ₁₁ H ₁₈ O ₄ S	0.78	9.95
N	C ₁₆ H ₂₆ O ₃ Si	0.61	4.92	F	C ₂₃ H ₂₇ FN ₄ O ₂	0.72	4.13
O	C ₂₄ H ₁₈ O	0.60	13.27	G	C ₂₈ H ₁₈ N ₂ S	0.70	5.02
PP/0.5CuNP				H	C ₂₇ H ₂₇ N ₃ O ₄ S	0.68	9.36
A	C ₂₀ H ₃₄ NiO ₁₉	0.93	6.41	I	C ₆ H ₁₂ CuN ₂ O ₈ S	0.64	7.74
B	C ₂₈ H ₂₄ N ₃ O ₂	0.91	16.12	PP/2CuNP			
C	C ₄₂ H ₅₂ S ₄	0.87	4.64	A	C ₂₄ H ₃₂ O ₇ [*]	0.94	24.31
D	C ₁₅ H ₁₃ F ₆ N ₂ PRu ₂	0.84	1.61	B	C ₁₅ H ₁₃ ClN ₂ O ^{**}	0.91	<u>23.70</u>
E	C ₂₃ H ₃₀ O ₄	0.78	2.25	C	C ₃₃ H ₂₈ S ₄	0.89	19.45
F	C _{14.5} H _{17.75} N _{3.25} S	0.77	0.00	D	C _{18.5} H _{17.5} Cl _{1.5} FeN ₅ O	0.85	10.35
G	C ₂₈ H ₁₈ N ₂ S	0.76	2.20	E	C ₂₉ H ₃₁ Li ₂ N ₁₃	0.80	6.44
H	C ₁₅ H ₁₃ ClN ₂ O ^{**}	0.71	2.66	F	C ₁₅ H ₁₆ N ₂ O ₂ S	0.76	3.82
I	C ₁₈ H ₁₉ IN ₂ Pt [^]	0.70	0.38	G	C ₃₀ H ₅₀ O ₂ [^]	0.72	2.11
J	C ₂₄ H ₂₄ O ₄	0.66	5.86	H	As ₃ Co ₂ H ₄₇ N ₁₂ O ₁₆	0.72	3.85
K	C ₁₅ H ₁₈ O ₅	0.64	4.57	I	C ₉ H ₂₇ N ₅ P ₂ Se ₂	0.68	5.98
L	C ₂₂ H ₁₆ C ₁₂ Cu ₂ N ₂ O ₆	0.64	1.11	<p>Keterangan: FoM = figure-of-merit A = ranking tertinggi wt% bergaris bawah = fraksi berat tertinggi untuk masing-masing kelompok)[*])^{**})[^])^{^^} = fasa muncul lebih dari satu kali</p>			
M	C ₉ H ₂₇ N ₃ P ₂ Se ₂	0.63	1.49				
N	C ₂₀ H ₂₂ N ₄ O ₆	0.62	7.32				
O	C ₂₂ H ₃₀ N ₂ O ₄	0.62	9.10				
P	C ₁₉ H ₁₉ N ₃ O ₂	0.61	12.24				
Q	C ₁₆ H ₅₆ B ₂₀ Si ₆	0.61	12.02				
R	C ₁₉ H ₁₅ N ₂ O ₄ V	0.60	4.03				
S	C ₄₀ H ₅₂ C ₁₄ Cu ₂ N ₈ O ₂	0.60	4.17				
T	C ₁₈ H ₂₀ IO ₂ P	0.60	1.81				

4.3. Nanokomposit CuNP/PP

Hasil pengujian sebelumnya menunjukkan bahwa nanokomposit PP/CuNP masih bersifat insulator. Kondisi PP/CuNP yang seperti ini belum memungkinkan untuk digunakan sebagai material penyusun pelat bipolar. Oleh karena itu, dengan mengacu pada informasi-informasi mengenai PP/CuNP sebelumnya, pada tahap ini ditetapkan bakalan nanokomposit yang baru (CuNP/PP). Pada bakalan ini tingkat konsentrasi CuNP ditingkatkan sedemikian rupa, yakni dari 50 – 90 wt%, sehingga menjadi fasa yang dominan di dalam sampel. Dengan demikian diharapkan nilai konduktivitas listrik sampel akan meningkat secara signifikan.

4.3.1. Analisis UV-Vis

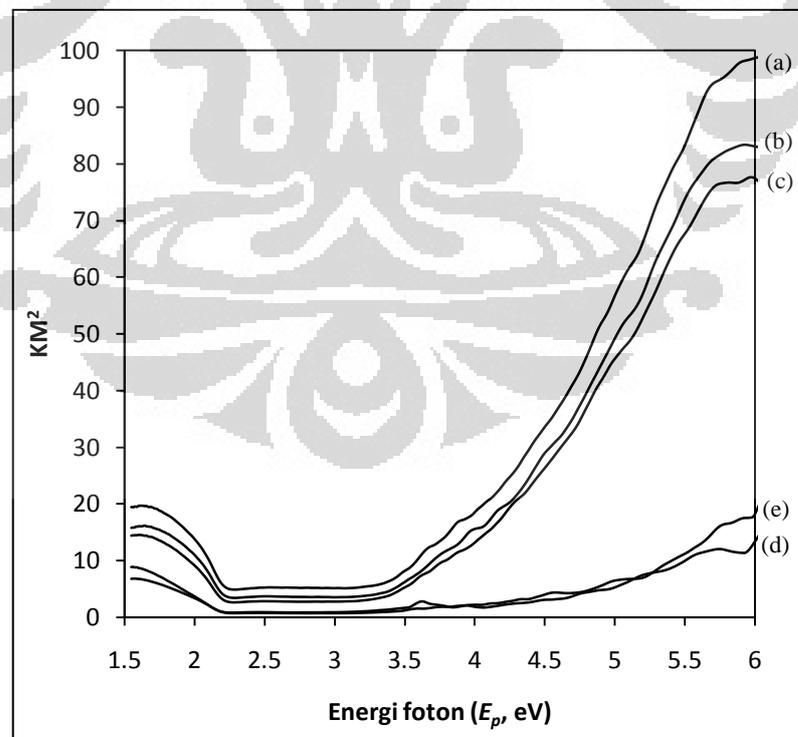
Gambar 4.18. menunjukkan hasil pengujian UV-Spektroskopi pada sampel-sampel CuNP/PP. Dari gambar tersebut tampak ada kecenderungan umum bahwa seiring dengan meningkatnya jumlah partikel CuNP di dalam PP, maka reflektansi sampel-sampel semakin menurun. Hal ini mengindikasikan adanya pengaruh positif dari meningkatnya jumlah CuNP terhadap sifat-sifat optis CuNP/PP.



Gambar 4.18. Reflektansi spektrum CuNP/PP dengan variasi wt% CuNP: (a) 50; (b) 60; (c) 70; (d) 80 ; dan (e) 90.

Pola penurunan kurva reflektansi sampel-sampel CuNP/PP antara lain berkaitan dengan warna sampel yang semakin gelap (Gambar 4.3.) sehingga tingkat penyerapan energi foton semakin tinggi. Di samping itu, kisaran nilai reflektansi CuNP/PP (20-60%) yang ditunjukkan oleh Gambar 4.16. terlihat jauh lebih rendah daripada kisaran reflektansi PP/CuNP (2-8%) yang ditunjukkan pada Gambar 4.7. Hal ini juga berkenaan dengan warna sampel CuNP/PP yang lebih gelap dibanding sampel PP/CuNP.

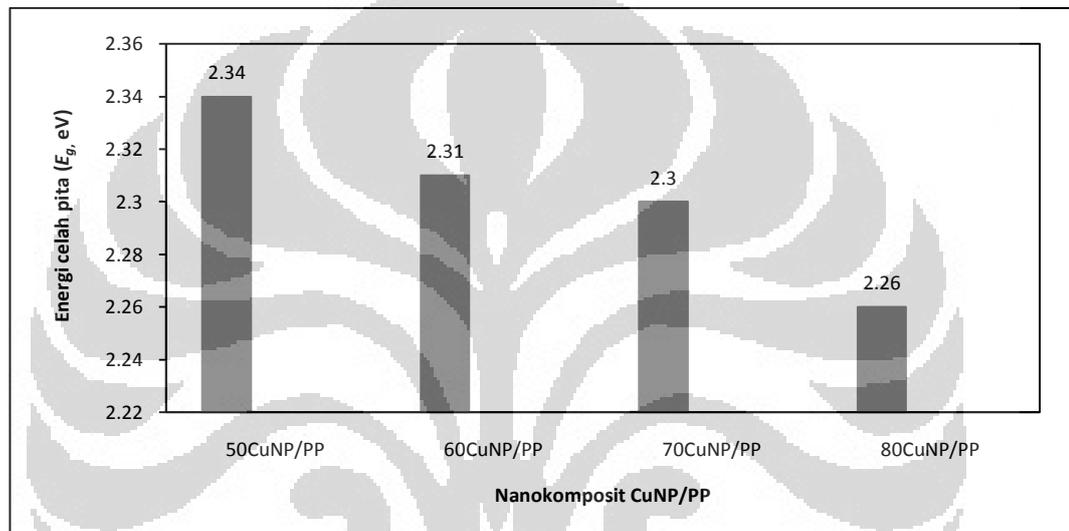
Sebagaimana pada sampel PP/CuNP, data-data uji UV-Spektroskopi CuNP/PP diperhalus dengan perangkat lunak PeakFit[®] untuk kemudian diolah menjadi kurva Kubelka-Munk seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 4.19. Dari kurva Kubelka-Munk ini akan diperoleh daerah celah pita (*band gap*) serta ditentukan garis-garis kecenderungan (*trendline*) pada daerah tersebut (Lampiran D). Selanjutnya, diperoleh persamaan Kubelka-Munk yang digunakan untuk menghitung nilai energi celah pita sampel-sampel CuNP/PP. Perolehan nilai energi celah pita untuk sampel-sampel CuNP/PP ditunjukkan oleh Tabel 4.4. dan Gambar 4.20.



Gambar 4.19. Kurva Kubelka-Munk CuNP/PP dengan variasi wt% CuNP: (a) 50, (b) 60, (c) 70, (d) 80, dan (e) 90.

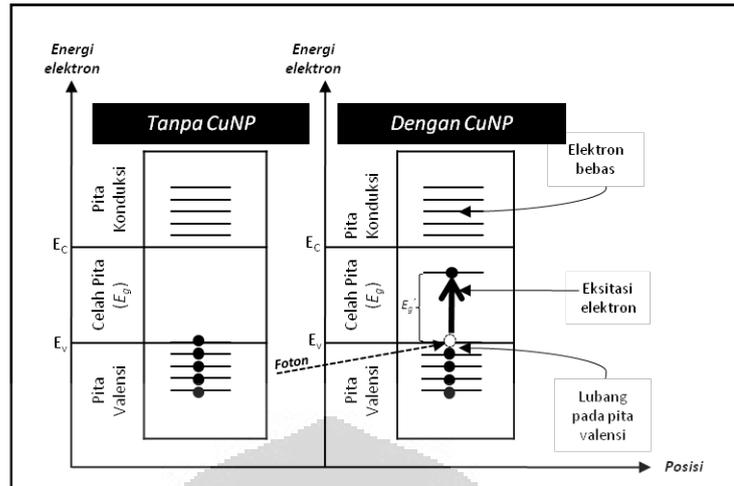
Tabel 4.4. Energi celah pita sampel CuNP/PP dihitung dengan metode Kubelka-Munk.

Material	Persamaan Kubelka Munk	Y (KM)	X (Energi celah pita,eV)
50CuNP/PP	$y = -42.452x + 99.16$	0	2.34
60CuNP/PP	$y = -36.319x + 84.02$	0	2.31
70CuNP/PP	$y = -31.83x + 73.13$	0	2.30
80CuNP/PP	$y = -13.256x + 29.926$	0	2.26
90CuNP/PP	$y = -15.303x + 34.296$	0	2.24



Gambar 4.20. Energi celah pita sampel-sampel CuNP/PP.

Dari Gambar 4.20., dapat dilihat bahwa energi celah pita pada sampel-sampel CuNP/PP menurun seiring dengan meningkatnya pengisian CuNP. Dengan mengacu pada ketentuan $1,8 < E_p (E_g) < 3,1$ eV untuk semikonduktor, hasil penghitungan energi celah pita menunjukkan bahwa sampel-sampel CuNP/PP memiliki sifat kelistrikan yang jauh lebih baik karena tergolong jenis semikonduktor dibandingkan PP/CuNP yang bersifat insulator. Kehadiran CuNP dalam jumlah yang dominan di dalam CuNP/PP telah mampu membuat sebuah tingkat elektron baru di antara daerah celah pita antara pita valensi dan pita konduksi^[35]. Hal ini kemudian berujung pada terbentuknya daerah celah pita baru yang nilai energi celah pitanya lebih kecil dari energi celah pita mula-mula. Pembentukan celah pita baru ini diilustrasikan oleh Gambar 4.21.



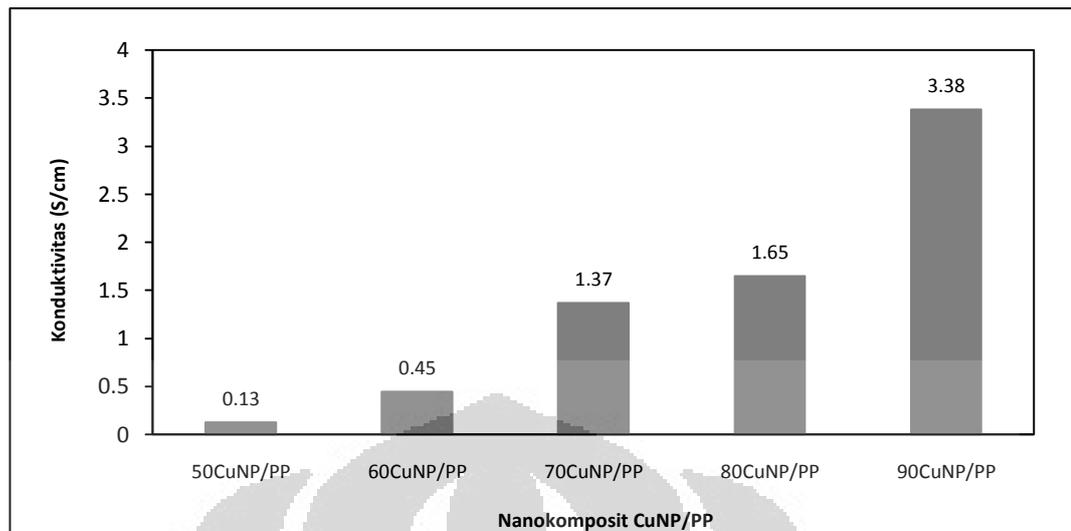
Gambar 4.21. Ilustrasi energi celah pita pada matriks PP tanpa dan dengan kehadiran CuNP yang dominan.

4.3.2. Analisis Uji Konduktivitas

Untuk dapat menilai sejauh mana tingkat konduktivitas listrik sampel CuNP/PP terhadap listrik akan dilakukan analisis terhadap hasil pengujian konduktivitas listrik. Tabel 4.5. dan Gambar 4.22. menunjukkan hasil pengujian konduktivitas listrik sampel-sampel CuNP/PP. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa telah terjadi peningkatan nilai konduktivitas sampel nanokomposit seiring dengan meningkatnya konsentrasi partikel-partikel CuNP di dalam resin PP. Di samping itu, hasil-hasil juga menunjukkan bahwa ketika partikel CuNP berada dalam kondisi yang dominan di dalam sampel maka sifat kelistrikan nanokomposit akan berubah secara signifikan dari yang semula bersifat insulator (PP/CuNP) menjadi material CuNP/PP yang konduktif terhadap listrik atau semikonduktor (kisaran konduktivitas semikonduktor: $10^{-6} - 10^4 (\Omega \text{ m})^{-1}$) [35].

Tabel 4.5. Hasil pengukuran konduktivitas sampel CuNP/PP dengan metode *in-line four probe*.

Jenis	Hambat jenis, ρ (Ω -cm)	Konduktivitas, σ (S/cm)
50CuNP/PP	7.78	0.13
60CuNP/PP	2.25	0.45
70CuNP/PP	0.73	1.37
80CuNP/PP	0.61	1.65
90CuNP/PP	0.30	3.38



Gambar 4.22. Konduktivitas sampel CuNP/PP.

Jika perolehan nilai-nilai konduktivitas PP/CuNP dan CuNP/PP dianalisis secara bersamaan tampak bahwa nilai konduktivitas komposit meningkat perlahan dari 0 – 50 wt% CuNP. Nilai-nilai ini kemudian meningkat secara signifikan mulai dari kandungan resin sebesar 60 – 90 wt%. Hal ini mengindikasikan adanya sebuah kecenderungan, yaitu bahwa konduktivitas listrik sampel-sampel akan meningkat secara signifikan dari insulator menjadi semikonduktor jika terdapat sekurang-kurangnya 50 wt% pengisi di dalam resin.

Penetapan kecenderungan (*trend*) yang seperti ini dapat dikonfirmasi dengan penelitian-penelitian sebelumnya. Chen dkk. ^[32] menemukan bahwa ketika kandungan resin (fenolik) lebih dari 15 wt% (pengisi 85 wt%) nilai konduktivitas akan turun secara cepat. Weimin dkk. ^[78] menginvestigasi bahwa nilai konduktivitas pelat bipolar komposit mendekati nol pada 50 wt% pengisi (grafit) dan terus meningkat secara signifikan sampai dengan kandungan pengisi sebesar 80 wt% di dalam resin vinil ester.

Dari penelitian sebelumnya juga dapat diketahui berat optimum resin dan pengisi untuk sebuah pelat bipolar. Chen dkk. ^[32] menetapkan berat optimum resin sebesar 15 – 20 wt%. Weimin dkk. ^[78] menetapkan bahwa kondisi optimum tercapai pada kandungan pengisi sebesar 80%. Dhakate dkk. ^[79] menetapkan kondisi optimum pada total 66 vol% pengisi (1% MWNT dan 65% grafit) dan 34 vol % resin.

4.4. Nanokomposit CuNP/PP/G

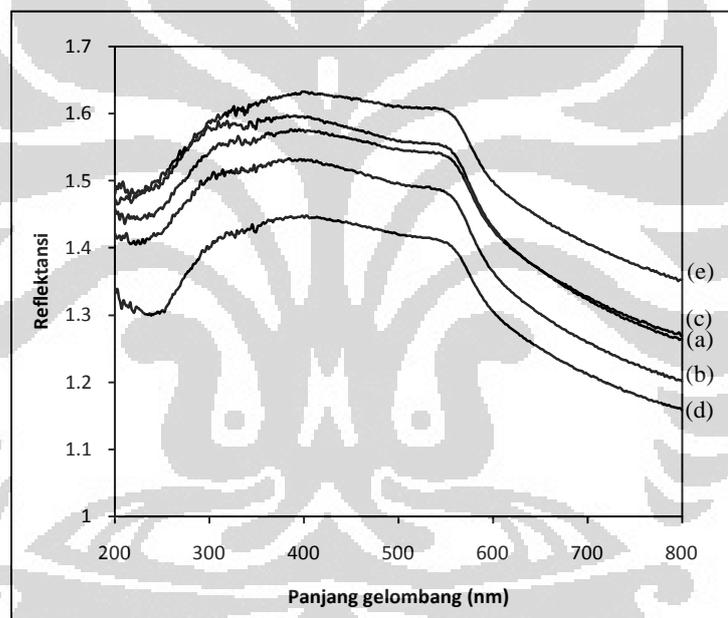
Dengan perolehan yang dicapai pada tahap sebelumnya, dapat terlihat bahwa ada pengaruh signifikan dari tingkat pengisian CuNP yang dominan terhadap sifat kelistrikan CuNP/PP jika dibandingkan dengan PP/CuNP. Bagaimanapun, nilai konduktivitas listrik yang diperoleh masih sangat kecil dibandingkan baik dengan nilai konduktivitas Cu ($\sigma_{\text{penelitian}} = 53 \text{ S/cm}$ dan $\sigma_{\text{literatur}} = 0,596 \times 10^6 \text{ S/cm}$) maupun target DOE ($\sigma_{\text{DOE}} = 100 \text{ S/cm}$). Untuk dapat meningkatkan konduktivitas bakalan nanokomposit CuNP/PP, cara yang dapat dilakukan adalah dengan menurunkan konsentrasi resin insulator. Namun demikian, penurunan resin insulator ini tidak dapat dikompensasi dengan peningkatan CuNP, misal mencapai 80 – 90 wt%, karena akan menyebabkan material semakin rapuh. Oleh karena itu, dalam penelitian akan ini ditempuh mekanisme *hybrid composite* dengan cara melibatkan partikulat grafit yang diharapkan dapat berfungsi baik sebagai pengisi konduktif (*conductive filler*) maupun sebagai penguat (*reinforcement*).

Meskipun penelitian-penelitian sebelumnya telah membuktikan bahwa grafit mampu memperbaiki sifat kelistrikan dan mekanik secara signifikan (Tabel 2.3. dan Lampiran A), namun demikian dalam penelitian ini pengaruh grafit ini masih harus dibuktikan lebih lanjut. Hal ini terutama berkaitan dengan jenis grafit yang tidak diketahui dengan baik spesifikasinya. Dalam pada itu, sebagaimana telah diterangkan di bagian 3.6. dan 4.1., dilakukan fabrikasi nanokomposit CuNP/PP/G yang secara lebih spesifik dikelompokkan lagi menjadi: 50CuNP/PP/G, 60CuNP/PP/G, dan 70CuNP/PP/G. Komposisi 50-70 CuNP dipilih sebagai kandidat kondisi optimum mengacu pada tahap penelitian sebelumnya.

Selanjutnya, dalam sub-bab ini akan dilakukan analisis terhadap hasil pengujian nanokomposit CuNP/PP/G. Sebagai tambahan, juga dilakukan identifikasi terhadap material pengisi khususnya CuNP. Pada CuNP, identifikasi ini perlu mengingat sepanjang penelitian CuNP tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap meningkatnya sifat kelistrikan nanokomposit, diukur dari target konduktivitas yang ingin dicapai. Secara teoritis, fakta ini tidak seharusnya terjadi karena CuNP yang berada dalam skala nano sejatinya menjamin adanya peningkatan sifat-sifat material komposit secara signifikan.

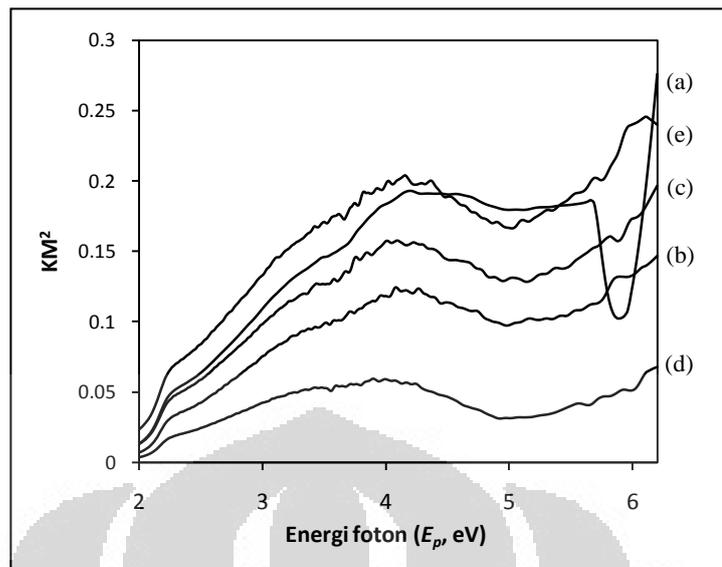
4.4.1. Analisis 50CuNP/PP/G

Hasil uji spektroskopi sampel-sampel 50CuNP/PP/G ditunjukkan oleh Gambar 4.23. Kurva-kurva reflektansi sampel 50CuNP/PP/G pada Gambar 4.23. ini relatif lebih rendah jika dibandingkan dengan kurva reflektansi 50CuNP/PP pada Gambar 4.18. Hal ini menunjukkan bahwa kehadiran grafit mempengaruhi sifat optis 50CuNP/PP/G. Lebih jauh, hal ini dapat dipahami karena dengan adanya grafit yang berwarna hitam warna sampel 50CuNP/PP/G menjadi lebih gelap dan menyerap lebih banyak cahaya sehingga nilai-nilai reflektansinya lebih rendah daripada sampel 50CuNP/PP. Penurunan ini juga mengindikasikan bahwa grafit sudah tercampur dengan baik di dalam sistem 50CuNP/PP/G.



Gambar 4.23. Reflektansi spektrum sampel 50CuNP/PP/G dengan variasi wt% G: (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20 (1), dan (e) 25.

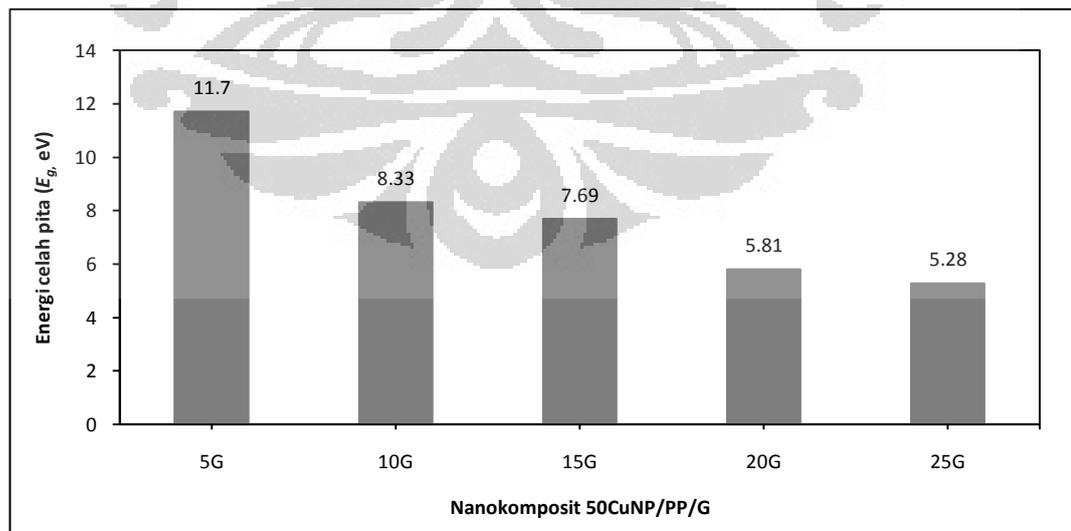
Data-data yang ditampilkan dalam Gambar 4.23. selanjutnya diolah menjadi Kurva Kubelka-Munk dengan metode sebagaimana diterangkan pada bagian 3.7. Kurva Kubelka-Munk untuk sampel-sampel 50CuNP/PP/G ditunjukkan oleh Gambar 4.24. Dari kurva Kubelka-Munk ini diperoleh daerah energi celah pita untuk masing-masing sampel 50CuN/PP/G. Kecenderungan garis pada daerah celah pita ini (ditampilkan pada Lampiran D) selanjutnya menghasilkan nilai-nilai energi celah pita seperti yang terlihat pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.25.



Gambar 4.24. Kurva Kubelka-Munk sampel 50CuNP/PP/G dengan variasi wt% G: (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20 (1), dan (e) 25.

Tabel 4.6. Energi celah pita sampel CuNP/PP dihitung dengan metode Kubelka-Munk.

Material	Persamaan Kubelka Munk	Y (KM)	X (Energi celah pita, eV)
50CuNP/PP/5G	$y = -0.0266x + 0.3112$	0	11.70
50CuNP/PP/10G	$y = -0.0289x + 0.2408$	0	8.33
50CuNP/PP/15G	$y = -0.047x + 0.3613$	0	7.69
50CuNP/PP/20G	$y = -0.0349x + 0.2028$	0	5.81
50CuNP/PP/25G	$y = -0.1066x + 0.563$	0	5.28



Gambar 4.25. Energi celah pita sampel 50CuNP/PP/G.

Gambar 4.25. menunjukkan nilai energi celah pita sampel-sampel 50CuNP/PP/G yang semakin menurun seiring dengan meningkatnya jumlah grafit di dalam sampel nanokomposit. Dilihat dari rentang nilai energi celah pita yang rata-rata lebih besar dari 3 eV maka sampel-sampel 50CuNP/PP/G tergolong jenis insulator. Nilai yang seperti ini mengindikasikan bahwa penambahan material grafit menyebabkan sampel 50CuNP/PP/G menjadi bersifat insulator.

Jika grafit yang ditambahkan dianggap bersifat insulator maka nilai energi celah pita yang diberikan dapat diterima karena berarti secara keseluruhan di dalam sistem 50CuNP/PP/G terdapat jumlah material konduktor dan insulator yang seimbang. Sementara telah dijelaskan pada bagian 4.3.2. sebelumnya bahwa untuk mendapatkan sifat konduktivitas listrik yang baik, konsentrasi pengisi konduktif harus lebih tinggi atau dominan dibanding konsentrasi konstituen yang insulator.

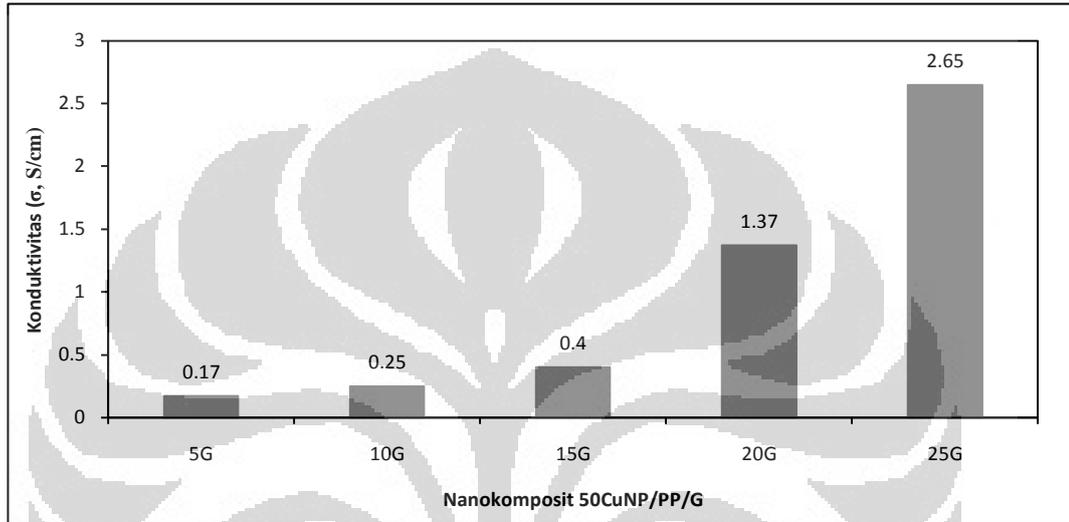
Namun jika grafit yang ditambahkan ternyata bersifat semikonduktor, maka nilai-nilai energi celah pita yang diberikan dapat dianggap tidak sesuai. Hal ini karena jumlah pengisi konduktif sejatinya sudah dominan dan secara teoritis akan menghasilkan komposit yang konduktif. Kondisi yang bertentangan ini kemungkinan disebabkan oleh menurunnya kompatibilitas pengisi di dalam resin PP sebagai akibat tidak adanya agen pengikat (*coupling agent*) PP-g-MA. Lebih jauh, kompatibilitas yang rendah berdampak pada sifat-sifat 50CuNP/PP/G yang insulator sekalipun di dalamnya terkandung pengisi konduktif yang dominan.

Untuk dapat mengkonfirmasi sejauh mana hubungan antara sifat optis, energi celah pita dan sifat kelistrikan sampel 50CuNP/PP/G, maka akan dilakukan analisis terhadap hasil uji konduktivitas listrik sampel-sampel. Sementara itu, jenis grafit akan diidentifikasi secara tersendiri pada bagian 4.4.6.

Hasil-hasil uji konduktivitas sampel 50CuNP/PP/G ditampilkan dalam Tabel 4.7. dan Gambar 4.26. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya konsentrasi grafit di dalam sistem 50CuNP/PP/G, nilai konduktivitas sampel juga ikut meningkat. Ini mengindikasikan adanya dispersi pengisi yang baik serta grafit yang ditambahkan bersifat semikonduktor.

Tabel 4.7. Hasil pengukuran konduktivitas sampel CuNP/PP dengan metode *in-line four probe*.

Jenis	Hambat jenis, ρ (Ω -cm)	Konduktivitas, σ (S/cm)
50CuNP/PP/5G	5.85	0.17
50CuNP/PP/10G	4.04	0.25
50CuNP/PP/15G	2.51	0.40
50CuNP/PP/20G	0.73	1.37
50CuNP/PP/25G	0.38	2.65



Gambar 4.26. Konduktivitas listrik sampel 50CuNP/PP/G.

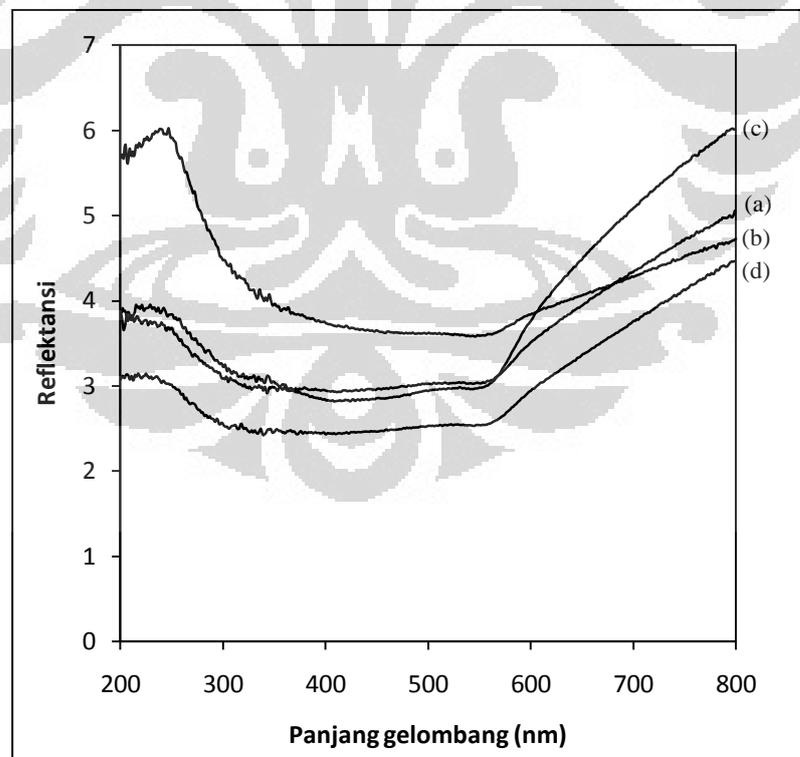
Dibandingkan dengan PP, konduktivitas 50CuNP/PP/G jauh lebih baik karena berada di kisaran semikonduktor. Selain itu, konduktivitas 50CuNP/PP/G rata-rata lebih besar dari konduktivitas 50CuNP/PP (0,13 S/cm). Hal ini mengindikasikan bahwa sistem nanokomposit hibrida 50CuNP/PP/G dengan dua pengisi (CuNP dan G) menghasilkan sifat yang lebih unggul dibandingkan 50CuNP/PP yang hanya menggunakan satu macam pengisi.

Sampai di sini, terlihat ada ketidakcocokan antara data sifat optis dengan data sifat kelistrikan sampel 50CuNP/PP/G. Mengacu pada metode pengujian, kemungkinan data uji UV-Spektroskop lebih dekat kepada sifat 50CuNP/PP/G yang sebenarnya. Hal ini mengingat bahwa pada pengujian UV-Spektroskopi penyinaran dilakukan terhadap seluruh permukaan sampel sehingga data uji lebih representatif. Sementara pada pengujian konduktivitas, nilai hambatan jenis diukur hanya pada titik-titik yang bersinggungan dengan ujung antenna (*probe*).

4.4.2. Analisis 60CuNP/PP/G

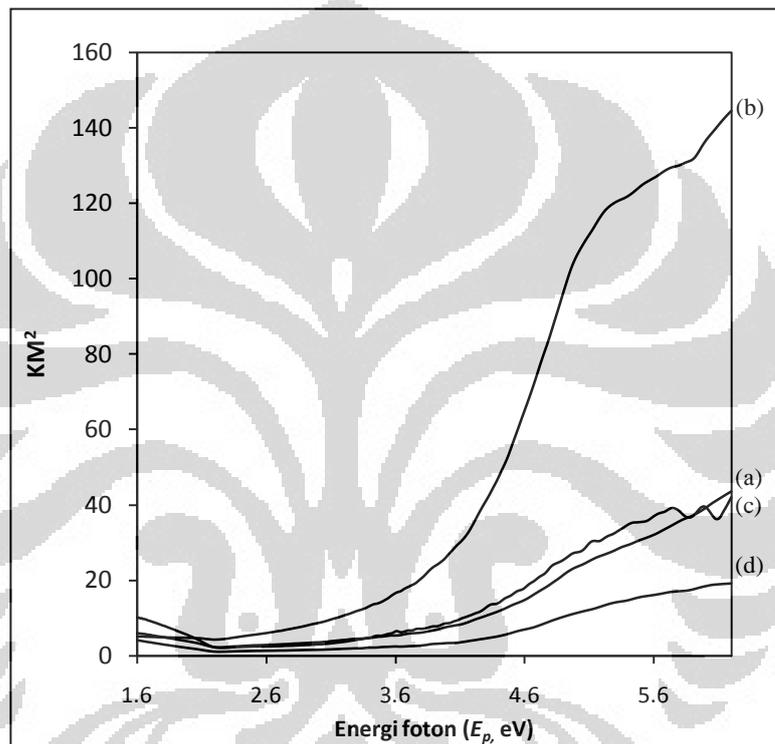
Hasil uji spektroskopi sampel-sampel 60CuNP/PP/G ditunjukkan oleh Gambar 4.27. Kurva-kurva reflektansi sampel 60CuNP/PP/G pada Gambar 4.27. relatif lebih rendah jika dibandingkan dengan kurva reflektansi 60CuNP/PP pada Gambar 4.18. Hal ini mengindikasikan bahwa kehadiran grafit mempengaruhi sifat optis sampel 60CuNP/PP/G. Selain itu, penurunan kurva juga menunjukkan bahwa grafit telah tercampur dengan baik di dalam 60CuNP/PP/G.

Lebih jauh, jika dibandingkan dengan kurva-kurva reflektansi 50CuNP/PP/G (Gambar 4.23), kurva-kurva reflektansi sampel 60CuNP/PP/G relatif lebih tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa penyerapan cahaya oleh sampel berkurang seiring dengan bertambahnya kadar CuNP di dalam sampel. Hal ini dapat dipahami karena secara makroskopis warna grafit tampak hitam dan lebih gelap daripada CuNP yang berwarna coklat tua. Dengan demikian, jika terdapat lebih banyak pengisi CuNP maka warna sampel cenderung menjadi semakin coklat tua yang tingkat penyerapan cahayanya lebih rendah daripada warna hitam.



Gambar 4.27. Reflektansi spektrum sampel 60CuNP/PP/G dengan kode: (a) N1K1 ; (b) N4K10; (c) 3K8; dan (d) N3.5K7.

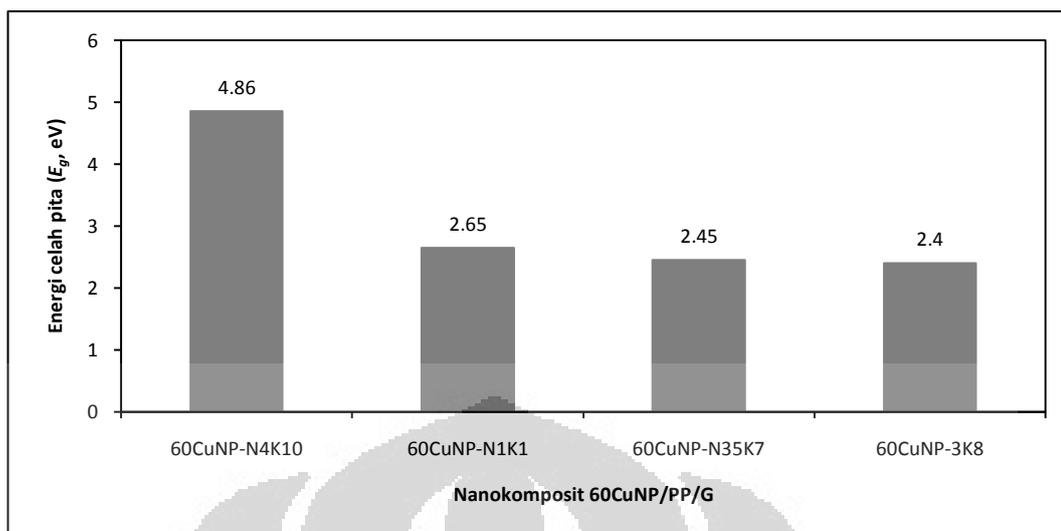
Data-data yang ditampilkan dalam Gambar 4.27. selanjutnya diolah menjadi Kurva Kubelka-Munk dengan metode sebagaimana diterangkan pada pada bagian 3.7. Kurva Kubelka-Munk untuk sampel-sampel 60CuNP/PP/G ditunjukkan oleh Gambar 4.28. Dari kurva Kubelka-Munk ini diperoleh daerah energi celah pita untuk masing-masing sampel 60CuN/PP/G. Kecenderungan garis pada daerah celah pita ini (ditampilkan pada Lampiran D) selanjutnya menghasilkan nilai-nilai energi celah pita seperti yang terlihat pada Tabel 4.8 dan Gambar 4.29.



Gambar 4.28. Kurva Kubelka-Munk sampel 60CuNP/PP/G dengan kode: (a) N1K1 ; (b) N4K10; (c) 3K8; dan (d) N35K7.

Tabel 4.8. Energi celah pita sampel 60CuNP/PP/G dihitung dengan metode Kubelka-Munk.

Material	Persamaan Kubelka Munk	Y (KM)	X (Energi celah pita,eV)
60CuNP-N4K10	$y = -1.668x + 8.1117$	0	4.86
60CuNP-N1K1	$y = -5.9502x + 15.772$	0	2.65
60CuNP-N35K7	$y = -4.5964x + 11.259$	0	2.45
60CuNP-3K8	$y = -13.956x + 33.368$	0	2.40



Gambar 4.29. Energi celah pita sampel 60CuNP/PP/G.

Gambar 4.29. menunjukkan nilai energi celah pita sampel-sampel 60CuNP/PP/G yang relatif menurun seiring dengan meningkatnya jumlah grafit di dalam sampel nanokomposit. Dari rentang nilai energi celah pita yang dihasilkan tampak bahwa sampel-sampel 60CuNP/PP/G sudah tergolong jenis semikonduktor pada tingkat pengisian grafit 15 – 25 wt%. Nilai yang seperti ini mengindikasikan bahwa ketika kadar CuNP di dalam sampel ditingkatkan menjadi dominan (60 wt%) maka sifat sampel akan berubah dari insulator menjadi semikonduktor; terlepas dari hasil identifikasi sifat grafit yang digunakan, apakah insulator atau semikonduktor. Kehadiran grafit terlihat tidak membuat sampel 60CuNP/PP/G menjadi lebih konduktif karena nilai energi celah pita yang dihasilkan justru lebih tinggi dari nilai energi celah pita 60CuNP/PP sebesar 2,31 eV.

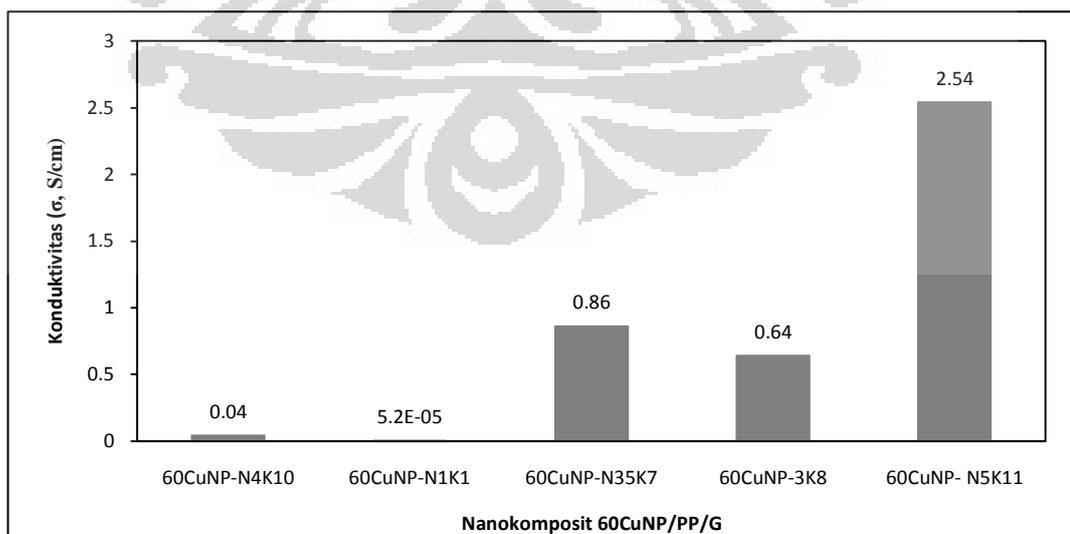
Lebih jauh, nilai-nilai energi celah pita sampel 60CuNP/PP/G terlihat jauh lebih rendah dibandingkan nilai energi celah pita 50CuNP/PP/G. Dengan mengacu pada analisis energi celah pita sampel 50CuNP/PP/G, penurunan nilai energi celah pita ini kemungkinan lebih disebabkan oleh kehadiran CuNP dibandingkan grafit. Hal ini dapat dibuktikan dengan membandingkan energi celah pita kedua sampel pada kadar grafit yang sama. Sebagai contoh, pada 50CuNP/PP/5G nilai E_g tercatat sebesar 11,70 eV (Tabel 4.6.) sementara pada 60CuNP/PP/5G (N4K10, 60 wt% CuNP) nilai energi celah pita tercatat sebesar 4,86 eV.

Untuk dapat mengkonfirmasi sejauh mana hubungan antara sifat optis, energi celah pita dan sifat kelistrikan sampel 60CuNP/PP/G, maka akan dilakukan analisis terhadap hasil uji konduktivitas listrik sampel-sampel. Hasil-hasil uji konduktivitas sampel 60CuNP/PP/G ditampilkan dalam Tabel 4.9. dan Gambar 4.30. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya konsentrasi grafit, nilai konduktivitas sampel-sampel 60CuNP/PP/G juga ikut meningkat. Hal ini mengindikasikan bahwa pengisi grafit telah terdispersi dengan baik di dalam sampel 60CuNP/PP/G.

Dibandingkan dengan PP, konduktivitas 60CuNP/PP/G jauh lebih baik karena berada di kisaran semikonduktor. Selain itu, konduktivitas 60CuNP/PP/G rata-rata lebih besar dari konduktivitas 60CuNP/PP (0,45 S/cm). Hal ini mengindikasikan bahwa sistem nanokomposit hibrida 60CuNP/PP/G menghasilkan sifat yang lebih unggul dibandingkan 60CuNP/PP.

Tabel 4.9. Hasil pengukuran konduktivitas sampel 60CuNP/PP/G dengan metode *in-line four probe*.

Jenis	Hambat jenis, ρ (Ω -cm)	Konduktivitas, σ (S/cm)
60CuNP-N4K10	23.4	0.04
60CuNP-N1K1	19240	0.000052
60CuNP-N35K7	1.158	0.86
60CuNP-3K8	1.57	0.64
60CuNP- N5K11	0.39	2.54

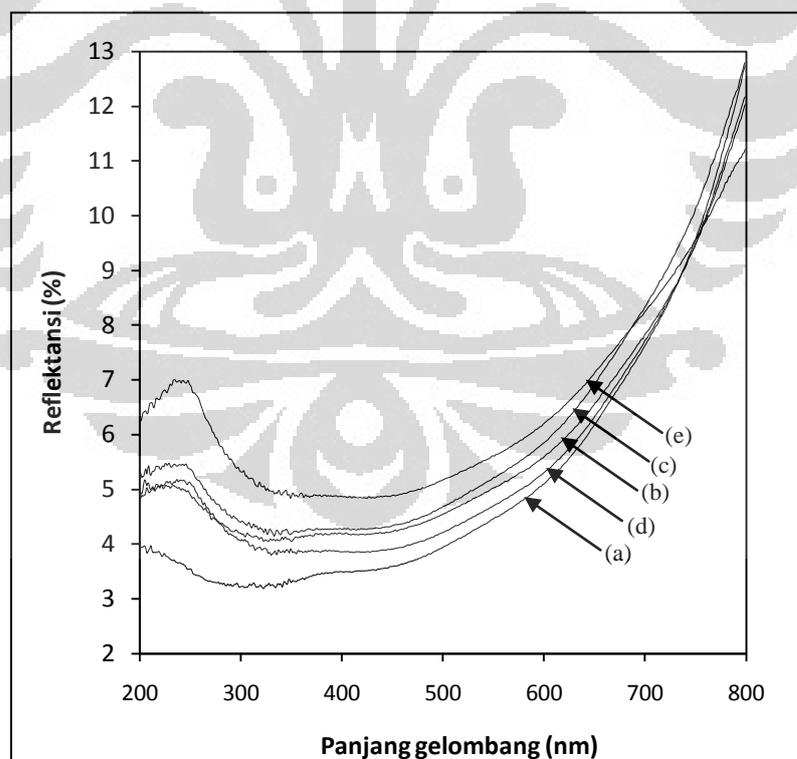


Gambar 4.30. Konduktivitas listrik sampel 60CuNP/PP/G.

4.4.3. Analisis 70CuNP/PP/G

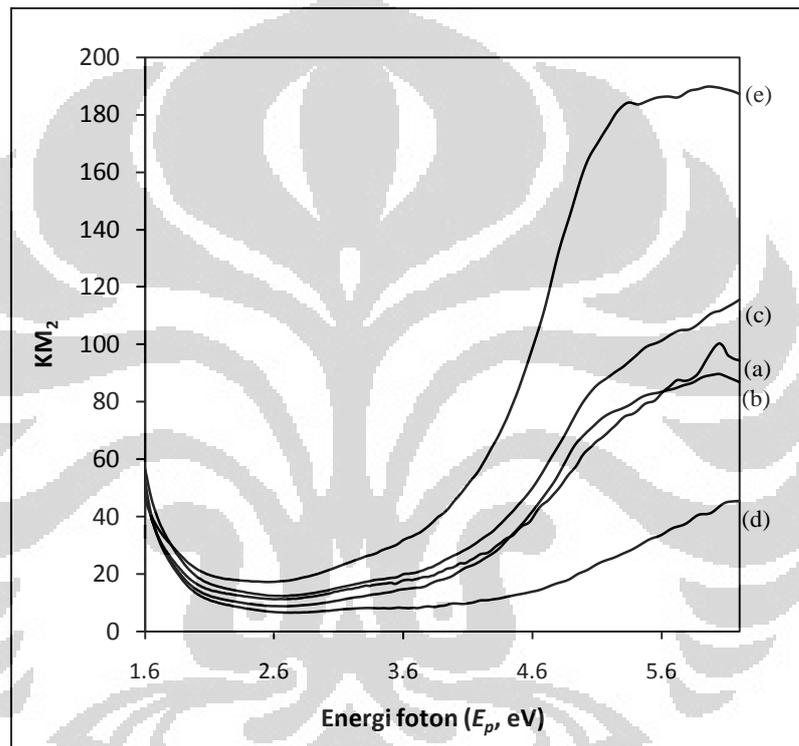
Hasil uji spektroskopi sampel-sampel 70CuNP/PP/G ditunjukkan oleh Gambar 4.31. Kurva-kurva reflektansi sampel 70CuNP/PP/G pada Gambar 4.31. relatif lebih rendah tinggi dibandingkan dengan kurva reflektansi 70CuNP/PP pada Gambar 4.18. Hal ini mengindikasikan bahwa kehadiran grafit mempengaruhi sifat optis sampel 70CuNP/PP/G. Selain itu, kenaikan kurva juga menunjukkan bahwa grafit telah tercampur dengan baik di dalam 70CuNP/PP/G.

Lebih jauh, jika dibandingkan dengan kurva-kurva reflektansi 60CuNP/PP/G pada Gambar 4.27, Gambar 4.30. memperlihatkan kurva-kurva reflektansi sampel 70CuNP/PP/G yang relatif lebih tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa penyerapan cahaya oleh sampel berkurang seiring dengan bertambahnya kadar CuNP di dalam sampel. Lebih jauh, ini berkaitan dengan warna sampel 70CuNP/PP/G (Gambar 4.6.) yang didominasi oleh warna coklat tua yang berasal dari CuNP daripada warna hitam yang berasal dari grafit.



Gambar 4.31. Reflektansi spektrum sampel 70CuNP/PP/G dengan variasi wt%G: (a) 5; (b) 10; (c) 15; (d) 20; dan (e) 25.

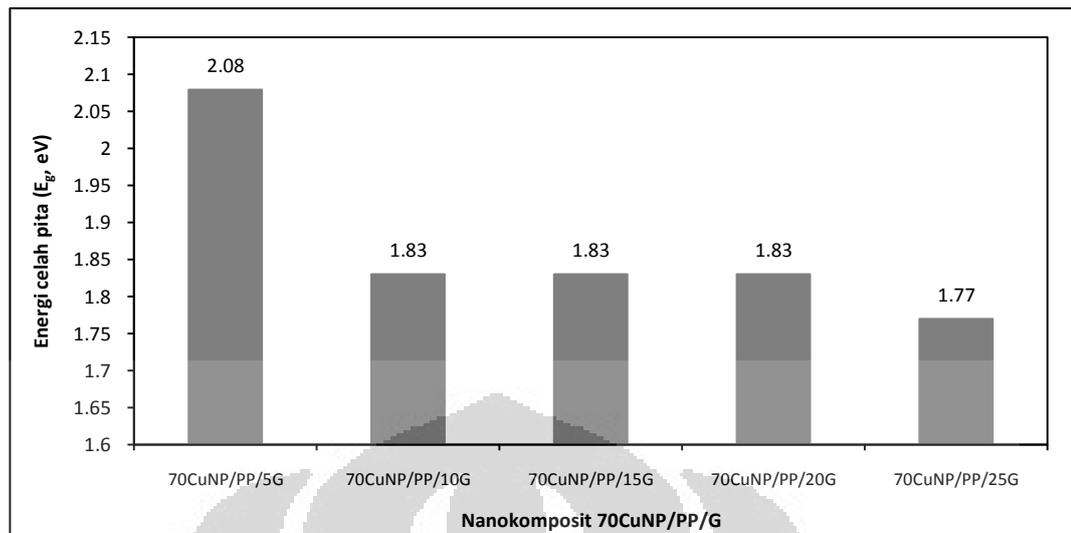
Data-data yang ditampilkan dalam Gambar 4.31. selanjutnya diolah menjadi Kurva Kubelka-Munk dengan metode sebagaimana diterangkan pada pada bagian 3.7. Kurva Kubelka-Munk untuk sampel-sampel 70CuNP/PP/G ditunjukkan oleh Gambar 4.32. Dari kurva Kubelka-Munk ini diperoleh daerah energi celah pita untuk masing-masing sampel 70CuN/PP/G. Kecenderungan garis pada daerah celah pita ini (ditampilkan pada Lampiran D) selanjutnya menghasilkan nilai-nilai energi celah pita seperti yang terlihat pada Tabel 4.10. dan Gambar 4.33.



Gambar 4.32. Kurva Kubelka-Munk 70CuNP/PP/G dengan variasi wt% G: (a) 5; (b) 10; (c) 15; (d) 20, dan (e) 25.

Tabel 4.10. Energi celah pita sampel 70CuNP/PP/G dihitung dengan metode Kubelka-Munk.

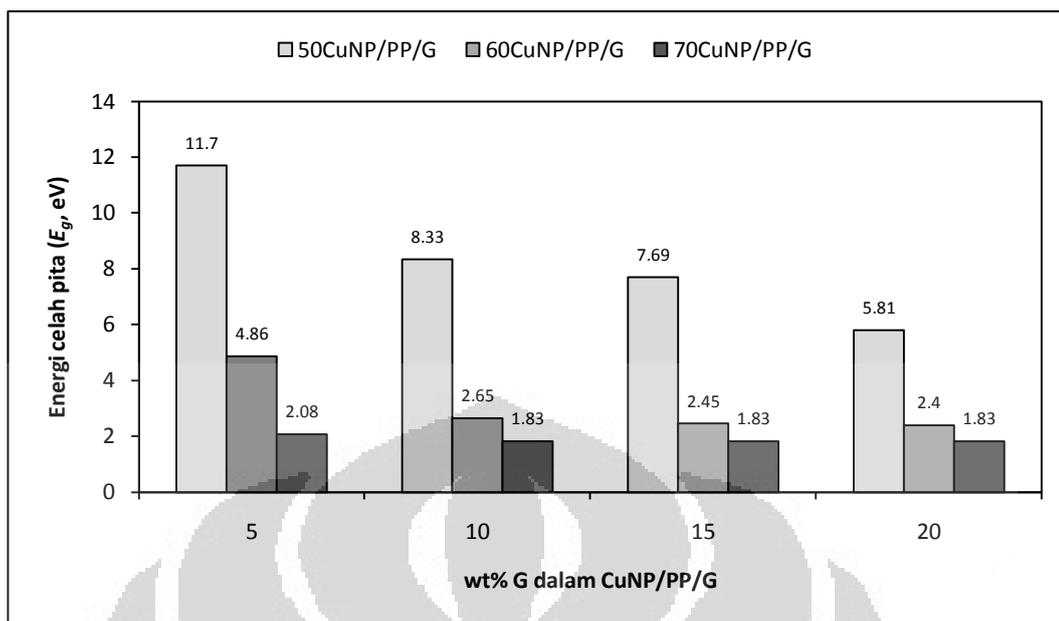
Material	Persamaan Kubelka Munk	Y (KM)	X (Energi celah pita,eV)
70CuNP/PP/5G	$y = -97.305x + 202.01$	0	2.08
70CuNP/PP/10G	$y = -221.06x + 404.98$	0	1.83
70CuNP/PP/15G	$y = -251.55x + 460.62$	0	1.83
70CuNP/PP/20G	$y = -218.63x + 399.79$	0	1.83
70CuNP/PP/25G	$y = -313.69x + 556.06$	0	1.77



Gambar 4.33. Energi celah pita sampel 70CuNP/PP/G.

Gambar 4.33. menunjukkan nilai energi celah pita sampel-sampel 70CuNP/PP/G yang relatif menurun seiring dengan meningkatnya jumlah grafit di dalam sampel nanokomposit. Dari rentang nilai energi celah pita yang dihasilkan tampak bahwa sampel-sampel 70CuNP/PP/G tergolong jenis semikonduktor. Kehadiran grafit terlihat mampu menurunkan nilai energi celah pita dan menjadikan sampel-sampel 70CuNP/PP/G lebih konduktif dibandingkan sampel 70CuNP/PP dengan nilai energi celah pita sebesar 2,30 eV. Secara umum, nilai energi celah pita sampel-sampel 70CuNP/PP/G sudah mendekati angka 1,76 eV yang merupakan nilai E_g untuk CuNP.

Lebih jauh, nilai-nilai energi celah pita sampel 70CuNP/PP/G terlihat jauh lebih rendah dibandingkan nilai energi celah pita baik 50CuNP/PP/G maupun 60CuNP/PP/G. Dengan mengacu pada analisis sebelumnya, penurunan nilai energi celah pita ini kemungkinan lebih disebabkan oleh kehadiran CuNP dibandingkan grafit. Hal ini dapat dibuktikan dengan membandingkan energi celah pita ketiga sampel pada kadar grafit yang sama. Sebagai contoh, untuk sampel 50CuNP/PP/5G nilai E_g tercatat sebesar 11,70 eV (Tabel 4.6.), sampel 60CuNP/PP/5G (N4K10, 60 wt% CuNP, Tabel 4.8.) nilai E_g tercatat sebesar 4,86 eV, sementara untuk sampel 70CuNP/PP/5G nilai E_g tercatat sebesar 2,08 eV. Gambar 4.34. menunjukkan nilai-nilai E_g untuk keseluruhan sampel CuNP/PP/G.



Gambar 4.34. Perbandingan energi celah pita untuk keseluruhan sampel nanokomposit CuNP/PP/G.

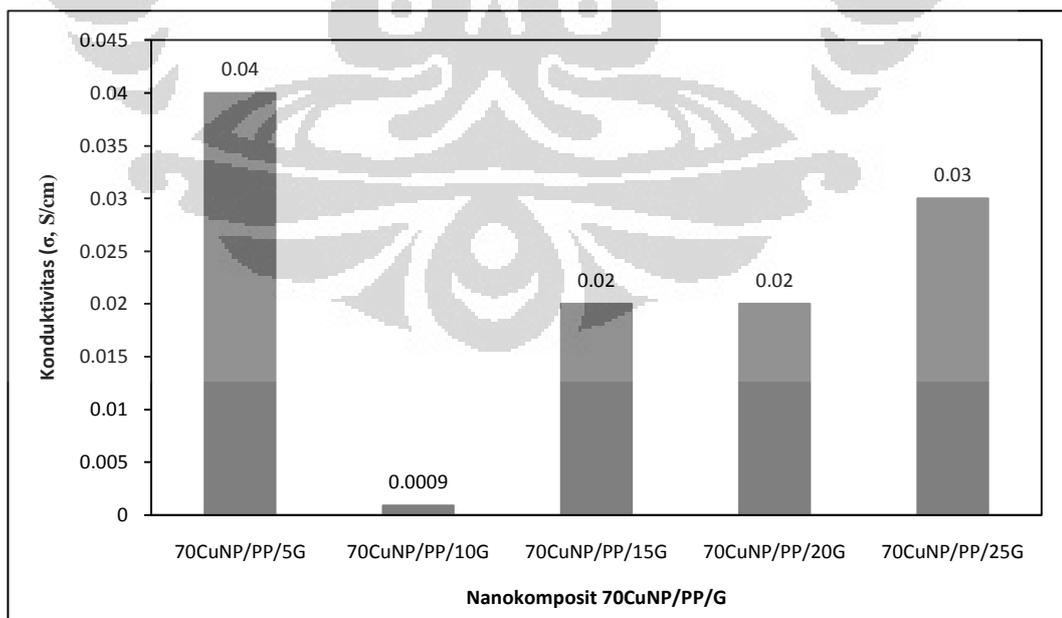
Sebagai tambahan, berdasarkan Gambar 4.34. diketahui bahwa pada kadar grafit yang sama, peningkatan kadar CuNP akan menghasilkan nilai energi celah pita yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan sifat kelistrikan pada sampel seiring dengan meningkatnya kadar partikel nanokomposit di dalam sampel. Selain itu, dapat pula diketahui titik pengisian optimum (*percolation threshold*) yang dimulai pada sampel 60CuNP/PP/G (E_g 2,65 eV). Dari titik ini sampel-sampel CuNP/PP/G mengalami transisi secara signifikan dari yang sebelumnya bersifat insulator menjadi sampel yang bersifat semikonduktor (E_g antara 2,65 – 1,77 eV). Energi celah pita terendah untuk CuNP/PP/G dicapai pada 70CuNP/PP/25G.

Selanjutnya, untuk dapat mengkonfirmasi sejauh mana hubungan antara sifat optis, energi celah pita dan sifat kelistrikan sampel 70CuNP/PP/G maka akan dilakukan analisis terhadap hasil uji konduktivitas listrik. Hasil uji konduktivitas listrik sampel-sampel 70CuNP/PP/G ditampilkan dalam Tabel 4.11. dan Gambar 4.35. Dari tabel dan gambar tersebut terlihat pola konduktivitas listrik yang tidak teratur. Hal ini kemungkinan berkaitan dengan dispersi pengisi yang tidak seragam serta lokasi serta peletakan antenna (*probe*) yang tidak representatif.

Bagaimanapun, konduktivitas listrik yang diperoleh menunjukkan bahwa sampel-sampel 70CuNP/PP/G sudah bersifat semikonduktor. Dibandingkan dengan PP, konduktivitas 70CuNP/PP/G jauh lebih baik karena berada di kisaran semikonduktor. Selain itu, konduktivitas 70CuNP/PP/G rata-rata lebih rendah dari konduktivitas 70CuNP/PP (1,37 S/cm). Dalam kondisi ini, sistem nanokomposit hibrida dengan melibatkan grafit terlihat tidak memberikan pengaruh terhadap perbaikan konduktivitas listrik jika dibandingkan dengan 70CuNP/PP. Sebagai tambahan, secara keseluruhan sampel-sampel data-data konduktivitas CuNP/PP/G tidak suatu menunjukkan pola penurunan atau kenaikan yang dapat diamati untuk kemudian diolah menjadi suatu penetapan umum. Dalam pada itu, sifat-sifat kelistrikan sampel CuNP/PP/G lebih cenderung dipahami berdasarkan sifat optis dan nilai energi celah pita yang alih-alih nilai konduktivitas yang diperoleh.

Tabel 4.11. Hasil pengukuran konduktivitas sampel 70CuNP/PP/G.

Jenis	Hambat jenis, ρ (Ω -cm)	Konduktivitas, σ (S/cm)
70CuNP/PP/5G	26.1	0.04
70CuNP/PP/10G	1094	0.0009
70CuNP/PP/15G	50.1	0.02
70CuNP/PP/20G	59.5	0.02
70CuNP/PP/25G	29.1	0.03



Gambar 4.35. Konduktivitas listrik sampel 70CuNP/PP/G.

4.4.4. Analisis Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan sesuai dengan metode Brinell sebagaimana yang telah dijelaskan pada bagian 3.7.4.2. sebelumnya. Pengujian ini dilakukan pada sampel-sampel CuNP/PP/G dalam rangka mengamati pengaruh penambahan grafit terhadap sifat-sifat mekanik nanokomposit yang dihasilkan. Dalam pada itu, digunakan sampel uji kekerasan yang berbentuk kepingan silinder. Setiap kepingan silinder memiliki diameter rata-rata sebesar 2 cm. Sementara itu, ketebalan sampel-sampel berkisar antara 2 - 4,6 mm. Dimensi sampel ini dianggap layak untuk pengujian Brinell dengan metode ASTM E10. Ketebalan minimum sampel yang diuji dengan metode Brinell sama dengan ketebalan minimum pada metode Rokwell (ASTM E18) ^[35], yakni mencapai angka minimum 0,15 mm ^[80].

Secara keseluruhan, pengujian kekerasan tidak menghasilkan nilai kekerasan yang dapat diamati. Hal ini karena sampel nanokomposit CuNP/PP/G yang dihasilkan sangat rapuh sehingga dengan pembebanan terkecil (sebesar 31,25 kg) sampel-sampel nanokomposit langsung hancur pada saat penjejakan baru saja dimulai. Contoh hasil penjejakan dengan metode Brinell ditunjukkan oleh Gambar 4.36. dan Gambar 4.37.



Gambar 4.36. Hasil pengujian kekerasan Brinell pada sampel 70CuNP/PP/20G.



Gambar 4.37. Hasil pengujian kekerasan Brinell pada sampel 100 wt% G.

Pada Gambar 4.36. terlihat bahwa penjejakan pada sampel 70CuNP/PP/G menghasilkan retak yang menjalar dari titik pusat hingga pinggiran sampel dengan kecepatan retak (*crack propagation*) yang sangat tinggi; diukur dari waktu awal penjejakan beban pada permukaan sampel. Hal ini kemungkinan berasal dari buruknya ikatan antara partikel grafit dengan konstituen-konstituen lainnya di dalam nanokomposit. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Dhakate dkk. [79] juga didapati bahwa ikatan yang buruk antara pengisi MWNT (*multiwall carbon nanotube*) dengan resin dan pengisi lainnya telah mengakibatkan nilai kekerasan menurun seiring dengan meningkatnya kandungan MWNT di dalam nanokomposit polimer-grafit-MWNT.

Pada Gambar 4.37., sampel 100 wt% G menunjukkan kondisi pasca pengujian yang mirip dengan sampel 70CuNP/PP/20G. Hasil ini menginformasikan bahwa sampel grafit memiliki kekerasan sangat rendah. Kondisi ini dapat diterangkan melalui pendekatan struktur molekul grafit (Gambar 3.5.). Pada grafit, ikatan kovalen yang terbentuk antar sesama atom dalam satu lapisan (*sheet* atau *layer*) lebih kuat dari ikatan van der Waals yang terbentuk di antara lapisan [35]. Selain itu, jarak antar atom dalam satu lapisan lebih kecil daripada jarak antar lapisan [81]. Kondisi-kondisi inilah yang kemudian menyebabkan grafit menjadi sangat rapuh sehingga menunjukkan hasil uji sebagaimana terlihat pada Gambar 4.37.

4.5. Identifikasi CuNP

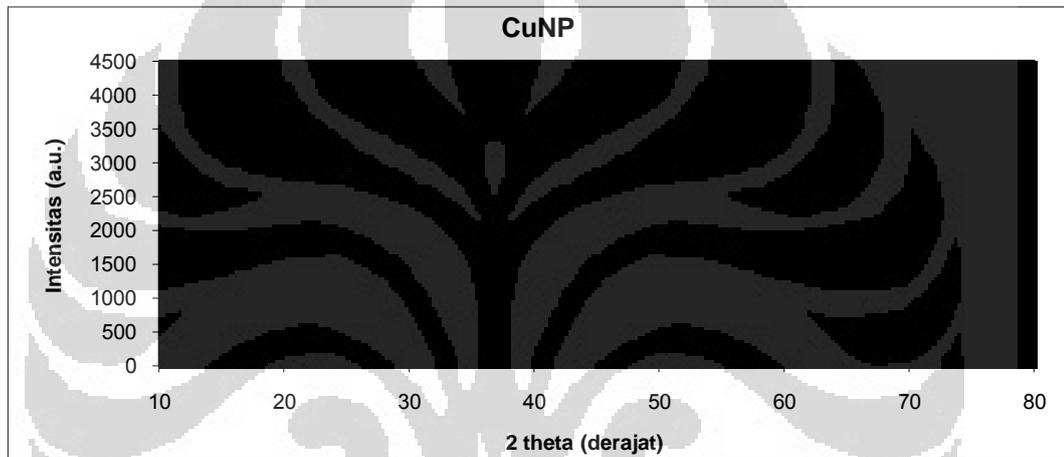
CuNP dalam penelitian ini memegang peranan sangat penting karena berfungsi meningkatkan nilai konduktivitas listrik nanokomposit yang dihasilkan. Pengenalan terhadap sifat-sifat material ini akan menghantarkan pada suatu pemahaman yang lengkap mengenai pengaruh penambahannya CuNP di dalam nanokomposit PP/CuNP, CuNP/PP, dan CuNP/PP/G. Dari hasil-hasil pengujian sebelumnya didapatkan beberapa informasi tentang CuNP sebagai berikut:

- Energi celah pita (E_g) CuNP sebesar 1,76 eV (literatur CuO: 1,20 eV) ^[57];
- Hambat jenis (ρ) CuNP sebesar 0,02 Ω -cm (literatur Cu: $1,68 \times 10^{-6} \Omega$ -cm) ^[74];
- Nilai konduktivitas listrik (σ) CuNP sebesar 53,25 S/cm (literatur Cu: $5,96 \times 10^5$ S/cm) ^[74];
- Dari analisis dengan menggunakan perangkat lunak Match! terhadap data XRD yang ditampilkan pada Gambar 4.38, dapat diketahui bahwa CuNP yang digunakan dalam penelitian ini memiliki fraksi berat Cu sebesar 8,39 wt% (Tabel 4.12.).

Dari data-data ini terlihat bahwa material CuNP yang digunakan cukup layak untuk dijadikan sebagai pengisi konduktif karena sifat-sifat kelistrikannya sudah tergolong semikonduktor ($E_p > 2\text{eV}$). Fraksi berat Cu di dalam CuNP cukup besar walau tidak dominan; fasa terbesar ada pada senyawa $\text{C}_{10}\text{H}_9\text{NO}$ (23,03 wt%). Berdasarkan pengamatan XRD ini, spesifikasi CuNP yang ditemukan di lapangan tidak berkesesuaian dengan spesifikasi CuNP yang ditetapkan oleh pensuplai CuNP, yakni memiliki fraksi berat lebih dari 99%.

Sifat kelistrikan CuNP yang cukup tinggi bisa diterima karena selain Cu, di dalam CuNP juga terdapat material konduktif lainnya seperti karbon (C), silikon (Si), dan kalsium (Ca) ^[48]. Kehadiran partikel-partikel ini akan membantu terjadinya jalur perpindahan elektron (*electron conductive path*) di dalam CuNP sehingga menghasilkan sifat kelistrikan CuNP yang cukup baik.

Lebih jauh, dari berbagai fakta penelitian ini dapat dipelajari alasan mengapa nanopartikel tembaga tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat kelistrikan sampel-sampel penelitian. Berdasarkan fakta-fakta ini, kuat dugaan bahwa Cu yang terdapat didalam CuNP adalah tembaga (II) oksida (Cu_2O) atau tembaga (I) oksida (CuO). Senyawa oksida ini mungkin adalah senyawa yang memang berasal dari pihak pensuplai. Kemungkinan lainnya yaitu bahwa tembaga yang berukuran nano telah bereaksi dengan oksigen di udara pada saat digunakan. Kehadiran senyawa oksida ini menjadi alasan mengapa pengaruh CuNP terhadap sifat kelistrikan sampel tidak terlalu signifikan sebagaimana yang diharapkan.



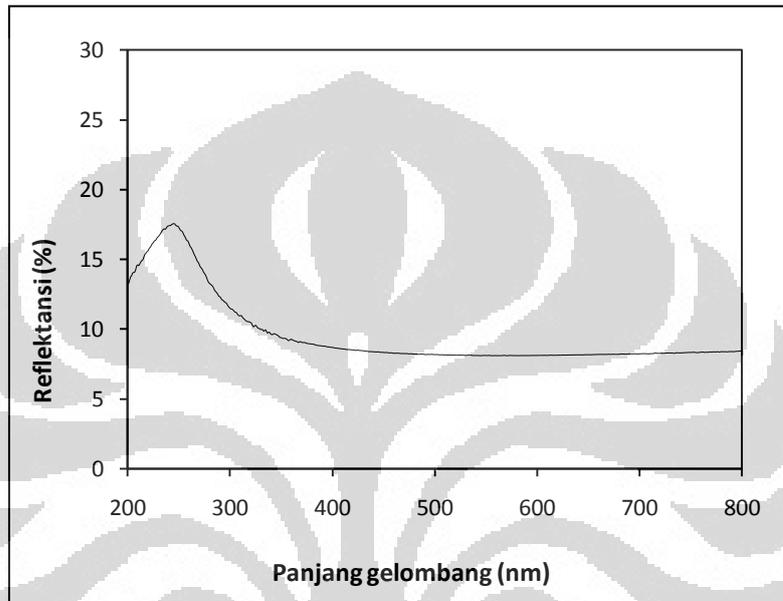
Gambar 4.38. Hasil uji difraksi sinar-X pada sampel CuNP dengan kemungkinan fasa: (a), (b), dan (c) Cu.

Tabel 4.12. Kandidat-kandidat fasa dalam sampel CuNP diperoleh melalui teknik analisis semi kuantitatif menggunakan Match!.

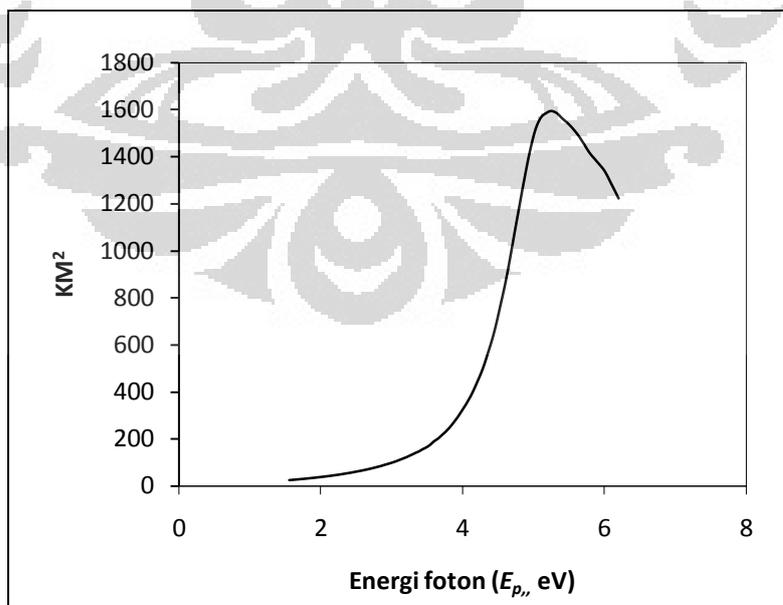
No	Fasa	FoM	wt%	No	Fasa	FoM	wt%
A	Cu	0.80	8.39	M	$\text{Er}_{36}\text{Pt}_{99.39}\text{Si}_{32}$	0.67	0.10
B	$\text{C}_{69}\text{H}_{96}\text{C}_{14}\text{N}_8\text{Ni}_8\text{O}_{21}$	0.76	2.01	N	$\text{C}_{38}\text{H}_{54}\text{O}_2\text{Ru}_3$	0.67	0.14
C	Co	0.76	0.62	O	S	0.67	0.26
D	$\text{C}_2\text{H}_2\text{MgO}_4$	0.25	11.49	P	Co	0.657	0.42
E	$\text{Pd}_{63}\text{Zn}_{213.12}$	0.72	0.52	Q	AsO_5Zn	0.65	0.25
F	Ni	0.72	0.30	R	$\text{O}_{13}\text{Tl}_2\text{W}_4$	0.64	3.93
G	$\text{C}_{10}\text{H}_9\text{NO}_4$	0.69	23.03	S	Co	0.64	0.00
H	Cr7	0.69	3.58	T	$\text{CH}_7\text{FFeNO}_5\text{S}$	0.64	18.29
I	$\text{FeNiZn}_{6.5}$	0.68	2.02	U	Co_{23}	0.6	9.05
J	Se	0.68	0.05	V	$\text{C}_{24}\text{H}_{60}\text{O}_{19}\text{V}_6$	0.63	0.88
K	$\text{C}_{28}\text{H}_{38}\text{C}_{14}\text{N}_6\text{Ni}_4\text{O}_8$	0.67	14.11	W	$\text{C}_{20}\text{H}_{52}\text{Cl}_4\text{Mn}_4\text{O}_{12}$	0.62	0.00
L	MgO	0.67	0.56				

4.6. Identifikasi Grafit

Dalam penelitian ini, grafit berfungsi sebagai pengisi konduktif sekaligus sebagai penguat (*reinforcement*). Mengingat material ini tergolong “tidak dikenal” maka jenis grafit ini akan diidentifikasi. Hasil uji spektroskopi dan kurva Kubelka-Munk untuk sampel 100 wt% G ditunjukkan oleh Gambar 4.39. dan Gambar 3.40.



Gambar 4.39. Reflektansi spektrum sampel 100 wt% G.



Gambar 4.40. Kurva Kubelka-Munk sampel 100 wt% G.

Dari kecenderungan garis pada daerah energi celah pita (Lampiran D) diketahui nilai energi celah pita (E_g) untuk grafit sebesar 8,98 eV. Berdasarkan nilai energi celah pita ini, grafit yang digunakan tergolong insulator. Hal ini menjelaskan mengapa pada sampel-sampel CuNP/PP/G grafit tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap penurunan energi celah pita sampel-sampel. Selain itu, dari pengujian konduktivitas diperoleh nilai hambatan jenis (*resistivity*) (ρ) grafit sebesar 4,63 Ω -cm, sedangkan nilai konduktivitas listrik (σ) grafit sebesar 0,22 S/cm.

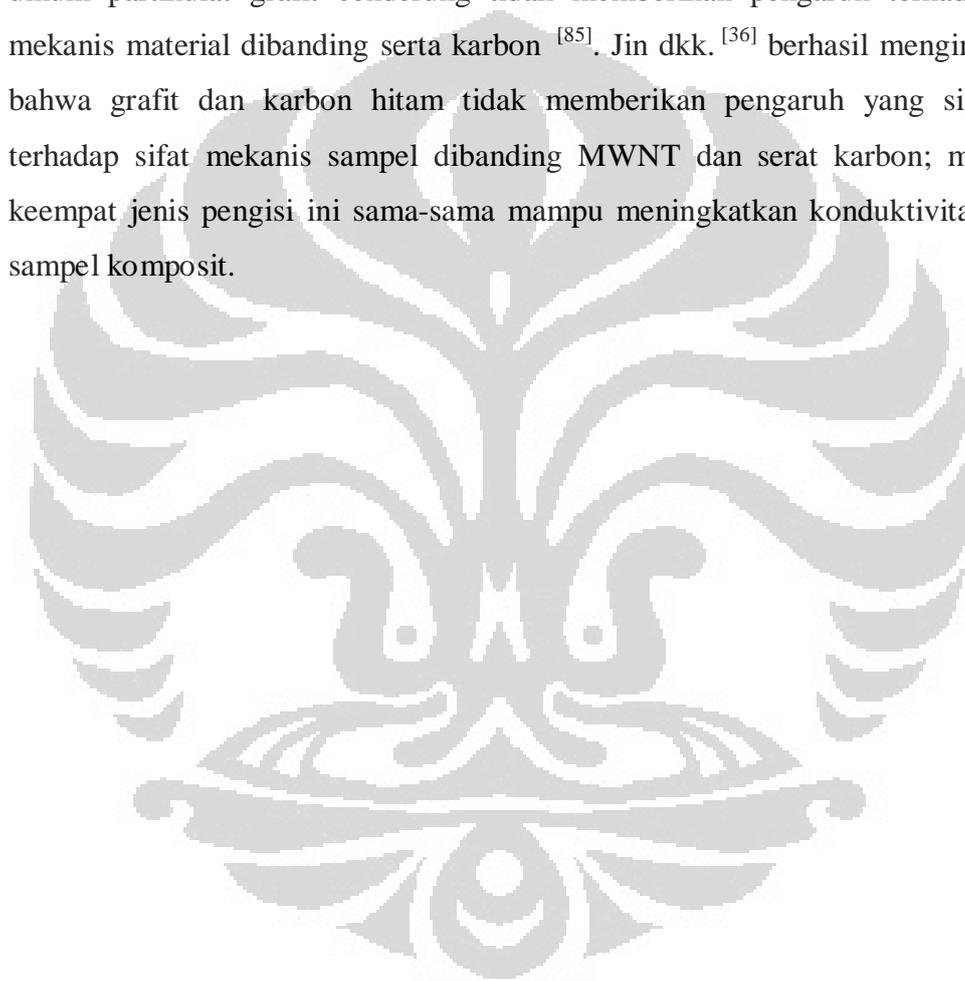
Dengan hasil uji seperti di atas, kemungkinan jenis grafit yang digunakan adalah jenis grafit amorf (*amorphous graphite*). Meski disebut amorf namun grafit ini adalah material yang sangat kristalin. Penamaan dengan amorf berkaitan dengan tingkat kristalinitas grafit yang rendah yang berdampak pada munculnya struktur mikrokristalin, jumlah kristal dalam rentang panjang (*long range order*) yang sedikit, serta bentuk partikel yang sangat halus sehingga bersifat seperti amorf^[82]^[83]. Grafit jenis ini berasal dapat berasal dari Meksiko atau Cina seperti yang digunakan dalam penelitian ini^[82]. Grafit amorf diekstraksi dari mineralnya melalui teknik penambangan batu bara (*coal-mining*) konvensional^[82].

Lebih jauh, grafit amorf memiliki kandungan debu karbon (*carbon ash*) yang tinggi^[82], seperti yang telah diperlihatkan pada Gambar 3.2 sebelumnya. Grafit jenis ini juga memiliki tingkat grafitis yang paling rendah dibandingkan grafit-grafit alam lainnya^[83], yakni grafit pipih (*flake*) dan grafit berurat kristalin (*crystalline vein*)^[84]. Berdasarkan pengujian dengan XRD kadar grafit di dalam grafit amorf hanya sebesar 20 – 40%; jauh lebih rendah dibandingkan grafit alam lainnya yang memiliki kandungan grafit hingga 90%^[83].

Struktur serta komposisi seperti yang disebutkan di atas menjadikan grafit amorf tidak memiliki sifat yang cukup baik untuk dapat digunakan sebagai pengisi konduktif (*conductive filler*) berkaitan dengan jarak antar kristal yang tinggi. Jarak kristal yang rendah ini sebagai akibat ukuran partikel yang sangat kecil. Berkaitan dengan itu, Chen Hui dkk.^[32] berhasil menginvestigasi bahwa nilai konduktivitas sampel komposit meningkat seiring dengan meningkatnya ukuran partikel grafit. Ukuran partikel yang semakin besar memungkinkan untuk penggunaan partikel

grafit dengan jumlah yang lebih sedikit. Dengan jumlah yang lebih sedikit, hambatan kontak antar permukaan (*contact resistance*) partikel akan berkurang yang berdampak pada nilai konduktivitas yang semakin meningkat.

Di sisi lain, grafit ini juga tidak cukup layak untuk dapat dijadikan sebagai penguat (*reinforcement*) karena memiliki orientasi kristal yang cenderung isotropis berkaitan dengan bentuknya yang partikulat. Bagaimanapun secara umum partikulat grafit cenderung tidak memberikan pengaruh terhadap sifat mekanis material dibanding serta karbon^[85]. Jin dkk.^[36] berhasil menginvestasi bahwa grafit dan karbon hitam tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanis sampel dibanding MWNT dan serat karbon; meskipun keempat jenis pengisi ini sama-sama mampu meningkatkan konduktivitas listrik sampel komposit.



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

1. Nanokomposit PP/CuNP, CuNP/PP dan CuNP/PP/G dapat diproses melalui melalui teknik kimiawi basah dan teknik fasa padat. Teknik kimiawi basah diperoleh dengan melibatkan Xylene dan PP-g-MA pada temperatur tertentu. Sementara teknik fasa padat dicapai melalui penggilingan manual (*manual milling*) pada temperatur ruang tanpa melibatkan Xylene dan PP-g-MA.
2. Pada nanokomposit PP/CuNP, penambahan pengisi CuNP mempengaruhi sifat optis dan sifat kelistrikan sampel-sampel Hal ini ditunjukkan dengan menurunnya energi celah pita dari 5,93 menjadi 4,26 eV. Meski demikian, penambahan pengisi tidak menyebabkan CuNP/PP bersifat konduktif. Ini dapat dikonfirmasi dengan nilai konduktivitas listrik rata-rata sampel CuNP/PP yang mendekati nol S/cm.
3. Fakta-fakta mengenai sifat optis dan kelistrikan PP/CuNP yang diperoleh pada penelitian sebelumnya berhasil dikonfirmasi kembali di dalam penelitian ini. Sifat optis PP/CuNP kedua penelitian cenderung sama, ditunjukkan dengan nilai energi celah pita yang relatif dekat. Sementara pada sifat kelistrikan, PP/CuNP pada penelitian ini bersifat insulator, berbeda dengan PP/CuNP sebelumnya. Hal ini berkaitan dengan metode uji konduktivitas yang berbeda.
4. Pada nanokomposit CuNP/PP, konsentrasi pengisi CuNP yang lebih dominan dari resin PP mampu menghasilkan nanokomposit yang tergolong semikonduktor. Hal ini ditunjukkan dengan rentang nilai energi celah pita (2,24 – 2,34 eV) yang berada pada daerah semikonduktor. Sifat konduktif ini juga ditunjukkan dengan rentang nilai konduktivitas listrik yang baik (0,13 – 3,38 S/cm).

5. Pada sampel 50CuNP/PP/G, kehadiran grafit menyebabkan sifat optis dan kelistrikan sampel-sampel menurun. Hal ini ditunjukkan dengan nilai energi celah pita 50CuNP/PP/G (11,70 – 5,28 eV) yang lebih rendah dari nilai energi celah pita 50CuNP/PP (2,34 eV). Dengan nilai ini, nanokomposit 50CuNP/PP/G tergolong insulator.
6. Pada nanokomposit 60CuNP/PP/G, kehadiran grafit menyebabkan sifat optis dan kelistrikan sampel-sampel menurun. Hal ini ditunjukkan dengan nilai energi celah pita 60CuNP/PP/G (2,40 – 4,86 eV) yang lebih rendah dari nilai energi celah pita 60CuNP/PP (2,31 S/cm). Dengan nilai ini, sebagian sampel 60CuNP/PP/G tergolong insulator sementara sebagian lainnya bersifat semikonduktor.
7. Pada nanokomposit 70CuNP/PP/G, jumlah CuNP yang lebih dominan menghasilkan sampel-sampel yang konduktif. Hal ini ditunjukkan dengan nilai-nilai energi celah pita (1,77 – 2,08 eV) yang berada pada rentang semikonduktor. Nilai-nilai ini lebih baik dari energi celah pita 70CuNP/PP.
8. Berdasarkan fakta dan investigasi penelitian, kuat dugaan bahwa CuNP yang dihasilkan merupakan senyawa oksida tembaga (Cu_2O atau CuO). Senyawa oksida ini memiliki kadar 8 wt% di dalam CuNP. Senyawa ini diduga muncul akibat penanganan material yang tidak sempurna.
9. Identifikasi jenis grafit berdasarkan fakta penelitian dan peninjauan literatur menunjukkan bahwa grafit yang digunakan dalam penelitian adalah grafit amorf.
10. Sifat-sifat kelistrikan dan sifat mekanis sampel-sampel PP/CuNP, CuNP/PP, dan CuNP/PP/G yang diperoleh dalam penelitian belum menunjukkan nilai yang mendekati target konduktivitas dan mekanis material pelat bipolar komposit. Hal ini ditunjukkan dengan nilai konduktivitas dan kekuatan tarik yang kurang dari 100 S/cm dan 41 MPa.

5.2. Saran

1. Untuk memudahkan analisis hasil pengujian, sebaiknya semua material konstituen nanokomposit juga dikarakterisasi sama persis sebagaimana karakterisasi yang dilakukan terhadap material kompositnya. Lebih jauh, hal ini akan berdampak pada hasil analisis yang lebih akurat.
2. Dalam penelitian pelat bipolar komposit, dispersi partikel memegang peranan penting karena mempengaruhi sifat akhir komposit. Dalam pada itu, untuk mendapatkan pengetahuan yang lebih akurat mengenai dispersi, disarankan agar pada penelitian-penelitian selanjutnya juga dilakukan setidaknya satu teknik karakterisasi struktur mikro yang hasilnya dipadukan dengan hasil-hasil uji lainnya.
3. Pada penelitian selanjutnya, hasil uji difraksi sinar-X dapat dimanfaatkan secara lebih luas lagi, tidak hanya berhenti pada pengamatan jenis fasa saja. Analisis kualitatif dan semikuantitatif pada XRD juga menghasilkan informasi lain seperti tingkat kristalinitas, yang berguna dalam memahami dispersi pengisi-pengisi di dalam resin.
4. Dalam rangka mendapatkan pemahaman yang lebih akurat mengenai sifat optis dan kelistrikan pada sampel nanokomposit, analisis mengenai kedua sifat tersebut sebaiknya juga melibatkan teori mekanika kuantum secara lebih luas lagi.
5. Untuk dapat mengkonfirmasi fakta-fakta yang diperoleh dalam penelitian ini, pada penelitian berikutnya disarankan untuk menggunakan CuNP dan grafit yang berbeda dengan yang digunakan dalam penelitian ini.

DAFTAR REFERENSI

1. Global Warming: Frequently Asked Questions. *NOAA Satellite and Information Service*. [Online] 2007. <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/globalwarming.html>.
2. What is Global Warming? [Online] [Diakses pada: 30 April 2011.] <http://environment.nationalgeographic.com/environment/global-warming/gw-overview>.
3. **Hai, Ching.** Tantangan perubahan iklim 2011. [Online] 2010. www.suprememastertv.com/ina/climate-change-kit.
4. **Green Peace.** Perubahan Iklim. *Green Peace Indonesia*. [Online] [Diakses pada: 3 Mei 2011.] <http://www.greenpeace.org/seasia/id/campaigns/perubahan-iklim-global/>.
5. Fuel Cell Basics Benefits. *Fuel Cells 2000: The Online Fuel Cell Informations*. [Online] [Diakses pada: 2 Mei 2011.] <http://www.fuelcells.org/basics/benefits.html>.
6. **Schwartz, Mel.** Fuel Cells. *New materials, processes, and methods technology*. New York : Taylor and Francis, 2006, 10, hal. 503-544.
7. **US Fuel Cell Council, Hydrogen & Fuel Cells Canada, Fuel Cell Europe, & Fuel Cell Commercialization Confrence of Japan.** *2007 wolrdwide fuel cell industry survey*. s.l. : PricewaterhouseCoopers, 2008.
8. **Sundmacher, Kai.** *Fuel cell engineering: Toward the design of efficient electrochemical power plants*. s.l. : American Chemical Society, 2010, Ind. Eng. Chem. Res., hal. 10159-10182.
9. **U.S. Department of Energy.** Types of fuel cells. [Online] [Diakses pada: 1 Mei 2011.] http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/printable_versions/fc_types.html?m=1&.
10. **Jae Y. Lee, dkk.** *Thermal properties of epoxy based expanded graphite composite for bipolar plate for polymer electrolyte fuel cells*. [ed.] Joong Hee Lee. 2010, *Advanced Materials Research*, hal. 1107-1110.
11. **Maiyalagan, T. and Pasupathi, Sivakumar.** *Components for PEM fuel cells: An overview*. Cape Town : University of the Western Cape REsearch Repository, 2010, *Material Science Forum*, Vol. 657, hal. 143-189.
12. **Aiju Li, dkk.** *Fenton/Ultra-Violet treatment on carbon nanotube and its effects on carbon nanotubes reinforced phenol formadegyde resin/graphite*

- composite for bipolar plate*. [ed.] Jingtao Han, Zhengyi Jiang and Sihai Jiao. 2011, *Advanced Materials Research*, Vols. 156-157, hal. 933-938.
13. **Steele, Brian C. H. and Heinzl, Angelika.** *Material for fuel cell technologies*. s.l. : Macmillan Magazines Ltf., 2001, *Nature*, Vol. 414, hal. 345-352.
 14. **Jae Young Lee, dkk.** *Thermal properties of epoxy based expanded graphite composite for bipolar plate for polymer electrolyte fuel cells*. Joong Hee Lee, [ed.]. 2010, *Advanced Materials Research*, hal. 1107-1110.
 15. **Yuwono, Akhmad Herman, dkk.** *Pembuatan pelat bipolar sel bahan bakar membran polimer dengan nanokomposit tembaga dan karbon dalam matrik polipropilena*. Universitas Indonesia. Depok : Universitas Indonesia, 2009. Laporan Hibah Bersaing.
 16. **Winter, Martin and Brodd, Ralph J.** *What are batteries, fuel cells, and supercapacitors?* s.l. : American Chemical Society, 2004, *Chemical Reviews*, Vol. 104, hal. 4245-4269. 10.
 17. **U.S. Fuel Cell Council.** *Fuel cells for power generation*. Washington : U.S. Fuel Cell Council.
 18. Question and answers about hydrogen and fuel cell. *FuelCell 2000*. [Online] <http://fuelcells.org/info/library/QuestionsandAnswers.pdf>.
 19. **Marc, Jean.** *Manicore*. [Online] September 2003. http://www.manicore.com/anglais/documentation_a/fuell_cell.html.
 20. **EG&G Technical Services, Inc.** *Fuel Cell Handbook*. 7th Edition. MorganTown : US Department of Energy Office of Fossil Energy, 2004.
 21. *Mass production cost estimation for direct H2 PEM fuel cell systems for automotive applications*. Directed Technologies. Aarlington : s.n., 2009. Cost Estimation.
 22. **Ling Du.** *Highly conductive epoxy/graphite polymer composite bipolar plates in proton exchange membrane (PEM) fuel cells: A dissertation*. Ann Arbor : ProQuest ILC, 2008. Dissertation.
 23. **Carlson, E. J., dkk.** *Cost analysis of PEM fuel cell systems for transportation*. s.l. : National Renewable Energy Laboratory, 2005. NREL/SR-560-3910.
 24. **Mehta, Viral and Cooper, Joyce Smith.** *Review: Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing*. 2003, *Journal of Power Sources*, hal. 32-53.
 25. **Hermann, Allen, Chaudhuri, Tapas and Spagnol, Priscilia.** *Bipolar plate for PEM fuel cells: A review*. 2005, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30, hal. 1297-1302.
 26. **Davies, D. P., dkk.** *Bipolar plate materials for solid polymers fuel cells*. 2000, *Journal of Applied Electrochemistry*, hal. 101-105.

27. **Heinzel, A, Mahlendorf, F and Jansen, C.** Bipolar plate. *Elsevier Direct*. [Online] 2009. www.elsevierdirect.com/brochures/ecps/PDFs/BipolarPlates.pdf.
28. **Conghua Wang.** *Information Bridge: DOE Scientific and Technical Information*. [Online] 11 Mei, 2011. [Diakses pada: 17 Juni 2011.] www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review11/fc023_wang_2011_o.pdf.
29. **Adrianowycz, Orest, dkk.** *Next Generation Bipolar Plates for Automotive PEM Fuel Cells*. s.l. : U. S. Department of Energy, 2009. DE-FG36-07GO17012.
30. **Chonghua Wang.** [Online] May 11, 2011. [Diakses pada: 17 Juni 2011.] www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review11/fc023_wang_2011_o.pdf.
31. **Bu Gi Kim dan Dai Gil Lee.** *Electromagnetic-carbon surface treatment of composite bipolar plate for high-efficiency polymer membrane fuel cells*. 2010, *Journal of Power Sources*, hal. 1577-1582.
32. **Chen Hui, dkk.** *Study on the preparation and properties of novolac epoxy/graphite composite bipolar plate for PEMFC*. s.l. : Science Direct, 2009, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, hal. 3105-3109.
33. **Jun.** Bipolar Plate Materials for PEM Fuel Cells. *Materials To Life*. [Online] February 11, 2011. [Diakses pada: 20 Juni 2011.] <http://materialslife.blogspot.com/2011/02/bipolar-plate-materials-for-pem-fuel.html>.
34. **Kumar, Atul.** *Materials, design, and modeling for bipolar/end plates in polymer electrolyte membrane fuel cells: A dissertation*. Ann Arbor : ProQuest Information and Learning Company, 2004.
35. **Callister, William D, Jr.** *Materials science and engineering: An introduction*. Singapore : Wiley & Sons (Asia), 2004. ISBN 9812-53-052-5.
36. **Jin Sun Lee, dkk.** *Effect of carbon fillers on the performance of a composite bipolar plate for fuel cell*. [ed.] Joong Hee Lee. August 11, 2010, *Advanced Material Research*, Vols. 123-125, hal. 1079-1082.
37. **Pinto, Gabriel and Maaroufi, Abdel-Karim.** *Critical filler concentration for electroconductive polymer composite*. s.l. : Society of Plastics Engineers, 2011. 10.1002/spepro.003521.
38. **Jing Li, dkk.** *Percolation threshold of polymer nanocomposites containing graphite nanoplatelets and carbon nanotubes*. s.l. : 16th International Conference on Composite Materials, 2007.
39. **Benito, Javier Gonzales and Olmos, Dania.** *Efficient dispersion of nanoparticles in thermoplastics polymers*. 1. : Society of Plastics Engineers, 2010. 10.1002/spepro.002566.
40. **Crawford, R. J.** *Plastics Engineering*. 3rd. Oxford : Butterworth-Heinemann, 1998.

41. **Modern Plastics.** *Modern plastics handbook*. [ed.] Charles A Harper. New York : McGraw-Hill, 2000.
42. **The Society of the Plastics Industry, Inc.,** *Plastics engineering handbook*. [ed.] Michael L. Berins. New York : Van Nostrand Reinhold, 1991.
43. **Howe, David V.** Polypropylene, isotactic. [ed.] James E. Mark. *Polymer data handbook*. s.l. : Oxford University Press, 1999, hal. 780-786.
44. **Jang, Bor Z.** *Advanced Polymer Composites*. s.l. : ASM International, 1994.
45. **Akbari, M., Zadhoush, A. and Haghghat, M.** Journal of Applied Polymer Science: PET/PP blending by using PP-g-MA synthesized by solid phase (abstract). *Wiley Online Library*. [Online] John Wiley & Sons, Inc., March 27, 2007. [Diakses pada: 22 Juni 2011.] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.26253/abstract>.
46. Composite/Plastics. *About.com*. [Online] [Diakses pada: 22 Juni 2011.] http://composite.about.com/od/glossaries/1/bldef_c1324.htm.
47. Coupling agent mechanism. *SpecialChem*. [Online] [Diakses pada: 22 Juni 2011.] <http://www.specialchem4polymers.com/tc/adhesion-promoters/index.aspx?id=3307&q=coupling%20agent>.
48. **NaBond Technologies Co., Ltd.** Copper nanopowder from NaBond. s.l. : NaBond Technologies Co., Ltd.
49. **US Reseach Nanomaterials, Inc.** Copper (Cu) Nanoparticles / Nanopowder (Cu-Carbon Coated, 99.8%, 25 nm). [Online] US Reseach Nanomaterials, Inc. [Diakses pada: 22 Juni 2011.] <http://www.us-nano.com/inc/sdetail/2427>.
50. **US Research Nanomaerials, Inc.** Copper nanoparticles (Cu): Material safety data sheet.
51. Graphite. *Galleries.com*. [Online] [Diakses pada: 23 Juni 2011.] <http://www.galleries.com/minerals/elements/graphite/graphite.htm>.
52. **U.S. Geological Survey.** Graphite Statistics and information. *USGS: Minerals information*. [Online] [Diakses pada: 23 Juni 2011.] <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/graphite/>.
53. **Asbury Carbons.** Synthetic Graphite. *Asbury Carbons*. [Online] 2011. [Diakses pada: 23 Juni 2011.] <http://www.asbury.com/Synthetic-Graphite.html>.
54. **IUPAC.** Synthetic graphite. *IUPAC.com*. [Online] 1997. [Diakses pada: 23 Juni 2011.] <http://old.iupac.org/goldbook/S06233.pdf>.
55. **Jaszczak, John A.** The Graphite Page. [Online] [Diakses pada: 23 Juni 2011.] <http://www.phy.mtu.edu/~jaszczak/graphite.html>.
56. **Institute of Applied Ecology Chinese Academy of Sciences.** [Online] [Diakses pada: 23 Juni 2011.]

http://english.iae.cas.cn/rh/ResearchSystem1/Soil/basis_soil/201101/t20110106_64135.html.

57. Band Gaps. *Solar Cell Central*. [Online] [Diakses pada: 23 Juni 2011.] http://solarcellcentral.com/band_gap_page.html.
58. Kubelka-Munk Model. *Answer.com*. [Online] [Diakses pada: 24 Juni 2011.] <http://www.answers.com/topic/kubelka-munk-model>.
59. The Kubelka-Munk Theory of Reflectance. [Online] [Diakses pada: 23 Juni 2011.] <http://web.eng.fiu.edu/~godavart/BME-Optics/Kubelka-Munk-Theory.pdf>.
60. Photonics Dictionary: Kubelka-Munk theory. *Photonics buyers' guide*. [Online] [Diakses pada: 24 Juni 2011.] <http://64.213.107.84/Directory/dictionary/Definition.aspx?type=2&DictionaryID=4946>.
61. **Callister, William D., Jr.** *Student learning resources for Callister 6ed*. [Dokumen] Singapore : John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2004. ISBN 9812-53-052-5.
62. **Scintag, Inc.** Chapter 7: Basics of X-Ray Diffraction. Cupertino : Scintag, Inc., 1999.
63. Ceramic Engineering 122: DTA and Glass Crystallization. 2003.
64. **Borup, Rod, dkk.** *Scientific aspects of polymer electrolyte fuel cell durability and degradation*. s.l. : American Chemical Society, 2007, Chemical Reviews, Vol. 107, hal. 3904-3951.
65. **Akinci, A.** *Mechanical and structural properties of polypropylene composites filled with graphite flake*. 2, s.l. : World Academy of Materials and Manufacturing Engineering., 2009, Vol. 35, hal. 91-94.
66. **Michaeli, Walter, dkk.** *Evaluating dispersion in nanocomposites*. s.l. : Society of Plastics Engineers, 2009. 10.1002/spepro.000050.
67. **Rietveld, H. M.** *A profile refinement method for nuclear and magnetic structures*. 1968, Journal of Applied Crystallography, Vol. 2, hal. 65-71.
68. **Kruger, Martina.** Electric Resistivity / Conductivity Converter. *Cactus2000*. [Online] 2010. [Diakses pada: 24 Juni 2011.] <http://www.cactus2000.de/uk/unit/massend.shtml>.
69. The Brinell Hardness Test. *Gordon England*. [Online] Gordon England. [Diakses pada: 25 Juni 2011.] <http://www.gordonengland.co.uk/hardness/brinell.htm>.
70. **Singh, Ravinder, dkk.** *Spectroscopic studies of copper and carbon ion irradiated polypropylene*. 7, 2009, Indian Journal Physics, Vol. 83, hal. 955-961.
71. **Owen, Tony.** Fundamentals of UV-visible spectroscopy. [Online] 2000. [Diakses pada: 30 Juni 2011.]

<http://www.scribd.com/doc/8351312/Fundamentals-UVVis-Spectroscopy.5980-1397E>.

72. **Lam, Herman.** Performance of UV-Vis spectrophotometers. *Calibration & Validation Group*. [Online] www.cvg.ca/images/Performance_UV_Vis.pdf.
73. **Poole, RT.** The colour of the metal nobles. [Online] 1983. [Diakses pada: June 30, 2011.] <http://www.bilimfeneri.gen.tr/kitaplik/altin.pdf>.
74. **Barbalance, Kenneth L.** Periodic Table of Elements: Sorted by Electrical Conductivity. *EnvironmentalChemistry.com*. [Online] J.K. Barbalance, Inc., February 22, 2007. [Diakses pada: 27 Juni 2011.] <http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/electrical.html>.
75. **ASTM.** ASTM B193-02 (2008). [Online] ASTM, 2008. [Diakses pada: 2 Juni 2011.] <http://www.astm.org/Standards/B193.htm>.
76. —. Standard test method for sheet resistance uniformity evaluation by in-line four-point probe with dual-configuration procedure. s.l. : American Society for Testing and Materials, 1997. F 1529.
77. **Heaney, Michael B.** Electrical conductivity and resistivity. s.l. : CRC Press LLC., 2000.
78. **Weimin Chen, Ying Liu and Qin Xin.** *Evaluation of a compression molded composite bipolar plate for direct methanol fuel cell*. 2010, ScienceDirect, hal. 3783-3788.
79. **Dhakate, S. R., dkk.** *CNTs nanostructuring effect on the properties of graphite composite bipolar plate*. 2010, ScienceDirect, hal. 4195-4200.
80. Minimum Thickness Requirements . *Hardnesstesters.com*. [Online] [Diakses pada: 7 Juli 2011.] <http://www.newageinstruments.com/minimum-thickness.htm>.
81. Diamond and Graphite. [Online] [Diakses pada: 7 Juli 2011.] <http://www.enmu.edu/services/museums/miles-mineral/diamond.shtml>.
82. **Kalyoncu, Rustu S.** Graphite. [Online] 1998. [Diakses pada: 7 Juli 2011.] <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/graphite/310498.pdf>.
83. **Asbury Carbons.** Amorphous Graphite. *Asbury Carbons: The World's Carbon & Graphite Source for 117 Years*. [Online] [Diakses pada: 7 Juli 2011.] <http://www.asbury.com/Amorphous-Graphite.html>.
84. —. Introduction to Graphite: Introduction. *Asbury Carbons: The World's Carbon & Graphite Source for 117 Years*. [Online] [Diakses pada: 7 Juli 2011.] <http://www.asbury.com/Introduction.html>.
85. —. Enhancing Conductivity in Polymers with Graphite and Carbon. *Asbury Carbons: The World's Carbon & Graphite Source for 117 Years*. [Online] [Diakses pada: 7 Juli 2011.] <http://www.asbury.com/images/pdf/tf%20conductive%20polymers%20info%20sheet.pdf>.

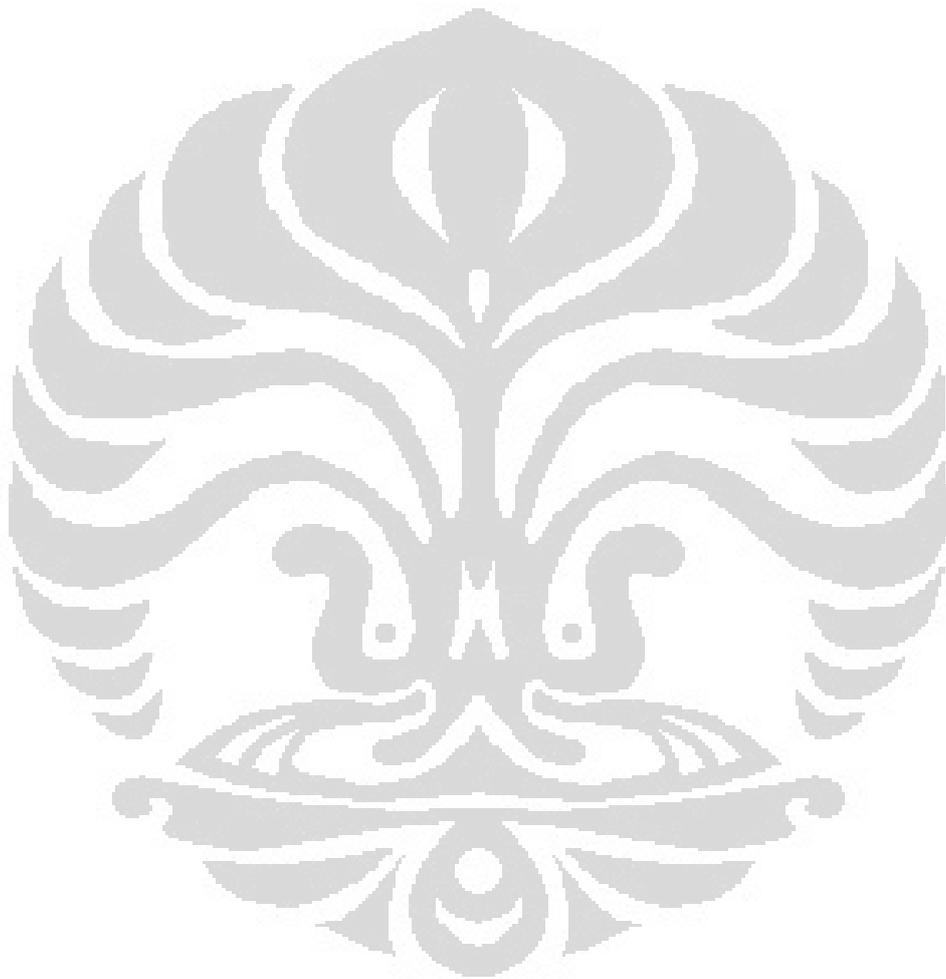
86. **Kim, Beomkeun, dkk.** *Effect of moisture and temperature on mechanical properties of graphite composite bipolar plate for proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)*. 2011, *Advanced Composite Materials*, hal. 53-64.
87. **Hsiao, Min-Chien, dkk.** *Effect of graphite sizes and carbon nanotubes content on flowability of bulk-molding compound and formability of the composite bipolar plate for fuel cell*. 2010, *Journal of Power Sources*, hal. 5645-5650.
88. **Liao, Shu-Hang, dkk.** *Preparation and properties of functionalized multiwalled carbon nanotubes/polypropylene nanocomposite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells*. 2010, *Journal of Power Sources*, hal. 263-270.
89. **Kakati, B. K., dkk.** *The electrical conductivity of a composite bipolar plate for fuel cell applications*. 2009, *ScienceDirect*, hal. 2413-2418.
90. **Yoshiyuki Show dan Kenta Takahashi.** *Stainless steel bipolar plate coated with carbon nanotube (CNT)/polytetrafluoroethylene (PTFE) composite film for proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)*. 2009, *Journal of Power Sources*, hal. 322-325.
91. **Petrach, Elaine, Abu-Isa, Ismat dan Xia Wang.** *Investigation of elastomer graphite composite material for proton exchange membrane fuel cell bipolar plate*.
92. **Ha Na Yu, dkk.** *Integrated carbon composite bipolar plate for polymer-electrolyte membrane fuel cells*. 2009, *Journal of Power Sources*, hal. 929-934.
93. **Joong Hee Lee, dkk.** *Effect of carbon fillers on properties of polymer composite bipolar plates of fuel cells*. 2009, *Journal of Power Sources*, hal. 523-529.
94. **Chen Hui, dkk.** *Characteristics and preparation of polymer/graphite composite bipolar plate for PEM fuel cells*. 2009, *SAGE Journals online*.
95. **Chen, Shia-Chung, Cheng, Chih-Kai and Shih, Ming-Yi.** *Effects of molding parameters on the through-plane resistance of injection molded composite polymer bipolar plate*. 2009, *Journal of Polymer Engineering*, hal. 121-133.
96. **Lee, H. S., dkk.** *Evaluation of graphite composite bipolar plate for PEM (proton exchange membrane) fuel cell: Electrical, mechanical, and molding properties*. 2007, *Journals of Materials Processing Technology*, hal. 425-428.
97. **Dhakate, S. R., dkk.** *Influence of expanded graphite particle size on the properties of composite bipolar plates for fuel cell application*. 2009, *Energy & Fuels*, hal. 934-941.
98. **Liao, Shu-Hang, dkk.** *Preparation and properties of carbon nanotube/polypropylene nanocomposite bipolar plates for polymer*

- electrolyte membrane fuel cells*. 2008, *Journal of Power Sources*, hal. 1225-1232.
99. **Dhakate, S. R., dkk.** *Development and characterization of expanded graphite-based nanocomposite as bipolar plate for polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC)*. 2008, *Energy & Fuels*, hal. 3329-3334.
 100. **Tarasenko, A. A., Lysenko, A. A., dan Lysenko, V. A.** *Porous carbon-carbon composites for fuel cells*. 2007, *Fibre Chemistry*, hal. 159-162.
 101. **Tawfik, Hazem, dkk.** *Effects of bipolar plate material and impurities in reactant gases on PEM fuel cell performance*. 2007, *Ind. Eng. Chem.*, hal. 8898-8905.
 102. **Kakati, Biraj Kumar dan Deka, Dhanapati.** *Effect of resin matrix precursor on the properties of graphite composite bipolar plate for PEM fuel cell*. 2007, *Energy & Fuels*, hal. 1681-1687.
 103. **Mineo Washima, dkk.** *Metallic bipolar plate for fuel cell and fuel cell bipolar plate using same, and fabrication method of same*. US 7,871,737 B2 18 Januari 18 2011.
 104. **Bor Z. Jang, Zhamu Aruna, dan Guo Jiusheng.** *Highly conductive, multi-layer composite precursor composition to fuel cell flow field plate or bipolar plate*. US 7,887,927 B2 15 Februari 2011.
 105. **Ma, Chen-Chi Martin, dkk.** *Manufacturing process of conductive polymer composite bipolar plate for fuel cell having hing glass permeability-resistance and heat-resistance*. US 7,910,040 B2 22 Maret 2011.
 106. **In Woong Lyo, dkk.** *Metallic bipolar plate for fuel cell and method for forming surface layer of the same*. US 7,914,948 B229 Maret 2011.
 107. **Han, Sang-II, dkk.** *Polymer membrane fuel for fuel cell, method of preparing the same, membrane-electrode assembly including the same, and fuel cell system including the same*. US 7,816,416 B2 19 Oktober 2010.
 108. **Jianye Jiang and Tetsuya Harada.** *Fuel cell, bipolar plate, and fuel cell*. US 7,820,336 26 Oktober 2010.
 109. **Lee, Myung-jing, Cho, Myung-dong and Sun, Hee-young.** *Polymer electrolyte and fuel cell employing the same*. US 7,850,873 B2 14 Desember 14 2010.
 110. **Kim, Hyoung-Juhn, dkk.** *Composite material for bipolar plate*. US 7,510,678 B2 31 Maret 2009.
 111. **Mantese, J. V., dkk.** *Fuel cell with metal alloy contacts that form passivating conductive oxide surface*. US 7,575,826 B2 18 Agustus 2009.
 112. **Mechler, Christof, dkk.** *Bipolar plate for pem fuel cells*. US 7,629,070 B2 8 Desember 2009.

113. **Madeleine, Sylvain and Manicardi, Philippe.** *Fuel cell bipolar plate and fuel cell with improved fluid distribution employing such plates.* US 7,718,299 B2 18 Mei 2010.
114. **Ma, Chen-Chi Martin, dkk.** *Preparation of fuel cell composite bipolar plate.* US 7,090,793 B2 15 Agustus 2006.
115. **Naomitsu Nishihata and Masahito Tada.** *Separator for solid polymer fuel cells and production process thereof.* US 7,128,996 B2 31 Oktober 2006.
116. **Ming Sun Lee, dkk.** *Heterogeneous composite bipolar plate of a fuel cell.* US 7,033,693 B2 25 April 2006.
117. *Fuel Cell Standard.* [Online] June 2011.
<http://www.fuelcellstandards.com/vehiclematrix.htm>.



LAMPIRAN-LAMPIRAN



LAMPIRAN A

HASIL PENELITIAN TERDAHULU

A.1. Jurnal

A.1.1. Effect Of Moisture and Temperature on Mechanical Properties of Graphite Composite Bipolar Plate^[86]

Salah satu fungsi dari pelat bipolar yang merupakan bagian terbesar dari PEMFC adalah mengatur aliran air di dalam sel. Dalam rangka menggunakan komposit grafit sebagai material pelat bipolar PEMFC, maka dilakukan pengamatan terhadap pengaruh uap air terhadap sifat-sifat mekanik dari sampel. Disiapkan dua buah sampel: (i) 90% grafit-10% epoksi ditambah *carbon-fabric* dan ii) tanpa karbon. Sampel diletakkan dalam tiga lingkungan: (i) temperatur ruang, ii) diletakkan selama 100 jam dalam air bersuhu 85°C, dan iii) diletakkan selama 300 jam dalam air bersuhu 100°C. Hasil menunjukkan bahwa untuk kedua jenis sampel terjadi peningkatan penyerapan air di awal dan kemudian menurun secara perlahan. Sampel dengan karbon memiliki kemampuan menyerap air yang lebih rendah. Dari pengujian diketahui pula bahwa kadar air yang tinggi menyebabkan kekuatan mekanis menurun. Adapun, penambahan karbon pada sistem komposit meningkatkan kekuatan tarik secara signifikan.

A.1.2. Study on the Preparation and Properties of Novolac Epoxy/Graphite Composite Bipolar Plate for PEMFC^[32]:

Pada studi ini, pelat bipolar disusun dari material komposit grafit/polimer dan difabrikasi dengan teknik *bulk-molding*. Epoksi novolac diikatkan dengan grafit alam dan karbon hitam. Sifat kelistrikan dan sifat mekanik dari pelat bipolar dipelajari. Hasil menunjukkan bahwa: (i) pelat memiliki ketahanan korosi yang baik dan ii) pelat memiliki stabilitas termal sangat baik. Kondisi preparasi sampel optimum tercapai pada kadar 15 wt% epoksi, temperatur *curing* 180°C, dan

ukuran grafit 200 mesh. Pada kondisi optimum, konduktivitas listrik pelat mencapai angka 120 S/cm dan kekuatan fleksural lebih dari 38 MPa.

A.1.2.1. Evaluation of A Compression Molded Composite bipolar Plate for Direct Methanol Fuel Cell^[78]

Pada studi ini diproduksi pelat bipolar dengan bahan dasar komposit polimer-grafit melalui metode cetak tekan. Penelitian mempelajari konduktivitas listrik dan perilaku kimia pada sampel di bawah kondisi operasi DEMFC yang merupakan jenis lain dari PEMFC. Hasil menunjukkan bahwa komposit memiliki konduktivitas listrik dan ketahanan korosi yang baik. Nilai konduktivitas listrik meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi grafit. Pada konsentrasi 80 wt% serbuk grafit diperoleh nilai konduktivitas listrik sebesar 200 S/cm (ukuran grafit 300 mesh) dan >70 S/cm (ukuran grafit 500 mesh).

A.1.3. Electromagnetic-Carbon Surface Treatment of Composite Bipolar Plate for High-Efficiency Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell^[31]

Sifat pelat bipolar yang paling penting adalah hambatan listrik dan ketahanan kontak. Kedua sifat ini bergantung pada morfologi permukaan pelat bipolar. Hambatan listrik yang rendah akan meningkatkan efisiensi PEMFC. Dalam pada itu, sampel diberi perlakuan permukaan yakni dengan memanaskan karbon hitam secara elektromagnetik kemudian resin dilepas tanpa merusak serat karbon. Ini dilakukan untuk mendapatkan nilai hambatan listrik yang kecil. Hasil menunjukkan bahwa perlakuan permukaan mengakibatkan nilai hambatan turun. Hambatan pelat bipolar dengan perlakuan permukaan sebesar 0,45 ohm pada tekanan 1 MPa (42% lebih rendah dari pelat murninya). Di samping itu, pelat bipolar yang diberi perlakuan permukaan elektromagnetik ini dapat pula diproduksi secara cepat dan efisien.

A.1.4. Effect of Graphite Sizes and Carbon Nanotubes Content on Flowability of Bulk-Molding Compound and Formability of the Composite Bipolar Plate for Fuel Cell^[87]

Pada penelitian ini dipelajari sifat mampu alir pelat bipolar berbahan komposit grafit/MWCNT/epoksi. Hasil menunjukkan bahwa: (i) sifat mampu alir menurun seiring dengan menurunnya ukuran partikel grafit dan dengan meningkatnya konsentrasi grafit; ii) sifat mampu alir juga menurun akibat penambahan MWCNT; dan iii) produk cetakan memiliki porositas tinggi dan cacat yang tampak. Dari studi ini diketahui bahwa sifat mampu alir (*flowability*) merupakan parameter yang penting dalam desain pelat bipolar guna mendapatkan produksi yang efektif, baik pelat dalam ukuran besar maupun kecil.

A.1.5. CNTs Nanostructuring effect on the Properties of Graphite Composite Bipolar Plate^[79]

Dari penelitian ini diketahui bahwa penambahan 1 vol.% *multiwall carbon nanotubes* (MWNTs) ke dalam komposit grafit-polimer mampu meningkatkan konduktivitas listrik dan termal pelat bipolar sebesar 100%. Kekuatan tekuk juga ikut meningkat sebesar 25%. Peningkatan konduktivitas terjadi karena adanya peningkatan transfer elektron dalam pelat komposit. Konduktivitas *in-plane* tanpa MWNTs sebesar 80 S/cm dan selanjutnya meningkat menjadi 165-178 S/cm seiring penambahan MWNTs mulai dari 0,5 – 1 vol%. Pada konsentrasi 2%, nilai konduktivitas turun kembali menjadi 145 S/cm. Sedangkan nilai konduktivitas untuk *through-plane* tanpa MWNTs sebesar 8 – 10 S/cm, lalu meningkat menjadi 25 S/cm dan 30 S/cm pada penambahan 0,5 dan 1 vol.% MWNTs secara berturut-turut. Kondisi optimum diperoleh pada kadar MWNTs sebesar 1 vol.%.

A.1.6. Thermal Properties of Epoxy Based Expanded Graphite Composite for Bipolar Plate of Polymer Electrolyte Fuel Cells^[10]

Dalam studi ini dipersiapkan bakalan komposit epoksi /grafit untuk keperluan pelat bipolar PEMFC. Penelitian menemukan bahwa densitas komposit menurun seiring dengan penurunan nilai konsentrasi grafit. *Percolation threshold* terjadi pada daerah konsentrasi grafit sekitar 70 w/o. Nilai konduktivitas permukaan pelat

bipolar berkisar antara 4,5 S/cm hingga 87 S/cm dan nilai tertinggi ini diperoleh ketika hanya digunakan serbuk grafit tereksansi saja. Dari penelitian diperoleh kesimpulan bahwa peningkatan ketahanan termal dan sifat elektrik komposit diakibatkan oleh penambahan serbuk grafit tereksansi (*expanded graphite*).

A.1.7. Effect of Carbon Fillers on the Performance of a Composite Bipolar Plate for Fuel Cells^[36]

Dalam penelitian ini, pelat bipolar difabrikasi dengan menggunakan metode cetak tekan (*compression*). Bahan penyusun pelat meliputi grafit (GR), karbon hitam (CB), MWNTs, serat karbon (CF), dan serbuk resin epoksi. Konduktivitas listrik dan sifat-sifat fleksural komposit meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi pengisi dalam bentuk serat (MWNTs dan CF). Penggunaan pengisi dalam bentuk partikulat (GR dan CB) juga ikut meningkatkan nilai konduktivitas listrik, namun demikian terjadi penurunan sifat-sifat fleksural ketika konsentrasi sampai pada tingkatan tertentu.

A.1.8. Fenton/Ultra-Violet Treatment on Carbon Nanotube and Its Effects on Carbon Nanotubes Reinforced Phenol Formaldehyde Resin/Graphite Composite for Bipolar Plate^[12]

Dalam studi ini, dilakukan fabrikasi pelat bipolar komposit yang disusun dari: (i) karbon tabung nano (CNTs), diberi perlakuan dengan Fenton/UV, sebagai penguat (*reinforcement*); dan ii) resin fenol formaldehida/ grafit (PF/G) sebagai matriks. Dari karakterisasi yang dilakukan, didapatkan bahwa nilai kekutan tekuk (*bend*) dan konduktivitas listrik meningkat pada mulanya, lalu kemudian menurun. Nilai terbaik untuk konduktivitas dan kekuatan tekan secara berturut-turut sebesar: 72.5 MPa dan 185.6 S/cm terjadi pada saat perbandingan mol Fe^{2+} dan H_2O_2 sebesar 1:40.

A.1.9. Preparation and Properties of Functionalized Multiwalled Carbon Nanotubes/Polypropylene Nanocomposite Bipolar Plates for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells^[88]

Dari keseluruhan langkah-langkah penelitian, di sini disimpulkan bahwa pelat bipolar komposit yang dibuat dari MWNCNTs/polipropilena cocok untuk aplikasi

PEMFC. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan MWCNTs ke dalam sistem POA-DGEBA (poliamina/epoksi) mengakibatkan: (i) peningkatan kekuatan fleksural sebesar 59%,, yakni dari <22 MPa menjadi 29,49; 34,18; dan 31,81; danii) konduktivitas sebesar 550%, yakni dari < 200 S/cm menjadi 968, 896, dan 481 S/cm untuk sampel-sampel MWCNTs/POA400-DGEBA/PP, MWNCTs/POA2000-DGEBA/PP, dan MNWTs/PP murni secara berturut-turut. Laporan penelitian juga mengungkapkan bahwa dalam banyak penelitian perpaduan antara grafit dengan material konduktif lainnya, khususnya CNTs, merupakan metode yang efektif untuk meningkatkan konduktivitas keseluruhan pelat bipolar komposit karena terbentuk jaringan konduktif dalam arah 3D. Khusus untuk MWCNTs/POA400-DGEBA, perbaikan sifat mekanik dan listrik disebabkan karena MWCNTs terdispersi dengan lebih baik. Hal ini disebabkan karena hal-hal berikut: (i) densitas polimer dengan rantai yang diberi grafit lebih tinggi, ii) adanya pelapisan (*coating*) pada MWCNTs/POA400-DGEBA/PP yang seragam, dan iii) hambatan listrik MWCNTs/POA400-DGEBA/PP lebih rendah dari pelat bipolar grafit.

A.1.10. The Electrical Conductivity of A Composite Bipolar Plate for Fuel Cell Applications^[89]

Pelat bipolar dengan bahan komposit grafit/fenol formaldehida difabrikasi untuk keperluan sel bahan bakar. Nilai konduktivitas listrik diukur dengan metode *four-point-probe*. Sebuah model dasar dimodifikasi sedemikian rupa guna memprediksi nilai konduktivitas listrik pada penambahan kadar grafit ke dalam sistem komposit. Model dirancang sedemikian rupa sehingga sangat tergantung kepada bentuk dan juga orientasi grafit di dalam komposit. Nilai konduktivitas terbaik diperoleh pada kadar 75% grafit, yakni sebesar 165 S/cm (*in-plane*) dan 103.3 S/cm (*through plane*). Pada daerah 40-55 wt% grafit, konduktivitas meningkat sedikit lebih tinggi karena konsentrasi resin pada daerah *smearing* partikel grafit menurun. Di daerah 55-75 wt% grafit, kecepatan peningkatan konduktivitas menurun. Kemungkinan hal ini terjadi karena adanya jumlah resin yang cukup banyak pada daerah intersisi antara partikel-partikel grafit. Sedangkan pada daerah 75-85% peningkatan konduktivitas kembali menajam disebabkan

oleh adanya partikel-partikel grafit yang rapat, sehingga resin tidak memiliki cukup ruang untuk menimbulkan insulasi.

A.1.11. Stainless Steel Bipolar Plate Coated with Carbon Nanotube (CNT)/polytetrafluoroethylene (PTFE) Composite Film for Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) ^[90]

Pada penelitian ini, peneliti melakukan fabrikasi film dari komposit CNT/politetrafluoroetilena (PTFE). Sistem CNT/PTFE ini memiliki nilai konduktivitas pada kisaran 10 S/cm. Pada konsentrasi 5% CNT nilai konduktivitas diperoleh sebesar 0,1 S/cm dan meningkat 10 kali lipat pada konsentrasi 10%. Selanjutnya secara teratur nilai konduktivitas meningkat dalam orde 20% antara konsentrasi 10-100% CNT. Fenomena-fenomena tersebut erat kaitannya dengan jaringan konduktif 3D yang dibentuk oleh CNT. Pada konsentrasi 5% jaringan 3D sulit terbentuk karena konsentarsi CNT rendah. Sementara pada konsentrasi 10% CNT, konduktivitas meningkat secara signifikan, dinamakan *percolation threshold*. Nilai konduktivitas tertinggi, 12 S/cm, diperoleh pada 75% CNT. Selanjutnya, film 75% CNT/PTFE dilapiskan ke permukaan pelat bipolar PEMFC yang terbuat dari baja tahan karat (304SS). Pelapisan ini menurunkan ketahanan kontak pelat bipolar. Namun demikian, tenaga keluaran yang dihasilkan meningkat 1,6 kali lipat, yakni dari 1,7 W menjadi 2,7 W. Hal ini terjadi karena lapisan CNT/PTFE menyebabkan arus pastif baja turun dari $5 \times 10^{-5} \text{ A cm}^{-2}$ menjadi $8 \times 10^{-6} \text{ A cm}^{-2}$. Lebih jauh, hal ini ikut meningkatkan ketahanan korosi material. Baja yang terkorosi selama penggunaan PEMFC menyebabkan munculnya kontaminan dalam sistem sehingga tenaga yang keluar menurun.

A.1.12. Investigation of Elastomer Graphite Composite Material for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Bipolar Plate ^[91]

Penelitian ini dilakukan dalam rangka menemukan material alternatif pengganti grafit dan logam, yang merupakan penyusun utama pelat bipolar konvensional. Pilihan material jatuh kepada sistem komposit elastomer/grafit. Dengan sistem ini diperoleh beberapa keuntungan antara lain: penurunan berat dan sifat mampu

bentuk yang lebih baik. Dalam sistem ini matriks polimer dibuat menjadi konduktif dengan menambahkan serat grafit, nano partikel karbon hitam, dan grafit pipih (*flake*). Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa: (i) sifat mampu alir polimer menurun, ii) konduktivitas menurun jika dibanding dengan pelat bipolar grafit, dan iii) perilaku elastik tetap bisa dipertahankan.

A.1.13. Integrated Carbon Composite Bipolar Plate for Polymer-Electrolyte Membrane Fuel Cells^[92]

Hambatan listrik pelat bipolar pada PEMFCs haruslah sangat rendah sehingga jumlah listrik yang terbuang bisa ditekan. Hambatan pelat bipolar datang dari hambatan keseluruhan material itu sendiri dan juga dari hambatan kontak antarmuka dua buah pelat yang bersentuhan pada saat mengarlirkan bahan bakar dan oksigen. Hambatan kontak ini lebih besar nilainya dibanding hambatan keseluruhan material. Oleh karena itu, pelat bipolar terintegrasi (*ntegrated bipolar plate*) dengan karbonkomposit dikembangkan untuk menghilangkan hambatan kontak antar pelat-pelat bipolar. Dalam penelitian ini digunakan serat karbon dan resin epoksi. Hasil yang diperoleh meliputi: (i) hambatan total pelat bipolar dengan sistem komposit terintegrasi lebih kecil 60% dibandingkan dengan tipe konvensional; ii) kekuatan fleksural pelat terintegrasi sebesar 450 MPa, jauh melebihi yang ditargetkan yakni sebesar 59 MPa; iii) pelat komposit memiliki ketahanan termal yang stabil sampai dengan pada temperatur operasi maksimum PEMFC.

A.1.14. Effect of Carbon Fillers on Properties of Polymer Composite Bipolar Plates of Fuel Cells^[93]

Dalam rangka mengurangi berat dan biaya produksi pelat bipolar, material komposit polimer dengan beragam jenis pengisi karbon diujicobakan untuk kepentingan sel bahan bakar. Pada penelitian ini difabrikasi material komposit yang tersusun dari pengisi-pengisi CB, MWNTs, CF dalam matriks epoksi. Konduktivitas listrik dan sifat-sifat kekakuan diukur sebagai fungsi dari kandungan karbon. Nilai konduktivitas tertinggi diperoleh pada kandungan total pengisi karbon sebesar 75%. Penurunan konduktivitas disebabkan resin polimer

yang ada tidak lagi cukup untuk mengikat semua partikel-partikel pengisi yang berakibat mereka tidak cukup rapat untuk bisa menghantarkan elektron. Sedangkan kekuatan felksural tertinggi diperoleh pada kandungan total pengisi 65%. Pengisi partikulat CB dan grafit tidak meningkatkan sifat mekanis karena tidak dapat bertindak sebagai penguat berkaitan dengan bentuk partikel mereka yang kebulat-bulatan yang menurunkan luas *cross-section* sistem. MNWTs dan CF memiliki aspek rasio yang tinggi, diameter kecil, sehingga selain meningkatkan sifat kelistrikan juga meningkatkan sifat mekanis. Penelitian ini juga mencatat bahwa sistem dengan pengisi beragam (*hybrid*) menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan sistem dengan pengisi tunggal.

A.1.15. Characteristic and Preparation of Polymer/Graphite Composite Bipolar Plate for PEM Fuel Cells^[94]

Penelitian ini menginvestigasi sebuah pendekatan yang potensial untuk pengembangan sifat-sifat komposit pelat bipolar dengan cara memilih distribusi ukuran partikel grafit yang sesuai dan metode pengisian karbon hitam yang sesuai. Kondisi pemrosesan optimum untuk memproduksi pelat bipolar adalah: kandungan resin 15-20 wt%; tekanan pencetakan 10-12 MPa; temperatur curing 180°C ;distribusi ukuran partikel grafit -200/300 mesh; karbon hitam 4-5 wt%; dan karbon hitam didispersikan sejak awal ke dalam resin dengan menggunakan mesin purifikasi supersonik.

A.1.16. Effects of Molding Parameters on the Through-Plane Resistance of Injection Molded Composite Polymer Bipolar Plate^[95]

Pada penelitian ini, pelat-pelat bipolar dibuat dengan menggunakan metode cetak injeksi konvensional (CIM) dan cetak injeksi-tekan (ICM). Dua jenis material digunakan dalam penelitian. Material pertama adalah komposit polifinilen sulfida (PPS) dengan 50 wt% CF. Material kedua adalah PPS, 20 wt%CF, dan 30 wt% grafit. Hambatan tembus bidang (TPR) merupakan salah satu kriteria penting bagi pelat bipolar yang diukur dengan metode hambatan kontak. Distribusi dan orientasi CF dan grafit dipengaruhi oleh kondisi pencetakan yang berbeda dan juga berpengaruh pada pelat bipolar yang dihasilkan. Sampel-sampel kemudian

diamati dengan SEM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai TPR menurun seiring dengan meningkatnya temperatur cetakan, temperatur leleh, dan tekanan penahanan pada CIM dan ICM. Pada kondisi optimum TPR dapat diturunkan hingga 45% pada CIM dan 64% pada ICM. Penambahan 30% grafit akan menurunkan TPR hingga 88%.

A.1.17. Evaluation of Graphite Composite Bipolar Plate for PEM (Proton Exchange Membrane) Fuel Cell: Electrical, Mechanical, and Molding Properties^[96]

Pada penelitian ini komposit grafit/epoksi difabrikasi dengan cetak tekan. Sampel-sampel divariasikan berdasar rasio pencampuran, tekanan selama proses, dan temperatur. Untuk meningkatkan kekuatan mekanik, sejumlah serat karbon teranyam ditambahkan ke dalam komposit grafit/epoksi. Karakterisasi sifat-sifat permukaan dilakukan melalui uji sudut kontak dan kekasaran permukaan.

A.1.18. Influence of Expanded Graphite Particle Size on the Properties of Composite Bipolar Plates for Fuel Cell Application^[97]

Pada penelitian ini, *expanded-graphite* (EG) disintesis dari grafit alam yang berbentuk pipih dan digunakan bersama resin novolac untuk pelat bipolar komposit. Penambahan EG sebesar 10% dapat meningkatkan konduktivitas listrik hingga mencapai 100% . Meski demikian, sistem EG-resin dengan satu penguat ini tidak dapat memenuhi standard konduktivitas > 100 S/cm dan kekuatan tekuk 25 MPa yang ditargetkan oleh DOE.

A.1.19. Preparation and Properties of Carbon Nanotube/Polypropylene Nanocomposite Bipolar Plates for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells^[98]

Penelitian ini menargetkan fabrikasi pelat bipolar nanokomposit dengan berat ringan dan performa tinggi untuk aplikasi PEMFC. Pelat bipolar tipis (tebal $< 1,2$ mm) yang dihasilkan mengandung MWCNTs, serbuk grafit, dan PP, diproses dengan cara cetak tekan. Dalam penelitian ini digunakan tiga jenis PP, yakni: (i) PP kristalinitas tinggi (HC-PP), ii) PP kristalinitas menengah (MC-PP), dan PP kristalinitas rendah (LC-PP). Sampel-sampel diteliti guna mengetahui pengaruh

kristalinitas PP terhadap dispersi MWCNTs dalam matriks PP. Komposisi optimum untuk pelat bipolar asli adalah 80 wt% grafit dan 20 wt% PP. Pengamatan menunjukkan bahwa MWCNTs terdispersi secara lebih baik dalam LC-PP dibanding jenis PP lainnya. Dispersi yang baik ini akan berujung pada nilai konduktivitas, sifat mekanik, dan kestabilan termal yang lebih baik. Pada MWCNTs/LC-PP, konduktivitas listrik melampaui 100 S/cm. Konduktivitas ini bergantung kepada kontak antar material-material konduktif dalam komposit. Kekuatan fleksural MWCNTs/LC-PP 37% lebih tinggi dibanding pelat komposit aslinya. Secara keseluruhan kompatibilitas antara matriks dan pengisi adalah MWCNTs/LC-PP > MWCNTs/MC-PP > MCNWTs/HC-PP. Hali ini dapat dijelaskan bahwa pada nanokomposit LC-PP terdapat daerah nonkritisalin yang lebih banyak yang memungkinkan MWCNTs terdispersi secara lebih seragam tanpa adanya penggumpalan. Dengan demikian dispersi pada LC-PP lebih baik dibanding pada HC-PP. Penelitian ini mengkonfirmasi bahwa penambahan MWCNTs dalam LC-PP mengantarkan kepada pengembangan yang signifikan pada performa pelat bipolar nanokomposit.

A.1.20. Development and Characterization of Expandend Graphite-Based Nanocomposite as Bipolar Plate for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFCs)^[99]

Pada penelitian ini, pelat bipolar PEMFC dari nanokomposit EG/resin difabrikasi lewat metode cetak tekan. Penelitian menemukan bahwa variasi konsentrasi resin dan EG dapat meningkatkan konduktivitas listrik, sifat mekanik dan juga kerapatan udara. Hasil optimum yang melampaui target DOE untuk pelat bipolar dicapai pada konsentrasi 40-45 wt% resin. Penambahan konsetrasi karbon hitam sebanyak 5 wt% membantu meningkatkan konduktivitas listrik, namun tidak berpengaruh pada sifat-sifat yang lain. Di antara hasil karakterisasi untuk target DOE 2010, resin fenolik/55 wt% EG, dan resin fenolik/50 wt% EG/5% CB secara berturut-turut adalah: (i) kekuatan fleksural 25, 56, dan 52 MPa; dan (ii) konduktivitas listrik 100, 250, dan 285 S/cm.

A.1.21. Porous Carbon-Carbon Composite for Fuel Cells^[100]

Sel bahan bakar merupakan sumber elektrokimia yang dapat secara langsung mengubah bahan bakar menjadi arus listrik. Sel bahan bakar bergantung pada dua buah elektroda yang dipisahkan oleh sebuah elektrolit (padat/cair). Oksidasi dan reduksi terjadi pada antarmuka elektroda dan elektrolit. Pada penelitian ini dilakukan proses fabrikasi elektroda difusi gas (*gas-diffusion electrodes/ GDE*). GDE terbuat dari berbagai material serat karbon yang ringan, memiliki porositas tinggi, stabil secara kimia, dan dapat diproduksi lewat teknologi sederhana. Secara umum, GDE diturunkan dari berbagai material polimer awal yang selanjutnya diberi pemanasan, dikarbonisasi, dan digrafitisasi. Sampai pada temperatur tertentu, material serat-serat polimer tersebut akan diubah menjadi bersifat konduktif. Karakterisasi pada berbagai GDS (*gas diffusion support*) menunjukkan hasil bahwa GDS yang dibuat dari karbon fabrikasi memiliki nilai indeks konduktivitas tertinggi.

A.1.22. Effects of Bipolar Plate Material and Impurities in Reactant Gases on PEM Fuel Cell Performance^[101]

Penelitian dan pengembangan di bidang PEMFC menunjukkan bahwa penggunaan pelat bipolar logam cukup menjanjikan, namun demikian beberapa masalah seperti biaya, ketahanan korosi, hambatan kontak antarmuka (ICR) dan gas-gas pengotor harus diselesaikan terlebih dahulu. Pada penelitian ini dilakukan studi terhadap pengaruh ICR antara lapisan difusi gas (*gas-diffusion layer/ GDL*) dan berbagai material pelat bipolar terhadap daya yang dihasilkan oleh sel bahan bakar. Secara umum dilaporkan bahwa: (i) ICR antara GDL dan pelat bipolar memiliki pengaruh signifikan terhadap daya yang dihasilkan oleh sel bahan bakar; (ii) pelat bipolar logam (*aluminum-coated*) memiliki ICR yang lebih rendah dari komposit grafit dengan rasio 1: 2; (iii) ketika O₂ diganti dengan udara (~20% O₂), terjadi reduksi daya sebesar 30-40%; (iv) efisiensi pada pelat logam lebih tinggi dibandingkan pelat grafit; (v) pelat logam menunjukkan degradasi daya yang minimal selama 1000 jam operasi di bawah pembebanan siklik; dan (vi) secara keseluruhan, pelat bipolar logam menghemat hingga 24% konsumsi hidrogen dibanding pelat grafit komposit.

A.1.23. Effect of Resin Matrix Precursor on the Properties of Graphite Composite Bipolar Plate for PEM Fuel Cell^[102]

Salah satu pelat bipolar komposit mutakhir adalah pelat yang menggunakan polimer sebagai binder dan grafit sebagai penguat dan diproduksi lewat metode cetak tekan. Studi pada pengaruh berbagai resin berbeda terhadap sifat-sifat pelat bipolar menunjukkan bahwa komposit dengan resin *precursor* yang berbeda akan menghasilkan sifat fisik-mekanik yang berbeda pula. Pada penelitian ini ditinjau pengaruh resin-resin: a) epoksi, b) vinil ester, c) resole fenolik dan c) novolak fenolik, terhadap sifat dan kinerja pelat bipolar komposit resin/grafit/karbon hitam (CB). Dari penelitian ini diketahui bahwa konsentrasi optimum resin antara 30-35%; ketika porositas dibandingkan dengan densitas dan kekerasan dibandingkan dengan konduktivitas. Dalam kasus konduktivitas, kondisi optimum ada 20% CB (resin novolak), dan 25%CB (untuk resin vinil ester dan resin lainnya). Hasil penelitian menunjukkan bahwa resin novolak menghasilkan sifat mekanik dan konduktivitas listrik yang paling tinggi. Hal ini dapat dijelaskan bahwa di bawah pengamatan SEM ikatan antara serat-grafit, serat karbon hitam, dan resin novolak lebih baik dibandingkan yang lainnya. Di samping itu, resin novolak sendiri memiliki kekuatan yang bagus pada temperatur tinggi. Resin novolak direkomendasikan untuk juga digunakan pada sel bahan bakar selain PEMFC.

A.1.24. Highly Conductive Epoxy/Graphite Polymer Composite Bipolar Plates In Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells: A Dissertation^[22]

Dalam penelitian ini, komposit epoksi dengan konsentrasi pengisi karbon tinggi dibuat untuk keperluan PEMC. Komposit diperoleh lewat *solution intercalation mixing*, diikuti dengan cetak tekan dan *curing*. Karakterisasi meliputi: konduktivitas listrik, sifat mekanik dan termal, sifat rintangan gas (*gas barrier*), dan karakteristik higrotermal. Untuk tujuan ini digunakan EG dan CB. Matrik polimer diperoleh dari campuran resin epoksi aromatik (kepentingan keuletan) dan alifatik (kepentingan stabilitas kimia). Hasil karakterisasi: (i) temperatur transisi gelas tinggi ($T_g \sim 180^\circ\text{C}$), (ii) temperatur degradasi tinggi ($T_2 \sim 415^\circ\text{C}$), (iii) konduktivitas *in-plane* berkisar antara 200-500 S/cm dengan CB sekurang-

kurangnya 50 wt%, (iv) sifat mekanik baik, dan (v) konduktivitas termal sangat baik yakni sebesar 50W/m/K. Sifat-sifat komposit tersebut tidak berubah ketika diekpos pada lingkungan air mendidih, larutan asam sulfur, dan larutan hidrogen peroksida. Ini menunjukkan bahwa komposit memiliki ketahanan yang cukup lama di bawah kondisi operasi PEMFC.

A.1.25. Material, Design, and Modelling for Bipolar Plate in PEMFC: A Dissertation^[34]

Penelitian ini fokus pada material, desain, dan permodelan pelat bipolar dalam PEMFC. Material alternatif yang digunakan adalah busa logam guna menggantikan posisi pelat grafit. Dalam rangka itu, dua buah PEMFC diproduksi dengan desain pelat bipolar tipe SS-316 Multi-Parallel Flow-Field (MPFF). Kondisi operasi seperti dimensi kanal, desain daerah aliran, dan permeabilitas daerah aliran mempengaruhi optimasi daerah aliran gas pada PEMFC. Untuk keperluan inilah ditetapkan penggunaan busa logam. Tiga material digunakan dalam penelitian ini, yakni busa logam Ni-Cr (50 PPI, pori per inci), busa logam SS-316, dan karbon *cloth*. Hasil karakterisasi dibandingkan dengan konsep kanal pada MPFF konvensional. Performa tertinggi ada pada Ni-Cr, diikuti secara berturut-turut oleh SS-316, MPFF konvensional, dan karbon *cloth*. Permeabilitas yang rendah menghasilkan jalur aliran gas yang lebih banyak sehingga berujung pada meningkatnya penurunan tekanan yang mempertinggi kinerja PEMFC.

A.2. Paten-Paten Terkait

A.2.1. US 7,871,737 B2 2011^[103]

Judul : Metallic Bipolar Plate For Fuel Cell and Fuel Cell Bipolar Plate Using Same, and Fabrication Method of Same

Paten ini berisi tentang komposit logam untuk sel bahan bakar, mencakup: inti dari logam; *cladded layers* dari logam tahan karat yang menutupi kedua permukaan inti; lubang tembusan melalui inti dan *cladded layer*. Komposit logam yang dipatenkan memiliki umur pakai yang panjang untuk keperluan komponen

sel bahan bakar seperti pelat bipolar. Selain itu, material juga memiliki fleksibilitas yang lebih tinggi.

A.2.2. US 7,887,927 B2 2011^[104]

Judul : Highly Conductive, Multi-Layer Composite Precursor Composition to Fuel Cell Flow Field Plate or Bipolar Plate

Penemuan ini mendapatkan sebuah komposisi komposit multi-lapisan yang dapat dicetak, yang merupakan bahan untuk keperluan pelat bipolar berbahan dasar komposit konduktif. Komposisi mencakup sebuah lembaran konduktif dan sebuah lapisan campuran resin dan pengisi-pensifi konduktif, dimana: a) setiap lembaran konduktif dipadankan dengan sekurang-kurangnya satu lapisan resin-pengisi; b) setidaknya satu lembaran konduktif mengandung grafit yang lentur; dan c) setidaknya satu lapisan resin-pengisi mengandung resin termoset dan pengisi konduktif sedemikian rupa sehingga konduktivitas listrik tidak kurang dari 100 S/cm dan konduktivitas pada areal ketebalan tidak kurang dari 200 S/cm².

A.2.3. US 7,910,040 B2 2011^[105]

Judul : Manufacturing Process of Conductive Polymer Composite Bipolar Plate for Fuel Cell Having High Gas Permeability-Resistance and Heat-Resistance

Sebuah pelat bipolar komposit untuk PEMFC diproduksi dengan cara: a) mensenyawakan vinil ester dengan serbuk grafit untuk membentuk *bulk molding compound* (BMC), kadar grafit 60-95 wt% dari berat total vinil ester/grafit, serat karbon 1-20 wt%, *modified organo clay* atau *noble metal plated modified organo clay* 0,5-10 wt% dan satu atau lebih pengisi konduktif dipilih dari: CNT 0,1-5 wt%; *nickel plated carbon fiber* 0,5-10 wt%; *nickel plated graphite* 2,5-40 wt%; dan karbon hitam 2-30 wt% dari berat resin, ditambahkan selama proses pensenyawaan; b) pencetakan BMC dari tahap a) menjadi pelat bipolar menjadi bentuk yang diinginkan pada suhu 80-200°C dan 500-4000 psi.

A.2.4. US 7,914,948 B2 2011^[106]

Judul : Metallic Bipolar Plate for Fuel Cell and Method for Forming Surface Layer of The Same

Penelitian ini menemukan sebuah pelat bipolar logam untuk sel bahan bakar dan sebuah metode untuk membentuk lapisan permukaan pada same, dimana lapisan permukaan dibentuk dengan proses nitridasi plasma yang dilakukan pada permukaan sebuah baja tahan karat sebagai material dasar guna membentuk lapisan yang mengandung nitrogen, dan oksidasi serta reduksi dilakukan pada lapisan nitrogen tersebut untuk membentuk lapisan oksidasi Fe_3O_4 , dengan cara ini konduktivitas dan ketahanan korosi meningkat.

A.2.5. US 7,816,416 B2 2010^[107]

Judul : Polymer Membrane Fuel for Fuel Cell, Method of Preparing the Same, Membrane-Electrode Assembly Including the Same, and Fuel Cell System Including the Same

Penemuan ini berhubungan dengan: PEMFC, sebuah metode untuk produksi membran elektrolit polimer, sebuah rangkaian elektroda-membran untuk sel bahan bakar mencakup membran elektrolit polimer, dan sistem sel bahan bakar yang mencakup rangkaian membran-elektroda. Membran elektrolit polimer meliputi membran polimer proton-konduktif yang mencakup sebuah *micelle* dalam sebuah saluran hidrofobik. *Micell* tersebut mengandung polimer berbasis vinil yang diperoleh lewat polimerisasi monomer vinil dan surfaktan anionik yang mengelilingi vinil polimer.

A.2.6. US 7,820,336 2010^[108]

Judul : Fuel Cell, Bipolar Plate, and Fuel Cell

Sebuah pelat bipolar sel bahan bakar yang memiliki *front surface* dan *rear surface* dengan arah saling berlawanan, dan juga bagian *flash* dan *receding*. Bagian *flash* diletakkan pada *front surface* di bagian keliling pelat bipolar dan diproyeksikan pada arah menyilangi terhadap permukaan. Bagian *receding* diletakkan pada *rear surface* pada bagian keliling pelat bipolar dalam geometri yang pas dengan bagian *flash*.

A.2.7. US 7,850,873 B2 2010^[109]

Judul : Polymer Electrolyte and Fuel Cell Employing the Same

Elektrolit polimer yang dapat digunakan dalam sel bahan bakar mencakup *sulfonated polyether ketone ketone* dan *cross-linking agent*.

A.2.8. US 7,510,678 B2 2009^[110]

Judul : Composite Material for Bipolar Plate

Material komposit dimaksud terdiri dari matriks *polybenzoxazine* dan pengisi karbon yang konduktif. Penemuan juga menemukan metode polimerisasi monomer dengan reduksi volume kurang dari 5%, 3%, atau 1% setelah polimerisasi. Polimer yang diperoleh dalam penemuan ini memiliki mampu-kerja yang baik karena selama polimerisasi hanya terjadi sedikit perubahan volume. Di samping itu, polimer juga memiliki sifat mekanik dan kimia yang baik sehingga polimer dapat diproses dengan biaya rendah.

A.2.9. US 7,575,826 B2 2009^[111]

Judul : Fuel Cell with Metal Alloy Contacts that Form Passivating Conductive Oxide Surface

Ketika teroksidasi, paduan metal yang ditemukan akan membentuk lapisan oksidan dengan konduktivitas tinggi. Komposisi paduan seperti, Ti-Nb, Ti-Ta, La-Sr-Cr, dan La-Sr-Co diketahui membentuk lapisan pasif yang sangat konduktif. Paduan seperti ini berguna dalam peralatan-peralatan listrik. Elemen yang dibentuk oleh paduan ketika mengalami oksidasi dan kontak dengan permukaan lain akan menghasilkan lapisan yang sangat konduktif, sehingga dapat mempertahankan konduktivitas listrik elemen. Lapisan oksida dapat dibentuk langsung setelah perangkaian atau secara terpisah selama proses manufaktur. Logam yang digunakan untuk keperluan ini beragam.

A.2.10. US 7,629,070 B2 2009^[112]

Judul : Bipolar Plate for PEM Fuel Cells

Pelat bipolar dibentuk dari polimer *blend* yang ditambahkan dengan pengisi karbon dan memiliki setidaknya dua campuran polimer yang *nonmiscible*, dibedakan berdasarkan fakta bahwa setidaknya dua polimer *blend* membentuk struktur yang kontinu dan pengisi karbon lebih tinggi pada salah satu polimer,

atau campuran (blend) polimer dimana pengisi karbon dengan konsentrasi lebih tinggi membentuk matrik yang konduktif dimana setidaknya satu polimer blend dapat tersisipi.

A.2.11. US 7,718,299 B2 2008^[113]

Judul : Fuel Cell Bipolar Plate and Fuel Cell with Improved Fluid Distribution Employing Such Plates

Sebuah plate bipolar dengan lubang tembus yang diposisikan pada ujung-ujung sisinya untuk sirkulasi fluida sebuah anoda kompartemen yang diperpanjang pada salah satu dari kedua sisi utamanya, dan sebuah katoda kompartemen yang diperpanjang pada salah satu dari kedua sisi utamanya.

A.2.12. US 7,090,793 B2 2006^[114]

Judul : Preparation of Fuel Cell Composite Bipolar Plate

Sebuah pelat bipolar komposit untuk PEMFC difabrikasi dengan cara: a) menyiapkan material BMC yang mengandung vinil ester resin dan serbuk grafit, kandungan serbuk grafit berkisar 60-80 wt% dari total berat campuran; b) mencetak material BMC menjadi pelat bipolar sesuai bentuk yang diharapkan pada 800-200°C dan 500-4000 psi, dimana ukuran serbuk grafit 40-80 mesh.

A.2.13. US 7,128,996 B2 2006^[115]

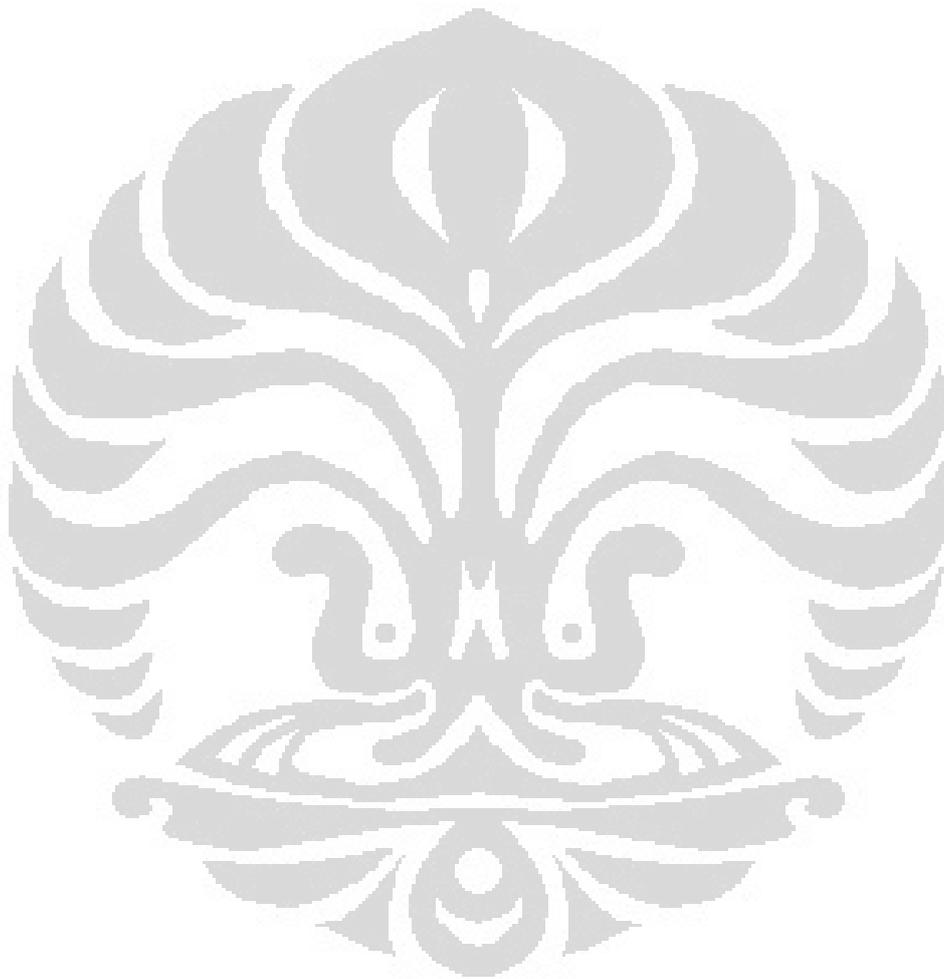
Judul : Separator for Solid Polymer Fuel Cells and Production Process thereof

Penemuan berupa suatu pemisat padat untuk sel bahan bakar polimer yang dicetak dari suatu resin termoplastik, karbon hitam dengan densitas sekurangnya 0,3 g/ml dan DBP *oil absorption* mencapai 150 ml/100g dan pengisi konduktif yang bersifat optional dengan resistivitas volume kurang dari 1 Ω .cm. Penemuan ini juga mencakup proses produksi sel padatan pemisah sel bahan bakar polimer dengan cara cetak injeksi.

A.2.14. US 7,033,693 B2 2003^[116]

Judul : Heterogeneous Composite Bipolar Plate of A Fuel Cell

Pelat bipolar dimaksud terdiri dari satu buah badan, dua daerah aliran, dan serat konduktif. Badan memiliki bagian tengah dan bagian peripheral yang mengelilingi bagian tengahnya. Daerah aliran diletakkan pada kedua sisi bagian tengah badan. Serat konduktif diposisikan di bagian tengah dan menembus badan pelat.



LAMPIRAN B
STANDARD APLIKASI SEL BAHAN BAKAR

Tabel B.1. Standard aplikasi sel bahan bakar.

Stationary FC Application	Hydrogen & Fuel Cell Vehicle Application
Fuel Cell Power Systems - System Design/Testing	Vehicles - System Design/Testing Vehicles - System Design/Testing
ANSI/CSA America FC1 Fuel Cell Power Systems (United States)	Japanese Government Regulations Hydrogen Fuel Cell Vehicles (Japan)
CEN/CENELEC EN 50465 Fuel Cell Gas Heating Appliances (European Union)	GB/T 23645-2009 Test method of fuel cell power system for passenger car (China)
IEC 62282-3-1 Stationary Fuel Cell Systems - Safety (International)	Vehicles - Safety Vehicles - Safety
EN 62282-3-1 Stationary Fuel Cell Systems - Safety (European Union)	SAE J1766 Recommended Practice for Electric and Hybrid Electric Vehicle Battery Systems Crash Integrity Testing (United States & Other Locales)
JIS C 8801 General Rules for Phosphoric Acid Fuel Cell Power Generating System (Japan)	SAE J2578 Recommended Practice for General Fuel Cell Vehicle Safety (United States & Other Locales)
DVGW VP119 Preliminary Basic Rules for Testing Fuel Cell Gas Appliances 70 kW (Germany)	ISO 6469-1 Electrically propelled road vehicles – Safety specifications – Part 1: On-board rechargeable energy storage systems (RESS) (International)
JIS C 8821 General Rules for Small Polymer Electrolyte Fuel Cell Power Systems (Japan)	ISO 6469-2 Electrically propelled road vehicles – Safety specifications – Part 2: Vehicle operational safety means and protection against failures (International)
JIS C 8822 General Safety Code for Small Polymer Electrolyte Fuel Cell Systems (Japan)	ISO 23273-1 Fuel Cell Road Vehicle - Safety Specification, Part 1: Vehicle functional safety (International)
JIS C 8823 Testing Methods for Small Polymer Electrolyte Fuel Cell Power Systems (Japan)	ISO 23273-2 Fuel Cell Road Vehicle - Safety Specification, Part 2: Protection against hydrogen hazards for vehicles fuelled with compressed hydrogen (International)
GB/Z 21743-2008 Stationary proton exchange membrane fuel cell power system (China)	ISO 23273-3 Fuel Cell Road Vehicles - Safety Specification, Part 3: Protection of persons against electric shock (International)
Fuel Cell Power Systems - Nameplates	KS R ISO 23273-1 Fuel cell road vehicles- Safety specification - Part 1: Vehicle functional safety (Korea)
JIS C 8803 Indication of Phosphoric Fuel Cell Power Facility (Japan)	KS R ISO 23273-2 Fuel cell road vehicles- Safety specification - Part 2: Protection against hydrogen hazard for vehicles fuelled with compressed hydrogen (Korea)
JIS C 8811 Indication of Polymer Electrolyte Fuel Cell Power Facility (Japan)	KS R ISO 23273-3 Fuel cell road vehicles- Safety specification - Part 3: Protection of persons against electric shock (Korea)

A.1. (sambungan)

Fuel Cell Power Systems - Performance - efficiency, emissions, durability	Vehicles - Performance - efficiency, emissions, durability Vehicles - Performance - efficiency, emissions, durability
ASME PTC 50 Performance Test Code for Fuel Cell Power Systems Performance (US and Other Locales)	SAE J2572 Recommended Practice for Measuring the Exhaust Emissions, Energy Consumption and Range of Fuel Cell Powered Electric Vehicles Using Compressed Hydrogen (United States & Other Locales)
IEC 62282-3-2 Test Method for the Performance of Stationary Fuel Cell Power Plants (International)	ISO 23828:2008 Fuel Cell Road Vehicle-Energy Consumption Measurement Part 1: Vehicles fuelled with compressed hydrogen (International)
EN 62282-3-2:2006 Test Method for the Performance of Stationary Fuel Cell Power Plants (European Union)	ISO/TR 11954 Fuel Cell Road Vehicles- Road Maximum Speed Measurement (International)
JIS TR C 0003 Test Methods for Performance of Phosphoric Acid Fuel Cell Power Facility (Japan)	Vehicles - Terminology Vehicles - Terminology
JIS TR C 0004 Test Method for Environment and Maintenance of Phosphoric Acid Fuel Cell (Japan)	SAE J2754 Fuel Cell Electric Vehicle Terminology (United States & Other Locales)
JIS C 8802 Test Method for Durability of Phosphoric Acid Fuel Cell Power Facility (Japan)	SAE J2760 - TIR Pressure Terminology Used in Fuel Cells and Other Hydrogen Vehicle Applications (United States & Other Locales)
State of California Regulations Emission Regulations	Vehicles - Fuel Systems Vehicles - Fuel Systems
JIS C 8825 Testing Methods for EMC of Small Polymer Electrolyte Fuel Cell Power Systems (electromagnetic compatibility) (Japan)	NFPA 52 Vehicle Fuel System Code (United States)
JIS C 8824 Testing Methods for Environment of EMC for Polymer Electrolyte Fuel Cell Systems (Japan)	SAE J2579 Recommended Practice for Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles (United States & Other Locales)
Fuel Cell Power Systems - Subsystems - Fuel Cell Modules	CGA Publication PS31 Cleanliness for PEM Hydrogen Piping / Components (United States)
CSA International Component Acceptance Service No. 33 Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stacks (United States & Canada)	EC No. 79/2009 Type-approval of hydrogen-powered motor vehicles (European Union)
IEC 62282-2 Fuel Cell Modules (International)	Fuel Tanks Fuel Tanks
EN 62282-2:2004 Fuel Cell Modules (European Union)	ISO 13985 Liquid Hydrogen - Land Vehicle Fuel Tanks (International)
CAN/CSA C22.2 No. 62282-2:07 Fuel Cell Technologies-Part 2: Fuel Cell Modules (Canada)	ISO TC197 Working Group 6 / ISO/TS 15869 Gaseous Hydrogen Blends & Hydrogen Fuels: Land Vehicle Fuel Tanks (International)
JIS C 8831 Safety Evaluation Test for Stationary Polymer Electrolyte Fuel Cell Stack (Japan)	CSA America HPRD1 Basic Requirements for Pressure Relief Devices for Compressed Hydrogen Vehicle Fuel Containers (United States)

A.1. (sambungan)

JIS C 8832 Performance Test for Stationary Polymer Electrolyte Fuel Cell Stack (Japan)	CGA Publication C6.4 Methods for External Visual Inspection of Natural Gas Vehicle (NGV) and Hydrogen Vehicle (HV) Fuel Containers and Their Installation (United States)
GB/T 20042.2-2008 Proton Exchange Membrane Stacks (China)	EC No.79/2009 Type-approval of hydrogen-powered motor vehicles (European Union)
KS C IEC 62282-2 Fuel Cell Technologies - Part 2 : Fuel Cell Modules (Korea)	KS B ISO 13985 Liquid hydrogen - Land vehicle fuel tanks (Korea)
Fuel Cell Power Systems - Subsystems - Fuel Cell Modules - Subscale Testing	Refueling / Dispensing Connections Refueling / Dispensing Connections
GB/T 20042.3-2009 Proton exchange membrane fuel cell - Part 3: Test method for proton exchange membrane (China)	SAE J2600 Compressed Hydrogen Vehicle Fueling Connection Devices (United States & Other Locales)
GB/T 20042.4-2009 Proton exchange membrane fuel cell - Part 4 : Test method for electrocatalysis (China)	SAE J2601 – TIR Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles (United States & Other Locales)
GB/T 20042.5-2009 Proton exchange membrane fuel cell - Part 5 : Test method for membrane electrode assembly (China)	ISO 17268 Compressed Hydrogen Surface Vehicle Refueling Connection Devices (International)
Working Group #11 / IEC 62282-7-1 Single Cell Test Method for Polymer Electrolyte Fuel Cells (International)	SAE J2799 - TIR 70 MPa Compressed Hydrogen Surface Vehicle Refueling Connection Device & Optional Vehicle to Station Communication (United States & Other Locales)
Fuel Cell Power Systems - Subsystems - Inverters	EC No.79/2009 Type-approval of hydrogen-powered motor vehicles (European Union)
UL 1741 Standard for Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use with Distributed Energy Resources (US and Other Locales)	KS B ISO 13984 Liquid hydrogen - Land vehicle fueling system interface (Korea)
JIS C 8826 Testing Methods of Power Conditioner for Grid Interconnected Small Polymer Electrolyte Fuel Cell Systems (Japan)	KS B ISO 17268 Compressed hydrogen surface vehicle refueling connection devices (Korea)

Sumber: www.fuelcellstandards.com ^[17]

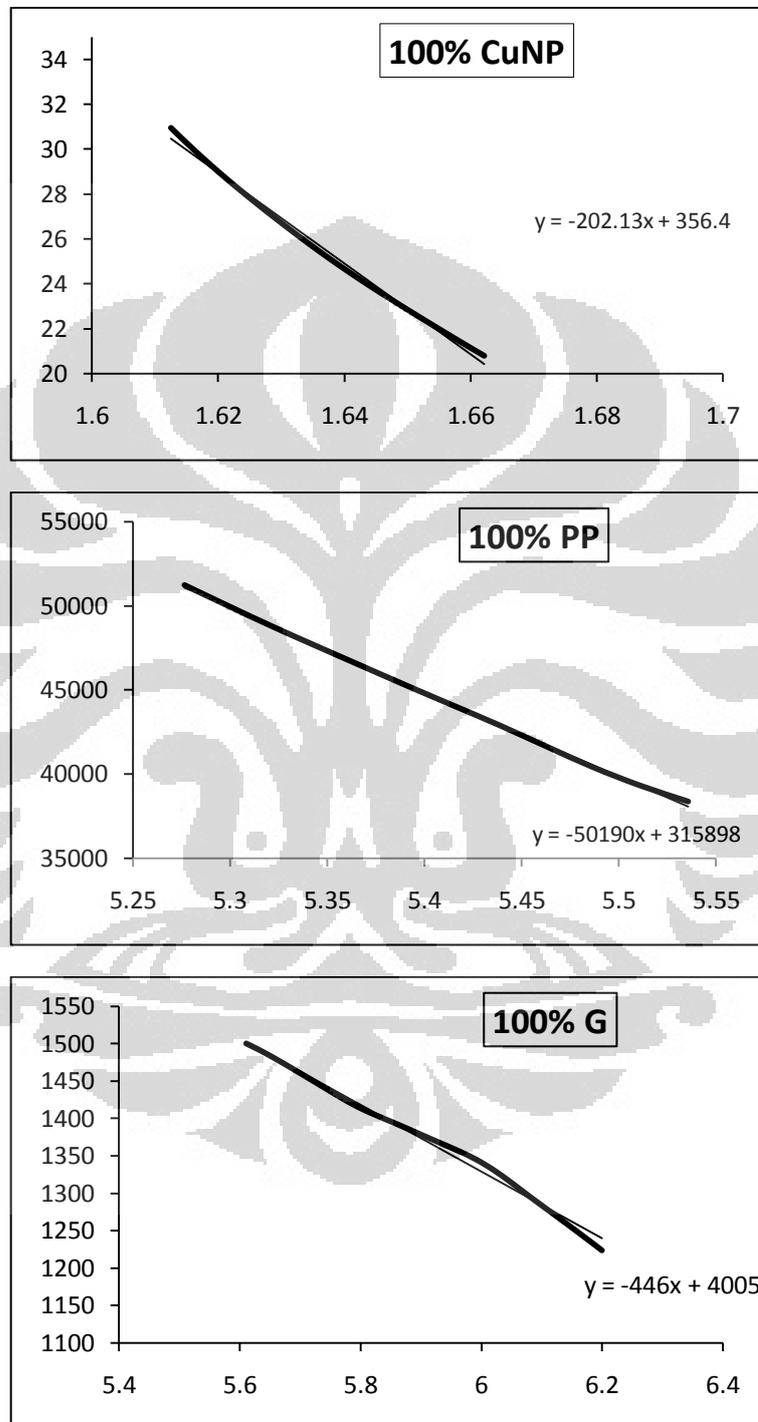
LAMPIRAN C

MATERIAL SAFETY DATA SHEET PP HI35HO

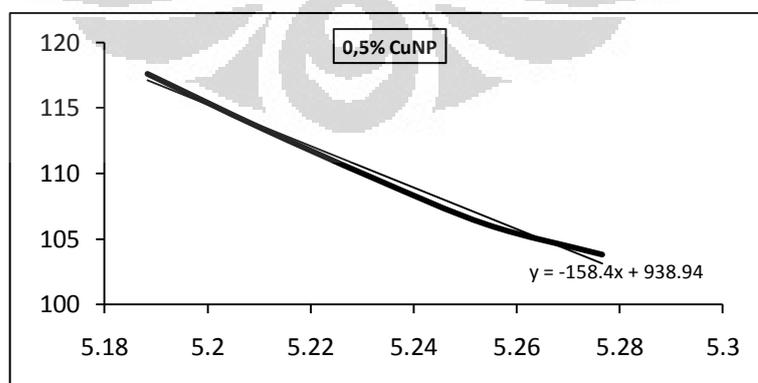
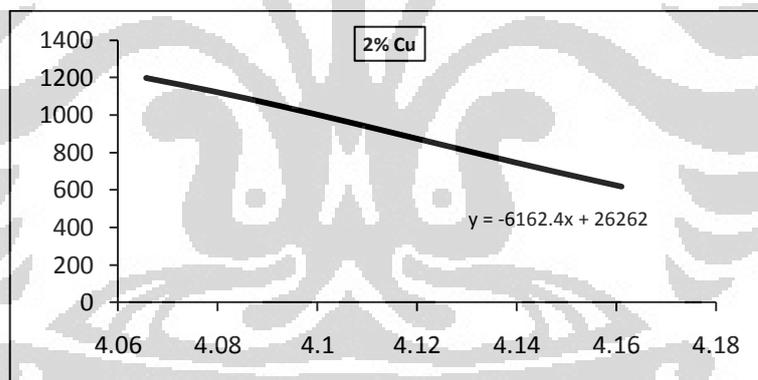
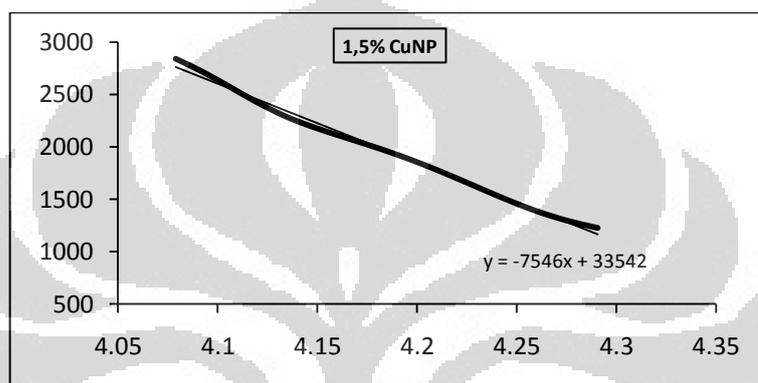
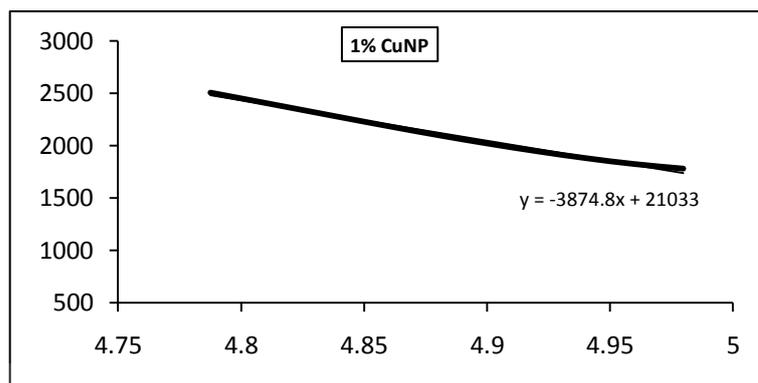
	PT. CHANDRA ASRI PETROCHEMICAL TBK <small>GMS ISO 9001 : 2004 EMS ISO 14001 : 2000</small>			
MATERIAL SAFETY DATA SHEET				
CAP – PP – MSDS – HI35HO – 007			PAGE : 1 / 2	
PROTECTIVE CLOTHING (PICTOGRAM) 	ACUTE HEALTH  0	FIRE  1	REACTIVITY  0 <small>LEAST = 0 HIGH = 3</small>	HAZARD RATING <small>SLIGHT = 1 MODERATE = 2 EXTREME = 4</small>
<small>* FOR ACUTE CHRONIC HEALTH EFFECT REFER TO THE DISCUSSION IN SECTION 3</small>				
SECTION 1		: SUBSTANCE IDENTITY & COMPANY CONTACT INFORMATION		
PRODUCT/MATERIAL : POLYPROPYLENE HOMOPOLYMER RESIN INJECTION GRADE PRODUCT GRADE : TRILENE HI35HO CHEMICAL MOLECULAR FORMULA : (C ₃ H ₆) _n CHEMICAL NAME : POLYPROPYLENE CHEMICAL FAMILY : POLYOLEFIN		MANUFACTURER : PT. CHANDRA ASRI PETROCHEMICAL TBK (CAP) ADDRESS : JL. RAYA ANYER Km.123 - CIWANDAN - CILEGON - WEST JAVA - INDONESIA, 42447 PHONE : +62 21 530 7950 FAX : +62 21 530 8930		
SECTION 2		: HAZARDS IDENTIFICATION		
HAZARDOUS COMPONENTS		: NONE		
SECTION 3		: CHEMICAL COMPOSITIONS & DATA ON COMPONENTS		
NO.	COMPOSITION	GRADE: TRILENE HI35HO	CAS-NUMBER	
P	POLYPROPYLENE HOMOPOLYMER			
1	POLYPROPYLENE HOMOPOLYMER		9003-07-0	
2	MINOR ADDITIVES		PERCENT 100 > 99 < 1	
SECTION 4		: FIRST AID MEASURES		
<small>* THE HEALTH EFFECTS BELOW ARE BASED UPON COMPONENT HEALTH EFFECTS CONSISTENT WITH REQUIREMENT UNDER OSHA HAZARD COMMUNICATION (29 CFR 1910.1200)</small>				
EYE CONTACT	: IF MOLTEN MATERIAL CONTACTS THE EYE, FLUSH IMMEDIATELY WITH PLENTY OF WATER. GET MEDICAL ATTENTION IMMEDIATELY IF DISCOMFORT PERSISTS.			
SKIN CONTACT	: IF MOLTEN MATERIAL CONTACTS THE SKIN, COOL AS QUICKLY AS POSSIBLE. DO NOT ATTEMPT TO PEEL THE MATERIAL FROM SKIN. GET MEDICAL ATTENTION.			
INHALATION	: IF SYMPTOMATIC, MOVE TO FRESH AIR. GET MEDICAL ATTENTION IF SYMPTOMS PERSIST			
INGESTION	: MATERIAL IS NOT EXPECTED TO BE ABSORBED FROM THE GASTROINTESTINAL TRACT SO THAT INDUCTION OF VOMITTING SHOULD NOT BE NECESSARY			
NOTE TO PHYSICIANS	: BURNS SHOULD BE TREATED AS THERMAL BURNS. THE MATERIAL WILL COME OFF AS HEALING OCCURS; THEREFORE, IMMEDIATE REMOVAL FROM THE SKIN IS NOT NECESSARY. THERE IS NO SPECIFIC ANTIDOTE. TREAT SYMPTOMATICALLY.			
SECTION 5		: FIRE-FIGHTING MEASURES		
FLASH POINT AND METHOD		: NOT APPLICABLE		
FLAMMABLE LIMITS / % VOLUME IN AIR		: NOT APPLICABLE		
EXTINGUISHING MEDIA		: USE WATER SPRAY, CARBON DIOXIDE, DRY CHEMICAL, ALCOHOL-TYPE OR UNIVERSAL-TYPE FOAMS APPLIED BY MANUFACTURER'S RECOMMENDED TECHNIQUE		
EXTINGUISHING MEDIA		: USE WATER SPRAY, CARBON DIOXIDE, DRY CHEMICAL, ALCOHOL-TYPE OR UNIVERSAL-TYPE FOAMS APPLIED BY MANUFACTURER'S RECOMMENDED TECHNIQUE		
FIRE FIGHTING PROCEDURES AND PRECAUTION		: MATERIAL WILL NOT BURN UNLESS PRE-HEATED. DO NOT ENTER CONFINED FIRE SPACE WITHOUT FULL BUNKER GEAR (HELMET WITH FACE SHIELD, BUNKER COATS, GLOVES AND RUBBER BOOTS). INCLUDING A POSITIVE PRESSURE NIOSH APPROVED SELF-CONTAINED BREATHING APPARATUS. COOL FIRE EXPOSED CONTAINERS WITH WATER.		
UNUSUAL FIRE AND EXPLOSION HAZARDS		: TREAT AS A SOLID THAT CAN BURN. MOLDED PARTS GENERALLY BURN SLOWLY WITH A LOW SMOKE DENSITY AND FLAMING DRIPS. UNDER CERTAIN CONDITIONS CAN BURN WITH A HIGH SMOKE DENSITY .		
SECTION 6		: ACCIDENTAL RELEASE MEASURES		
SMALL SPILL & LEAK		: PELLETS ON THE FLOOR COULD PRESENT A SERIOUS SLIPPING PROBLEM. EXERCISE GOOD HOUSEKEEPING TO AVOID THIS HAZARD: SWEEP, SHOVEL OR VACUUM MATERIAL INTO CLEAN CONTAINERS.		
LARGE SPILL & LEAK		: USE A SHOVEL TO PUT THE MATERIAL INTO A CONVENIENT WASTE DISPOSAL CONTAINER. DO NOT ALLOW ANY POTENTIALLY CONTAMINATED WATER WITH PELLETS TO ENTER ANY WATERWAY, SEWER OR DRAIN.		
SECTION 7		: HANDLING & STORAGE		
PERSONAL PRECAUTIONARY MEASURES		: AVOID CONTACT WITH MOLTEN MATERIAL		
HANDLING		: MAINTAIN GOOD HOUSEKEEPING. KEEP AWAY FROM HEAT, SPARKS, OPEN FLAME OR ANY IGNITION SOURCE. USE WITH ADEQUATE VENTILATION. AFTER HANDLING, ALWAYS WASH HANDS THOROUGHLY WITH SOAP AND WATER. SPILLED PELLETS MAY CREATE A SLIPPING HAZARD. ELECTROSTATIC CHARGE MAY BUILD UP DURING HANDLING. GROUNDING OF EQUIPMENT IS RECOMMENDED.		
STORAGE		: STORE IN A DRY PLACE WITH ADEQUATE VENTILATION AND AWAY FROM DIRECT SUNLIGHT, EXCESSIVE HEAT AND STRONG OXIDIZERS. KEEP PACKAGING (CONTAINER) CLOSED TO PREVENT CONTAMINATION.		
SECTION 8		: EXPOSURE CONTROLS & PERSONAL PROTECTION		
VENTILATION		: ALTHOUGH GENERAL ROOM VENTILATION SHOULD BE ADEQUATE IN MOST APPLICATIONS, LOCAL EXHAUST VENTILATION IS RECOMMENDED FOR CONTROL OF AIRBORNE DUST, FUMES AND VAPORS, PARTICULARLY IN CONFINED AREAS.		
RESPIRATORY PROTECTION		: USE NIOSH APPROVED RESPIRATOR IF UNABLE TO CONTROL AIRBORNE DUST, FUMES AND VAPORS		
EYE PROTECTION		: WEAR EYE PROTECTION (SAFETY GLASSES, GOGGLES, FACESHIELDS) WHEN PROCESSING.		
SKIN & BODY PROTECTION		: WEAR CHEMICAL-RESISTANT GLOVES, HEAT PROTECTIVE GLOVES AND PROTECTIVE CLOTHING AS WELL AS A FACESHIELD.		
OTHER PERSONAL PROTECTION		: USE SAFETY NON-SLIP SHOES IN AREA WHERE SPILLS OR LEAKS OCCUR.		
CONTINUED ON NEXT PAGE				

CAP – PP – MSDS – H35HO – 007		PRODUCT NAME : POLYPROPYLENE HOMOPOLYMER RESIN INJECTION GRADE		PAGE : 2 / 2
SECTION 9 : PHYSICAL & CHEMICAL PROPERTIES				
BOILING POINT (°C)	MELT FLOW RATE _{Esp/2,4} (g/10min)	SPECIFIC GRAVITY (H2O=1)	VAPOR PRESSURE (mmHg)	
NOT APPLICABLE	35	<1	NOT APPLICABLE	
MELTING POINT (°C)	DENSITY (g/cm ³)	SOLUBILITY (IN WATER)	VAPOR DENSITY (AIR = 1)	
157-170	0.903	INSOLUBLE	NOT APPLICABLE	
EVAPORATION RATE (N-BUTYL ACETATE = 1)	: NOT APPLICABLE			
APPEARANCE AND ODOR	: 3mm Ø SOLID, WHITISH IN COLOR AND ESSENTIALLY ODORLESS PELLET			
FLASH POINT	: NOT APPLICABLE, COMBUSTIBLE SOLID			
SECTION 10 : STABILITY & REACTIVITY				
STABILITY	: STABLE UNDER NORMAL OPERATING CONDITIONS OF STORAGE, HANDLING AND USE.			
HAZARDOUS POLYMERIZATION	: NOT LIKELY TO OCCUR UNDER NORMAL OPERATING CONDITIONS OF STORAGE, HANDLING AND USE.			
CONDITIONS AND MATERIALS TO AVOID	: STRONG OXIDIZING AGENTS, TEMPERATURE OVER 300°C, SPARKS AND OPEN FLAME.			
HAZARDOUS DECOMPOSITION PRODUCTS	: THERMAL DECOMPOSITION PRODUCTS ARE HIGHLY DEPENDENT ON THE COMBUSTION CONDITIONS. A COMPLEX MIXTURE OF AIRBORNE SOLID, LIQUID PARTICULATES AND GASES WILL EVOLVED WHEN THIS MATERIAL UNDERGOES PYROLYSIS OR COMBUSTION. CARBON MONOXIDE AND UNIDENTIFIED ORGANIC COMPOUNDS MAY BE FORMED UPON COMBUSTION.			
SECTION 11 : TOXICOLOGICAL INFORMATION				
MATERIAL IS CONSIDERED ESSENTIALLY INERT, NON-TOXIC AND PRACTICALLY NOT HARMFUL AS WELL AS NOT HAZARDOUS SUBSTANCES UNDER RoHS REGULATION. EXPOSURES TO HIGH LEVELS OF DUST OR HEATED FUMES MAY CAUSE IRRITATION.				
SECTION 12 : ECOLOGICAL INFORMATION				
ECOTOXICITY	: MATERIAL IS NOT EXPECTED TO BE HARMFUL TO AQUATIC ORGANISMS.			
ENVIRONMENTAL FATE	: MATERIAL IS NOT VOLATILE, INSOLUBLE IN WATER, AND RESISTANT TO BIODEGRADATION.			
SECTION 13 : DISPOSAL CONSIDERATIONS				
WASTE DISPOSAL	: PLACE IN AN APPROPRIATE DISPOSAL FACILITY IN COMPLIANCE WITH LOCAL REGULATIONS.			
SECTION 14 : TRANSPORT INFORMATION				
TRANSPORTATION CLASSIFICATION	: NOT CONTROLLED UNDER DOT (UNITED STATES), TDG (CANADA), ADR (EUROPE), IMDG, AND IATA.			
SECTION 15 : REGULATIONS				
THE COMPONENTS OF THIS PRODUCT ARE LISTED ON THE EPA/TSCA INVENTORY OF CHEMICAL SUBSTANCES.				
SECTION 16 : OTHER INFORMATION				
ABBREVIATIONS THAT MAY HAVE BEEN USED IN THIS DOCUMENT:				
	ACGIH	AMERICAN CONFERENCE of GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS		
	DOT	DEPARTMENT OF TRANSPORTATION		
	NIOSH	NATIONAL INSTITUTE for OCCUPATIONAL SAFETY & HEALTH		
	OSHA	OCCUPATIONAL SAFETY & HEALTH ADMINISTRATION		
	RoHS	RESTRICTION of HAZARDOUS SUBSTANCES		
THE INFORMATION EXPRESSED HEREIN ARE THOSE OF QUALIFIED CURRENT KNOWLEDGE AND EXPERIENCE ANT THAT THE INFORMATION IS SUFFICIENT OF ALL CASES. USERS SHOULD CONSIDER THE DATA AS A SUPPLEMENT TO OTHER INFORMATION AND SHOULD MAKE INDEPENDENT DETERMINATION OF ITS SUITABILITY, THEIR EMPLOYEES AND CUSTOMERS, AND OF THE ENVIRONMENTAL PROTECTION TO ASSURE PROPER USE AND DISPOSAL OF THE MATERIAL. RESPONSIBILITY FOR USAGE, STORAGE, HANDLING AND DISPOSAL OF THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN, WHETHER ALONE, OR IN COMBINATION WITH ANY OTHER SUBSTANCE, IS THAT OF THE PURCHASER AND/OR END-USER. CAP MAKES NO WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED REGARDING THE ACCURACY OF THESE DATA OR THE RESULT TO BE OBTAINED FROM THE USE THEREOF. CAP ASSUMES NO RESPONSIBILITY FOR INJURY FROM THE USE OF THE PRODUCT DESCRIBED HEREIN.				
FOR ADDITIONAL INFORMATION, PLEASE EMAIL : TSPD@capex.com				Issued Date: 03/02/2011

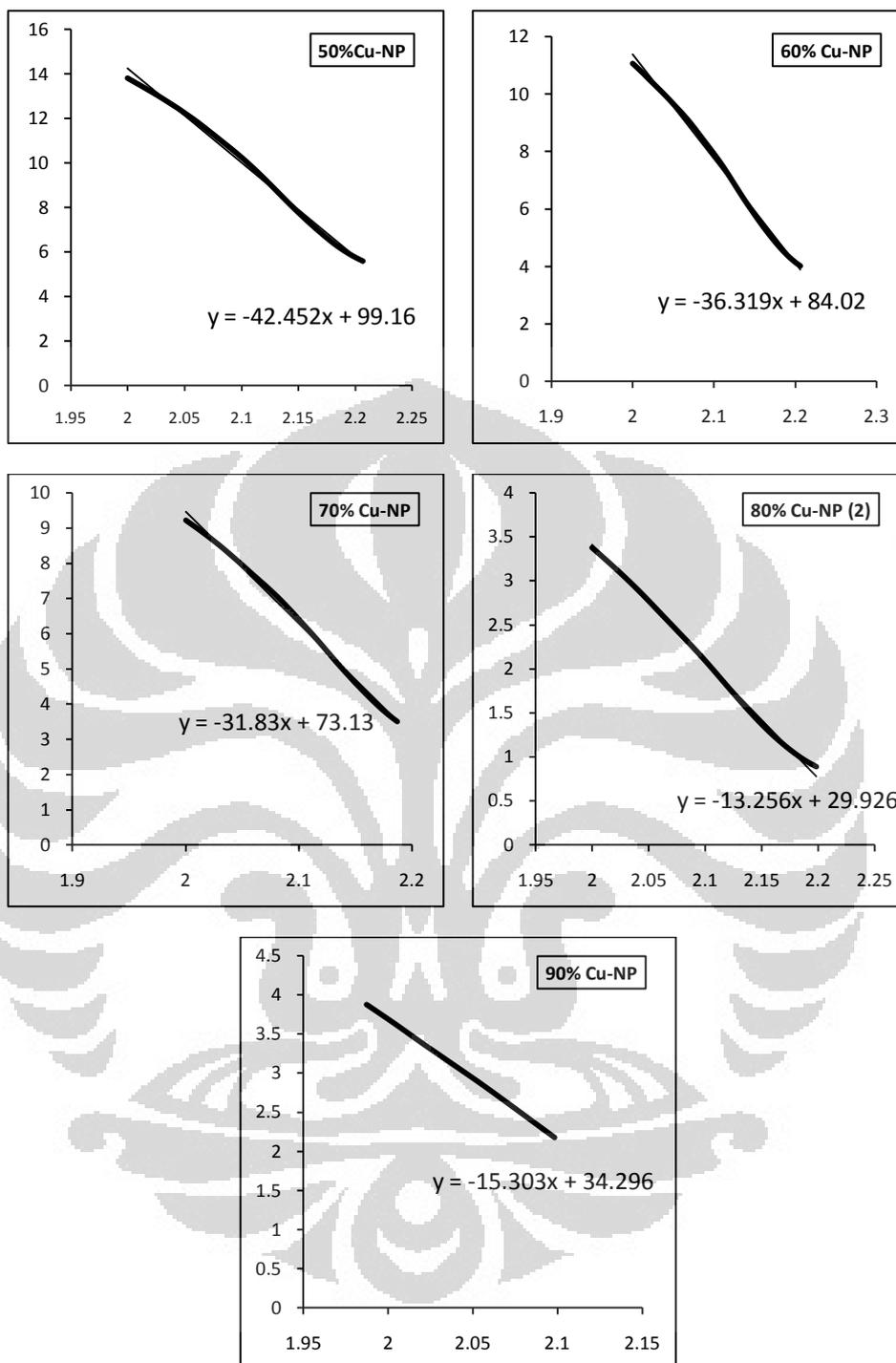
LAMPIRAN D
KECENDERUNGAN GARIS-GARIS KURVA KUBELKA-MUNK



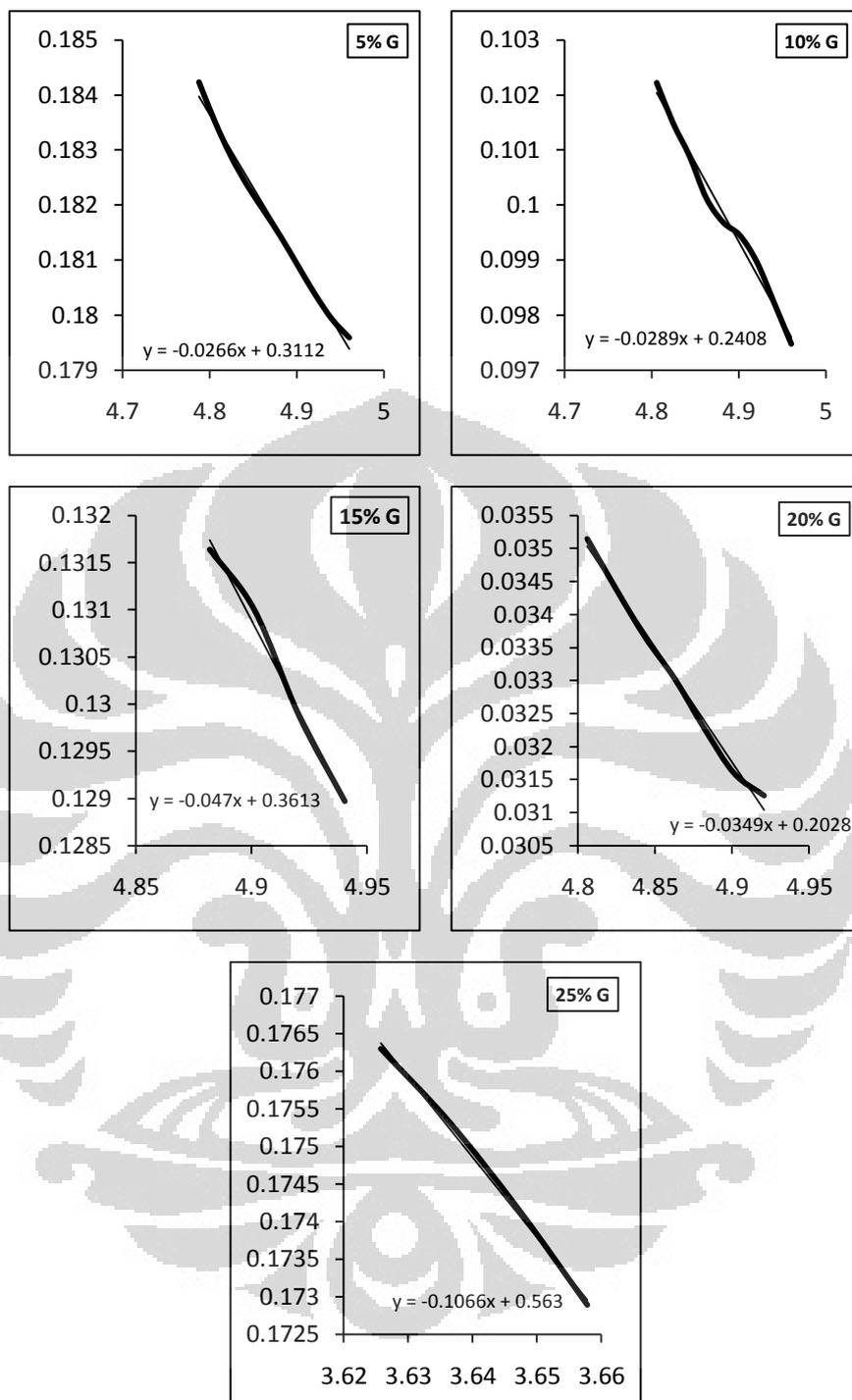
Gambar D.1. Garis kecenderungan (*trendline*) kurva-kurva Kubelka-Munk untuk sampel-sampel murni.



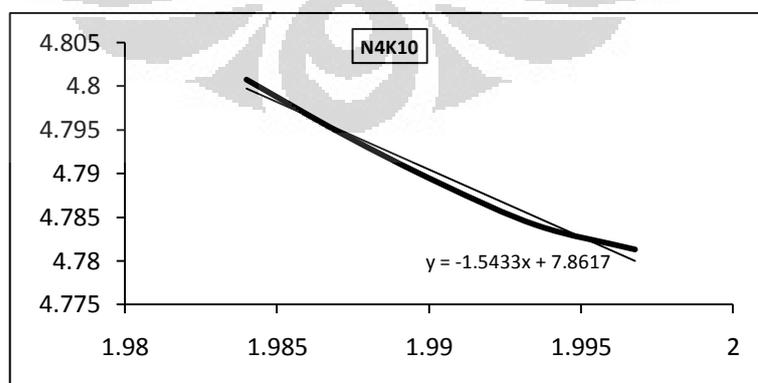
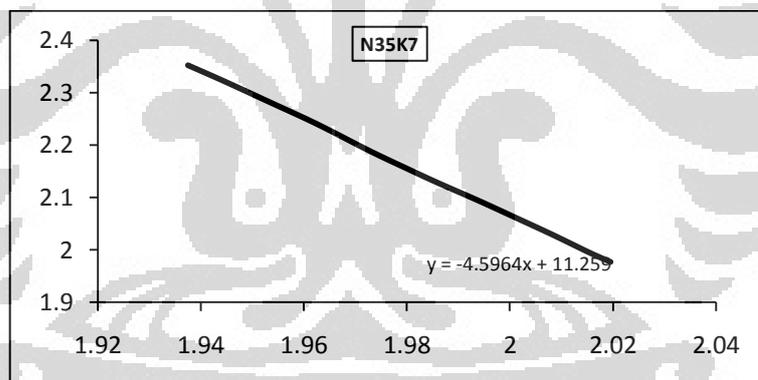
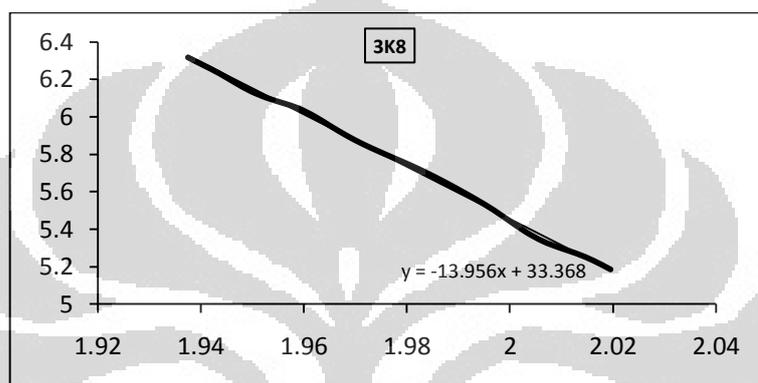
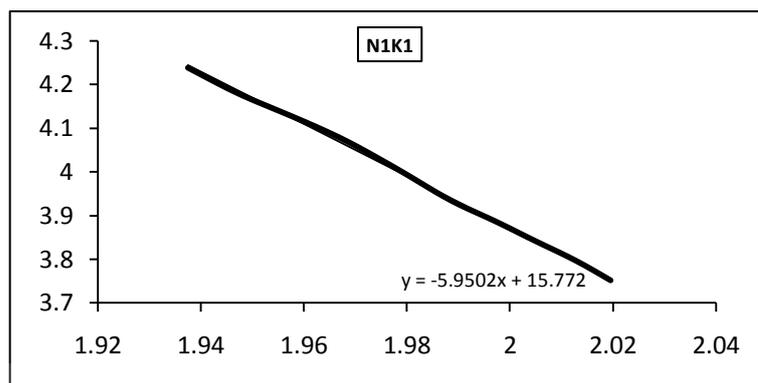
Gambar D.2. Garis kecenderungan kurva-kurva Kubelka-Munk sampel PP/CuNP.



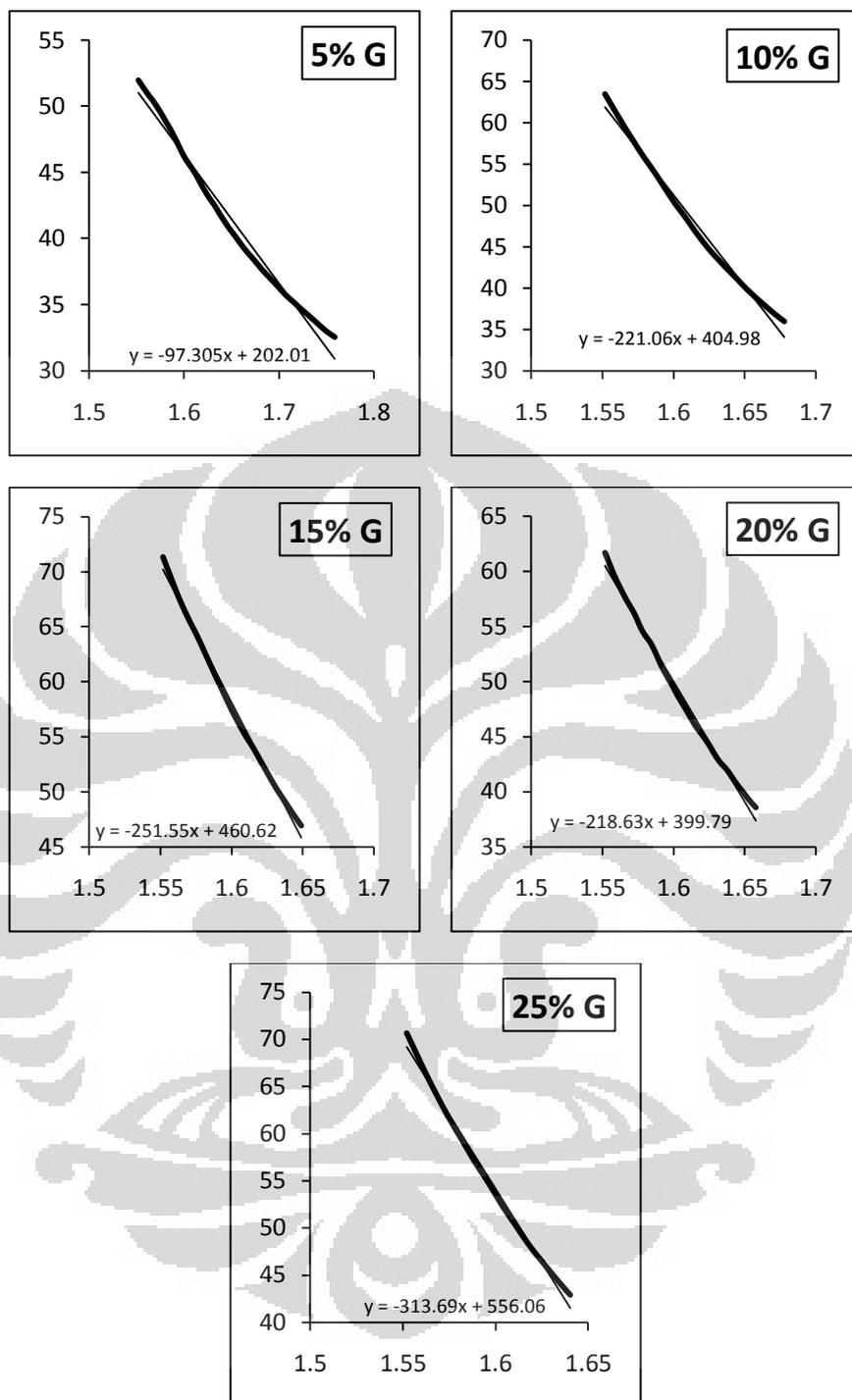
Gambar D.3. Garis kecenderungan kurva-kurva Kubelka-Munk sampel CuNP/PP.



Gambar D.4. Garis kecenderungan kurva-kurva Kubelka-Munk sampel 50CuNP/PP/G.



Gambar D. 5. Garis kecenderungan kurva-kurva sampel 60CuNP/PP/G.



Gambar D.6. Garis kecenderungan kurva-kurva Kubelka-Munk sampel 70CuNP/PP/G.