



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**Karakteristik Komposit Karbon-Karbon Berbasis Limbah Organik  
Hasil Proses Tekan Panas**

**DISERTASI**

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh Gelar Doktor

Agus Edy Pramono  
NPM 0806401020

FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM DOKTOR

DEPOK  
JULI 2012



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**Karakteristik Komposit Karbon-Karbon Berbasis Limbah Organik  
Hasil Proses Tekan Panas**

**DISERTASI**

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh Gelar Doktor

Agus Edy Pramono  
NPM 0806401020

FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
KEKHUSUSAN KOMPOSIT

DEPOK  
JULI 2012

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Agus Edy Pramono

NPM : 0806401020

Tanda Tangan :



Tanggal : Juli 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh :  
Nama : Agus Edy Pramono  
NPM : 0806401020  
Program Studi : Doktoral  
Judul Disertasi : “Karakteristik komposit karbon-karbon berbasis limbah organik hasil proses tekan panas”  
(*The characteristic of carbon-carbon composite based on organic waste as a product of hot press process*).

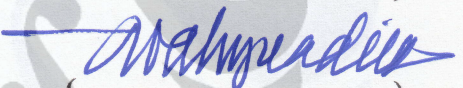
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Promotor  
Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia. MSc

  
(.....)

Ko-Promotor  
Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi M. S., DEA

  
(.....)

Penguji

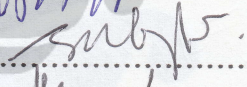
1. Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono, M.Phil. Eng

  
(.....)

2. Dr. Ir. Derry Pantjadarma, MSc

  
(.....)

3. Dr. Ir. Subyakto, MSc, APU

  
(.....)

4. Dr. Bambang Soegijono

  
(.....)

5. Ir. Muhammad Waziz Wildan, MSc, Ph.D

  
(.....)

Ditetapkan di Depok, Juli 2012

Mengetahui

Ketua Departemen Teknik Metalurgi dan Material



  
Prof. Dr. Ing. Ir. Bambang Suharno  
NIP. 19630422 198903 1 005

## Kata Pengantar

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, Yang Maha Kuasa dan Maha Kasih karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan Laporan Penelitian ini dengan judul: **“Karakteristik komposit karbon-karbon berbasis limbah organik hasil proses tekan panas”**. Penelitian ini adalah penelitian disertasi dan merupakan prasyarat akademik bagi kandidat doktor pada Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. Pada kesempatan ini saya mengucapkan trimakasih kepada:

1. Ketua dan Sekretaris Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk mengikuti ujian Penelitian Disertasi.
2. Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia. MSc, selaku promotor yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penelitian ini.
3. Prof. Dr. Ir. Johny Wahyuadi M. S., DEA, selaku co-promotor yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penelitian ini.
4. Majelis Penguji ujian Penelitian Disertasi program doktor di Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia yang telah meluangkan waktunya.
5. Manajer dan Staf Pengelola CMPFA dan perpustakaan, yang telah melayani keperluan saya dalam menyelesaikan penelitian ini.
6. Semua pihak yang telah membantu dalam penulisan laporan Penelitian Disertasi ini.

Segala saran dan kritik sangat saya harapkan demi perbaikan penelitian lanjutannya yang akan datang. Trimakasih

Depok, Juli 2012

Agus Edy Pramono  
NPM 0806401020

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

---

Sebagai sivitas akademika Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Agus Edy Pramono  
NPM : 0806401020  
Program Studi : Doktoral  
Departemen : Departemen Teknik Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Disertasi

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:

“Karakteristik komposit karbon-karbon berbasis limbah organik hasil proses tekan panas”.

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 sebenarnya.

Dibuat di: Depok  
Pada tanggal: Juli 2012  
Yang menyatakan

  
(Agus Edy Pramono)

## Abstrak

Rekayasa material komposit karbon-karbon dapat dibuat dari serbuk karbon limbah organik cangkang kelapa dan serbuk karbon limbah batubara, dengan matriks *coal tar pitch* sebagai bahan perekat yang adalah limbah residu dari proses gasifikasi batubara. Komposit karbon-karbon berbahan limbah belum banyak dikembangkan di Indonesia. Limbah organik tersedia sangat melimpah, oleh karena itu penelitian ini difokuskan untuk meningkatkan nilai tambah limbah organik dari bahan tidak bernilai menjadi bahan yang berguna secara teknologi dan bernilai tinggi.

Secara umum, penelitian ini bertujuan untuk menentukan “karakteristik mekanik: ketahanan aus dan konduktivitas elektrik komposit karbon-karbon berbasis limbah organik karena pengaruh rasio komposisi, ukuran serbuk karbon dan temperatur tekan panas”.

Proses fabrikasi dalam penelitian ini dimulai dengan karbonisasi cangkang kelapa dan penggilingan menjadi serbuk karbon, pencampuran dengan serbuk karbon batubara dalam rasio komposisi: karbon batubara 60%, 70% dan 80% berat, dicampur karbon cangkang kelapa 40%, 30% dan 20% berat, dengan ukuran serbuk mesh 100, 150, 200, dan 250. Berat campuran serbuk sebagai penguat komposit dicampur dengan matriks *coal tar pitch* dalam rasio berat 70%:30%. Campuran serbuk karbon dan *coal tar pitch* dipadatkan dan dipanaskan dalam cetakan dengan tekanan 778,75 bar dan temperatur 100°C. Sampel pra bentuk tersebut diproses *curing* pirolisis pada temperatur 500°C.

Hasil pengujian karakteristik laju aus, kekuatan impak dan konduktivitas elektrik menunjukkan bahwa persentase berat kandungan karbon cangkang kelapa meningkat, laju aus turun, komposit makin keras. Ukuran serbuk semakin kecil, laju aus cenderung turun. Nilai laju aus terbaik (paling rendah) adalah 0,056 mm<sup>3</sup>/Nm, hal ini dihasilkan oleh komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi karbon batubara 60% dan karbon cangkang kelapa 40%, pada ukuran serbuk mesh 200. Persentase berat kandungan serbuk karbon cangkang kelapa meningkat, kekuatan impak *Charpy* meningkat, komposit semakin tangguh. Ukuran serbuk karbon semakin kecil, kekuatan impak *Charpy* meningkat. Nilai kekuatan impak *Charpy* tertinggi adalah 0,95 kJ/m<sup>2</sup>, ini dihasilkan oleh komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi karbon batubara 60% dan karbon cangkang kelapa 40%, pada ukuran serbuk mesh 200. Konduktivitas elektrik tertinggi adalah 3,4 S/m, ini dihasilkan oleh komposit dengan rasio komposisi serbuk karbon batubara 80% dan serbuk karbon cangkang kelapa 20%, pada ukuran serbuk karbon mesh 150. Persentase berat kandungan serbuk karbon batubara meningkat, konduktivitas elektrik cenderung meningkat.

Kata kunci: karbon limbah organik, tekan panas, *curing* pirolisis, komposit karbon-karbon, laju aus, kekuatan impak, konduktivitas elektrik.

## Abstract

The engineering of carbon-carbon composite material can be made of carbon powder of coconut shell waste and carbon powder of coal waste, with coal tar pitch as an adhesive matrix material which is the residue waste from the coal gasification process. Carbon-carbon composites made of waste has not been developed in Indonesia. Organic wastes are very abundant, therefore, this research will focus to increase the added value of organic waste, from worthless materials into useful materials in technology and high value.

In general, this study aims to determine "the mechanical characteristics: wear resistance and electrical conductivity of carbon-carbon composites based on organic waste due to the influence of composition ratio, the size of the carbon powder and the temperature of hot press".

Fabrication process in this study was started with the carbonization of coconut shell carbon and grinding into powder, mixing it with coal carbon powder in the ratio of the composition of: coal carbon 60%, 70% and 80% by weight, mixed with coconut shell carbon 40%, 30% and 20% by weight, with a size of 100, 150, 200, and 250 mesh powder. Weight of the mixture as composite powder was mixed with a matrix of the coal tar pitch in a weight ratio 70%: 30%. The Mixture of carbon powder and coal tar pitch were compressed and heated in a mold with a pressure of 778.75 bars and a temperature of 100°C. Samples were processed in the curing temperature pyrolysis at 500°C.

Test results of the characteristics of wear rate, impact strength and electrical conductivity showed that the percentage by weight of coconut shell carbon content increased, the rate of wear decreased, the harder the composite. The smaller the powder size, the wear rate tends to decreased. Value of wear rate of the best (lowest) was 0.056 mm<sup>3</sup>/Nm, it was produced by carbon-carbon composites with carbon composition ratio of 60% coal and coconut shell carbon 40%, on a 200 mesh size powder. The weight percentage content of coconut shell carbon powder increased, the Charpy impact strength increased, the composites were increasingly tough. The smaller the size of the carbon powder, Charpy impact strength increased. Charpy impact strength of the highest value was 0.95 kJ/m<sup>2</sup>, it was produced by carbon-carbon composites with carbon composition ratio of 60% coal and coconut shell carbon 40%, on a 200 mesh size powder. The highest electrical conductivity was 3.4 S/m, it was produced by the composite with the composition ratio of 80% coal carbon powder and coconut shell carbon powder 20%, the size of 150 mesh carbon powder. Weight percentage of carbon content of coal increased, the electrical conductivity tends to increased.

Key words: organic waste carbon, hot press, curing pyrolysis, the carbon-carbon composites, the rate of wear, impact strength, electrical conductivity.



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1. 1. Latar Belakang	1
1. 2. Peta perjalanan (road map) penelitian Komposit Karbon Karbon	4
1. 3. Kebaruan	9
1. 4. Tujuan Penelitian	14
1. 5. Permasalahan	14
1. 6. Rumusan batasan masalah	15
1. 7. Hipotesis Penelitian	16
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	19
2. 1. Komposit	19
2. 2. Fungsi SERAT dan Matrik	20
2. 3. Proses Pembuatan Komposit	21
2. 4. Komposit matriks karbon	22
2. 5. Pembuatan serat karbon	23
2. 6. Sifat dan karakteristik serat karbon	23
2. 7. Metode pembentukan matriks carbon	25
2. 8. Kontribusi matriks terhadap sifat komposit	28
2. 9. Ikatan antar muka dan <i>Interphase</i>	28
2. 10. Teori perekatan (adhesion)	30

2. 11. Konsep komposit karbon-karbon	32
2. 12. Proses pembuatan komposit karbon-karbon	33
2. 13. Fabrikasi pra bentuk	35
2. 14. Proses densifikasi	36
2. 15. Aspek struktural komposit karbon-karbon	40
2. 16. Sifat komposit karbon-karbon.	40
2. 16. 1. Sifat mekanik komposit karbon-karbon.	41
2. 16. 2. Sifat gesekan komposit karbon-karbon.	42
2. 16. 3. Proteksi oksidasi komposit karbon-karbon	43
<b>BAB 3 METODE PENELITIAN</b>	44
3. 1. Langkah Penelitian	44
3. 2. Penelitian pendahuluan	45
3. 3. Penelitian sifat mekanik tahan aus komposit karbon-karbon	47
3. 4. Penelitian pengaruh ukuran serbuk karbon penguat	48
3. 5. Bahan Penelitian	51
3. 5. 1. Bahan matriks <i>coal tar pitch</i>	51
3. 5. 2. Bahan cangkang kelapa	51
3. 5. 3. Bahan serbuk batubara	52
3. 6. Alat proses	53
3. 6. 1. Tungku vakum	53
3. 6. 2. Mesin <i>disc/ballmill</i>	53
3. 6. 3. Mesin pengayak ( <i>siever</i> )	54
3. 6. 4. Proses pencampuran	54
3. 6. 5. Proses pemadatan panas ( <i>hot press</i> )	54
3. 6. 6. Proses curing pirolisis	55
3. 7. Peralatan karakterisasi	55
3. 7. 1. Karakterisasi komposisi kandungan karbon	55
3. 7. 2. Karakterisasi dengan <i>Thermogravimetry Analyzer</i>	56
3. 7. 3. Pengujian <i>scanning electron microscopic</i> .	56
3. 7. 4. Pengujian kekerasan	56
3. 7. 5. Pengujian aus.	56
3. 7. 6. Pengujian densitas	57

3. 7. 7. Pengujian porositas	57
3. 7. 8. Pengujian kuat tekan	58
3. 7. 9. Pengujian impak	58
3. 7. 10. Pengujian konduktivitas elektrik	59
3. 7. 11. Pengujian FTIR	59
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	<b>60</b>
4. 1. Analisis karbon	60
4. 1. 1. Uji komposisi bahan karbon	60
4. 1. 2. Analisis <i>thermogravimetry</i> bahan karbon	62
4. 2. Karakterisasi sifat mekanik	65
4. 2. 1. Karakterisasi sifat mekanik	65
4. 2. 1. 1. Analisis hubungan kuat tekan terhadap temperatur <i>curing</i>	65
4. 2. 1. 2. Analisis hubungan nilai kekerasan terhadap temperatur <i>curing</i>	69
4. 2. 2. Karakterisasi sifat mekanik penelitian tahap dua	72
4. 2. 2. 1. Analisis hubungan kekerasan terhadap temperatur tekan panas	72
4. 2. 2. 2. Analisis hubungan sifat laju aus terhadap temperatur tekan panas	73
4. 2. 3. Karakterisasi sifat mekanik penelitian tahap tiga	76
4. 2. 3. 1. Analisis hubungan kekerasan terhadap rasio komposisi	76
4. 2. 3. 2. Analisis hubungan nilai kekerasan terhadap ukuran serbuk	80
4. 2. 3. 3. Analisis hubungan sifat laju aus terhadap rasio komposisi	83
4. 2. 3. 4. Analisis hubungan laju aus terhadap ukuran serbuk	87
4. 2. 3. 5. Analisis hubungan kekuatan impak terhadap rasio komposisi.	92
4. 2. 3. 6. Analisis hubungan kekuatan impak terhadap ukuran serbuk.	94
4. 3. Karakterisasi sifat fisik	98
4. 3. 1. Karakterisasi sifat fisik penelitian pendahuluan	99
4. 3. 1. 1. Analisis hubungan densitas terhadap temperatur <i>curing</i>	99
4. 3. 1. 2. Analisis hubungan sifat porositas terhadap temperatur <i>curing</i> .	102
4. 3. 2. Karakterisasi sifat fisik penelitian tahap dua	106

4. 3. 2. 1. Analisis hubungan densitas terhadap temperatur tekan panas.	106
4. 3. 2. 2. Analisis hubungan sifat porositas terhadap temperatur tekan panas	108
4. 3. 3. Karakterisasi sifat fisik penelitian tahap tiga	110
4. 3. 3. 1. Analisis hubungan densitas terhadap rasio komposisi	110
4. 3. 3. 2. Analisis hubungan sifat porositas terhadap rasio komposisi	116
4. 3. 3. 3. Analisis hubungan sifat konduktivitas elektrik terhadap rasio komposisi	121
4. 3. 3. 4. Analisis hubungan sifat konduktivitas elektrik terhadap ukuran serbuk	124
4. 4. Analisis <i>scanning electron microscopic</i>	129
4. 4. 1. Analisis SEM penelitian pendahuluan	129
4. 4. 2. Analisis SEM komposit penelitian tahap dua	133
4. 4. 3. Analisis SEM penelitian tahap tiga	135
4. 5. Analisis FTIR	144
4. 6. Analisis sifat mekanik	162
BAB 5 KESIMPULAN	167
DAFTAR REFERENSI	168

## DAFTAR TABEL

- Tabel 2. 1: Serat karbon berbasis (PAN) *Polyacrylonitrile*
- Tabel 2. 2: Serat karbon berbasis PITCH
- Tabel 2. 3: Teknik pemrosesan untuk geometrik yang berbeda
- Tabel 2. 4: Sifat mekanik komposit karbon karbon unidirectional (~55% vol)
- Tabel 2. 5: Resistivitas elektrik dan konduktivitas panas sejajar dan tegak lurus terhadap *laminates* dari komposit karbon-karbon *two-directional*
- Tabel 4. 1: Hasil uji carbon analiser bahan serbuk penguat komposit
- Tabel 4. 2: Karakteristik utama serbuk karbon.
- Tabel 4. 3: Karakteristik utama serbuk karbon
- Tabel 4. 4: Data uji densitas bahan komposit
- Tabel 4. 5: Bilangan gelombang spektra infrared cangkang kelapa
- Tabel 4. 6: Bilangan gelombang spektra infrared batubara
- Tabel 4. 7: Bilangan gelombang spektra infrared *coal tar pitch*
- Tabel 4. 8: Bilangan gelombang spektra infrared mesh 100, rasio komposisi 80:20
- Tabel 4. 9: Bilangan gelombang spektra infrared mesh 150, rasio komposisi 80:20
- Tabel 4. 10: Bilangan gelombang spektra infrared mesh 200, rasio komposisi 80:20
- Tabel 4. 11: Bilangan gelombang spektra infrared mesh 250, rasio komposisi 80:20
- Tabel 4. 12: Bilangan gelombang spektra infrared mesh 100, rasio komposisi 60:40
- Tabel 4. 13: Bilangan gelombang spektra infrared mesh 100, rasio komposisi 70:30
- Tabel 4. 14: Absorpsi energi spektra infrared oleh ikatan molekul untuk mesh 100
- Tabel 4. 15: Energi ikatan molekul CC
- Tabel 4. 16: Energi ikatan molekul CH
- Tabel 4. 17: Energi ikatan molekul OH

## DAFTAR GAMBAR

- Gambar 1.1. Penggunaan komposit dalam bermacam industry pada tahun 1999 dan proyeksi tahun 2000, (*Composites Fabricators Association*)
- Gambar 1.2. Komponen komposit karbon-karbon, (a) cakram rem, (b) rotor turbin, (c) elemen penahan panas dan (d) pelapis dan tabung pelindung
- Gambar 1.3. Peta perjalanan (*road map*) penelitian Komposit Karbon-Karbon
- Gambar 1.4. Peta konsep kebaruan penelitian
- Gambar 2.1. Bentuk umum dari penguat serat. Umumnya serat penguat bisa serat panjang lurus, serat putus-putus atau serat cincang, serbuk atau serpihan, atau serat memanjang yang dirajut, *braided*, atau *knitted*
- Gambar 2.2. Klasifikasi teknik pemrosesan komposit
- Gambar 2.3. Diagram skematik interphase serat-matrik dan beberapa faktor yang berkontribusi terhadap pembentukannya
- Gambar 2.4. Ilustrasi pembasahan yang baik dan jelek oleh penyebaran perekat di atas permukaan
- Gambar 2.5. Pemrosesan komposit karbon-karbon
- Gambar 2.6. Peningkatan densitas komposit karbon-karbon dan siklus densifikasi
- Gambar 2.7. Model proses densifikasi komposit karbon-karbon
- Gambar 2.8. Teknik CVI aliran gas alam
- Gambar 2.9. Teknik CVI dengan gradien tekanan
- Gambar 2.10. Teknik CVI dengan gradien temperature
- Gambar 2.11. Perubahan sifat dengan sejumlah redensifikasi (*two-directional weave*)
- Gambar 3.1. Diagram alir penelitian tahap pendahuluan
- Gambar 3.2. Diagram alir penelitian tahap dua
- Gambar 3.3. Diagram alir penelitian tahap tiga
- Gambar 3.4. Bentuk limbah *coal tar pitch*
- Gambar 3.5. Limbah cangkang kelapa
- Gambar 3.6. Arang cangkang kelapa
- Gambar 3.7. Limbah serbuk batubara
- Gambar 4.1. Hasil uji *thermogravimetry analyzer* ABK, BB, ABB, Grafit
- Gambar 4.2. Hasil uji *thermogravimetry analyzer coal tar pitch*

- Gambar 4.3. Hubungan temperatur curing VS kuat tekan, komposit karbon-karbon berbahan grafit
- Gambar 4.4. Hubungan temperatur curing VS kuat tekan, komposit karbon-karbon berbahan serbuk karbon batubara (BB)
- Gambar 4.5. Hubungan temperatur curing VS kuat tekan, komposit karbon-karbon berbahan serbuk arang cangkang kelapa (ABK)
- Gambar 4.6. Hubungan temperatur curing VS kuat tekan, komposit karbon-karbon berbahan serbuk semikokas reheating (ABB)
- Gambar 4.7. Grafik hubungan temperatur curing VS  $B_{HN}$ , komposit bahan serbuk batubara atau BB
- Gambar 4.8. Grafik hubungan temperatur curing VS  $B_{HN}$ , komposit bahan arang cangkang kelapa atau ABK
- Gambar 4.9. Grafik hubungan temperatur curing VS  $B_{HN}$ , komposit bahan semikokas reheating atau ABB
- Gambar 4.10. Grafik hubungan temperatur tekan panas VS  $B_{HN}$
- Gambar 4.11. Grafik hubungan temperatur tekan panas VS laju aus
- Gambar 4.12. Grafik hubungan rasio komposisi VS  $B_{HN}$ , mesh 100
- Gambar 4.13. Grafik hubungan rasio komposisi VS  $B_{HN}$ , mesh 150
- Gambar 4.14. Grafik hubungan rasio komposisi VS  $B_{HN}$ , mesh 200
- Gambar 4.15. Grafik hubungan rasio komposisi VS  $B_{HN}$ , mesh 250
- Gambar 4.16. Perbandingan Grafik hubungan rasio komposisi VS  $B_{HN}$ , mesh 100; 150; 200; 250
- Gambar 4.17. Peningkatan nilai kekerasan akibat pembesaran mesh, rasio 60:40
- Gambar 4.18. Peningkatan nilai kekerasan akibat pembesaran mesh, rasio 70:30
- Gambar 4.19. Peningkatan nilai kekerasan akibat pembesaran mesh, rasio 80:20
- Gambar 4.20. Grafik hubungan ukuran mesh serbuk vs  $B_{HN}$  vs ratio komposisi
- Gambar 4.21. Grafik hubungan rasio komposisi VS laju aus, mesh 100.
- Gambar 4.22. Grafik hubungan rasio komposisi VS laju aus, mesh 150.
- Gambar 4.23. Grafik hubungan rasio komposisi VS laju aus, mesh 200.
- Gambar 4.24. Grafik hubungan rasio komposisi VS laju aus, mesh 250.
- Gambar 4.25. Perbandingan Grafik hubungan rasio komposisi VS laju aus, mesh 100; 150; 200; 250
- Gambar 4.26. Penurunan nilai laju aus akibat pembesaran mesh, rasio 60:40.
- Gambar 4.27. Penurunan nilai laju aus akibat pembesaran mesh, rasio 70:30.
- Gambar 4.28. Penurunan nilai laju aus akibat pembesaran mesh, rasio 80:20.

- Gambar 4.29. Perbandingan Grafik hubungan ukuran mesh serbuk vs laju aus vs rasio komposisi
- Gambar 4.30. Grafik hubungan rasio komposisi vs kekuatan impak, mesh 100.
- Gambar 4.31. Grafik hubungan rasio komposisi vs kekuatan impak, mesh 150.
- Gambar 4.32. Grafik hubungan ratio komposisi vs kekuatan impak, mesh 200.
- Gambar 4.33. Grafik hubungan rasio komposisi vs kekuatan impak, mesh 250.
- Gambar 4.34. Perbandingan Grafik hubungan Rasio komposisi BB:ABK VS kekuatan impak, mesh 100; 150; 200; 250
- Gambar 4.35. Grafik hubungan ukuran serbuk vs kekuatan impak, rasio 60:40.
- Gambar 4.36. Grafik hubungan ukuran serbuk vs kekuatan impak, rasio 70:30.
- Gambar 4.37. Grafik hubungan ukuran serbuk vs kekuatan impak, rasio 80:20.
- Gambar 4.38. Perbandingan Grafik hubungan ukuran mesh serbuk vs kekuatan impak vs rasio komposisi
- Gambar 4.39. Grafik hubungan temperatur *curing* VS densitas, komposit bahan arang cangkang kelapa atau ABK
- Gambar 4.40. Grafik hubungan temperatur *curing* VS densitas, komposit bahan semikokas *reheating* atau ABB 1000.
- Gambar 4.41. Grafik hubungan temperatur *curing* VS densitas, komposit bahan serbuk batubara atau BB
- Gambar 4.42. Grafik hubungan temperatur *curing* VS % porositas, komposit bahan arang cangkang kelapa atau ABK.
- Gambar 4.43. Grafik hubungan temperatur *curing* VS % porositas, komposit bahan semikokas *reheating* atau ABB 1000.
- Gambar 4.44. Grafik hubungan temperatur *curing* VS % porositas, komposit bahan serbuk batubara atau BB
- Gambar 4.45. Grafik hubungan temperatur tekan panas VS densitas
- Gambar 4.46. Grafik hubungan temperatur tekan panas VS porositas
- Gambar 4.47. Grafik hubungan rasio komposisi VS densitas, mesh 100.
- Gambar 4.48. Grafik hubungan rasio komposisi VS densitas, mesh 150.
- Gambar 4.49. Grafik hubungan rasio komposisi VS densitas, mesh 200.
- Gambar 4.50. Grafik hubungan rasio komposisi VS densitas, mesh 250.
- Gambar 4.51. Perbandingan grafik hubungan rasio komposisi VS densitas, mesh 100; 150; 200; 250
- Gambar 4.52. Perbandingan Grafik hubungan ukuran mesh serbuk vs densitas vs rasio komposisi
- Gambar 4.53. Grafik hubungan rasio komposisi VS porositas, mesh 100.
- Gambar 4.54. Grafik hubungan ratio komposisi VS porositas, mesh 150.
- Gambar 4.55. Grafik hubungan ratio komposisi VS porositas, mesh 200.



- Gambar 4.56. Grafik hubungan ratio komposisi VS porositas, mesh 250.
- Gambar 4.57. Perbandingan Grafik hubungan ratio komposisi VS porositas, mesh 100; 150; 200; 250
- Gambar 4.58. Perbandingan Grafik hubungan ukuran mesh serbuk vs porositas vs rasio komposisi
- Gambar 4.59. Grafik hubungan rasio komposisi VS konduktivitas, mesh 100.
- Gambar 4.60. Grafik hubungan rasio komposisi VS konduktivitas, mesh 150.
- Gambar 4.61. Grafik hubungan rasio komposisi VS konduktivitas, mesh 200.
- Gambar 4.62. Grafik hubungan rasio komposisi VS konduktivitas, mesh 250.
- Gambar 4.63. Perbandingan Grafik hubungan rasio komposisi VS konduktivitas, mesh 100; 150; 200; 250
- Gambar 4.64. Perubahan nilai konduktivitas elektrik akibat pembesaran mesh, rasio 60:40.
- Gambar 4.65. Perubahan nilai konduktivitas elektrik akibat pembesaran mesh, rasio 70:30.
- Gambar 4.66. Perubahan nilai konduktivitas elektrik akibat pembesaran mesh, rasio 80:20.
- Gambar 4.67. Perbandingan Grafik hubungan ukuran mesh serbuk vs konduktivitas vs rasio komposisi
- Gambar 4.68. Grafik hubungan temperatur *curing* VS ukuran rongga komposit bahan arang cangkang kelapa atau ABK
- Gambar 4.69. Topografi hasil uji *scanning electron microscopic* komposit karbon karbon berbahan arang cangkang kelapa atau ABK
- Gambar 4.70. Grafik hubungan temperatur *curing* VS ukuran rongga, komposit bahan semikokas reheating atau ABB 1000
- Gambar 4.71. Topografi hasil uji *scanning electron microscopic* komposit karbon-karbon berbahan semikokas reheating atau ABB 1000
- Gambar 4.72. Grafik hubungan temperatur *curing* VS ukuran rongga, komposit bahan serbuk batubara atau BB
- Gambar 4.73. Topografi hasil uji *scanning electron microscopic* komposit karbon-karbon berbahan serbuk batubara atau BB
- Gambar 4.74. Grafik hubungan temperatur tekan panas VS ukuran rongga
- Gambar 4.75. Topografi komposit karbon tekan panas
- Gambar 4.76. Grafik hubungan rasio komposisi vs ukuran rongga, mesh 100.
- Gambar 4.77. Grafik hubungan rasio komposisi vs ukuran rongga, mesh 150.
- Gambar 4.78. Grafik hubungan rasio komposisi vs ukuran rongga, mesh 200.
- Gambar 4.79. Grafik hubungan rasio komposisi vs ukuran rongga, mesh 250.
- Gambar 4.80. Grafik hubungan ukuran serbuk vs ukuran rongga, rasio 60:40.
- Gambar 4.81. Grafik hubungan ukuran serbuk vs ukuran rongga, rasio 70:30.

- Gambar 4.82. Grafik hubungan ukuran serbuk vs ukuran rongga, rasio 80:20.
- Gambar 4.83. Perbandingan Grafik hubungan ukuran mesh serbuk vs ukuran rongga vs rasio komposisi
- Gambar 4.84. Topografi komposit karbon-karbon mesh 100.
- Gambar 4.85. Topografi komposit karbon-karbon mesh 150.
- Gambar 4.86. Topografi komposit karbon-karbon mesh 200.
- Gambar 4.87. Topografi komposit karbon-karbon mesh 250.
- Gambar 4.88. Spektra infrared arang cangkang kelapa.
- Gambar 4.89. Spektra infrared batubara
- Gambar 4.90. Spektra infrared *coal tar pitch*
- Gambar 4.91. Spektra infrared komposit karbon-karbon mesh 100, rasio komposisi BB: ABK 80:20
- Gambar 4.92. Spektra infrared komposit karbon-karbon mesh 150, rasio komposisi BB: ABK 80:20
- Gambar 4.93. Spektra infrared komposit karbon-karbon mesh 200, rasio komposisi BB: ABK 80:20
- Gambar 4.94. Spektra infrared komposit karbon-karbon mesh 250, rasio komposisi BB: ABK 80:20
- Gambar 4.95. Spektra infrared komposit karbon-karbon
- Gambar 4.96. Spektra infrared komposit karbon-karbon mesh 100, rasio komposisi BB: ABK 60:40
- Gambar 4.97. Spektra infrared komposit karbon-karbon mesh 100, rasio komposisi BB: ABK 70:30
- Gambar 4.98. Spektra infrared komposit karbon-karbon
- Gambar 4.99. Pengaruh rasio komposisi terhadap absorpsi energi infrared oleh ikatan molekul CC
- Gambar 4.100. Pengaruh rasio komposisi terhadap absorpsi energi infrared oleh ikatan molekul CH
- Gambar 4.101. Pengaruh rasio komposisi terhadap absorpsi energi infrared oleh ikatan molekul OH
- Gambar 4.102. Pengaruh rasio komposisi terhadap absorpsi energi infrared oleh ikatan molekul CC, CH, OH
- Gambar 4.103. Sketsa struktur mikro ikatan serbuk karbon dan matriks di dalam komposit karbon-karbon

# BAB 1 PENDAHULUAN

## 1. 1. Latar Belakang

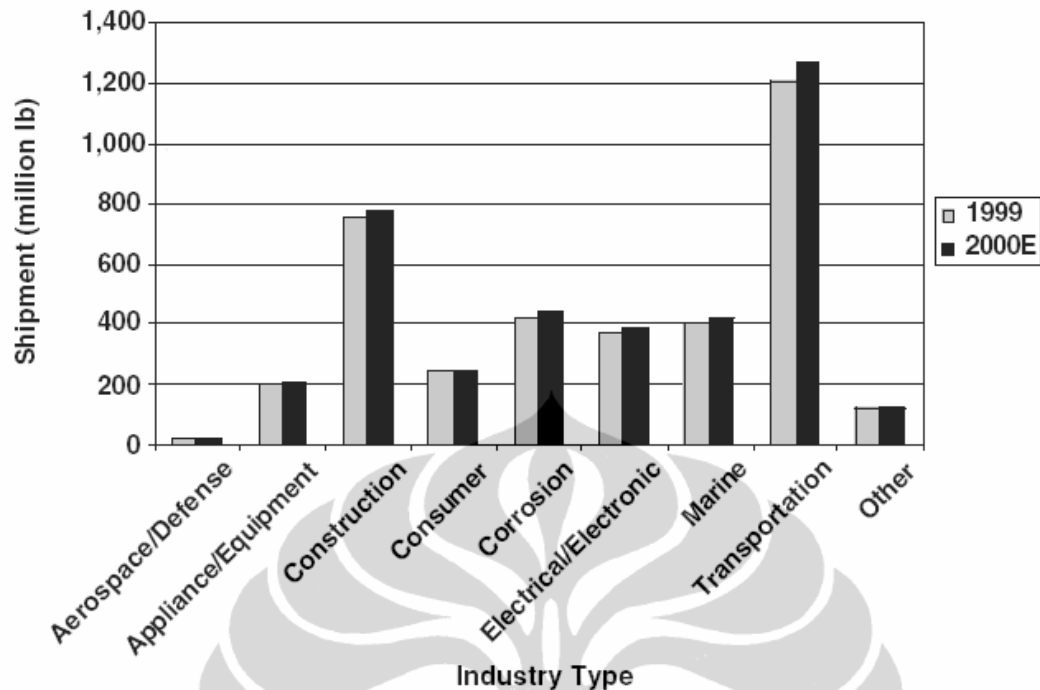
Perkembangan rekayasa, produksi maupun pemanfaatan material berbasis komposit di Indonesia belum begitu populer, dan belum banyak industri di Indonesia yang mengembangkan teknologi ini.

Awalnya penerapan komersial skala besar material komposit dimulai selama perang dunia II (akhir 1940 dan awal 1950) dengan penerapan pada kapal untuk militer, tetapi saat ini komposit diproduksi oleh peringkat industri yang berbeda, meliputi *aerospace*, *automotive*, kapal laut, kapal *boat*, peralatan olah raga, infrastruktur, dan banyak lagi.

Penggunaan material komposit tidak hanya terbatas pada penerapan pesawat ruang angkasa dan angkatan laut saja. Inovasi material baru, penurunan harga dan pengembangan proses manufaktur yang meningkat telah mengangkat keberadaan material komposit dalam hampir setiap sektor industri. Komposit juga telah dipertimbangkan menjadi material pilihan untuk sector industri tertentu, misalnya otomotif dan kendaraan berat lainnya.

Terdapat banyak alasan untuk pertumbuhan aplikasi komposit, tetapi dorongan utama adalah bahwa produk yang difabrikasi dari komposit lebih kuat dan lebih ringan. Pengguna terbesar dari material komposit saat ini adalah industri transportasi, di Amerika mengkonsumsi 1,3 milyar pound komposit pada tahun 2000 [1]. Sementara di Indonesia belum diperoleh data tentang jumlah penggunaan komposit.

Pembicaraan luas, pasar komposit dibagi menjadi kelompok industri seperti: *aerospace*, otomotif, konstruksi, kapal laut, peralatan tahan korosi, produk konsumen, perlengkapan rumah tangga dan peralatan kantor, dan lain-lain. Data pada Gambar 1.1 menunjukkan gambaran tentang penggunaan komposit di Amerika Serikat untuk tahun 1999 dan proyeksi tahun 2000 jumlah penggunaan komposit di Amerika, sementara di Indonesia meskipun banyak komponen-komponen industri otomotif menggunakan komposit, tetapi belum ada data jumlah besaran penggunaan komposit secara keseluruhan.



Gambar 1. 1. Penggunaan komposit dalam bermacam industri pada tahun 1999 dan proyeksi tahun 2000, (Composites Fabricators Association) [1].

Industri pesawat terbang adalah yang pertama memperoleh keuntungan material komposit. Pesawat terbang, roket dan *missile* bisa terbang lebih tinggi, lebih cepat dan lebih jauh dengan bantuan komposit. Penurunan berat karena penggunaan material komposit mencapai 20 sampai 35%. Penurunan berat pesawat tempur meningkatkan kapasitas pembawaan beban pesawat. Dalam industri otomotif, komposit telah dipertimbangkan menjadi material pilihan dalam beberapa komponennya. Saat ini, panel bodi komposit telah banyak digunakan pada mobil sport sampai mobil penumpang. Pada tahun 2000, industri otomotif Amerika menggunakan 318 juta pound komposit [1].

Sejauh ini di Indonesia belum ditemukan data inventarisasi tentang kebutuhan material komposit dan industri komposit, lebih spesifik lagi industri komposit karbon. Di Indonesia juga belum ditemukan data inventarisasi industri karbon baik dalam bentuk serbuk, serat dan *fabric* atau kain karbon, juga industri grafit belum ditemukan datanya di Indonesia.

Limbah organik yang jumlahnya semakin hari semakin besar seharusnya menjadi peluang untuk diolah menjadi karbon yang bermanfaat bagi

perkembangan rekayasa material maupun dalam rangka memelihara lingkungan yang bersih dari limbah.

Rekayasa material komposit karbon-karbon berbasis serbuk limbah batubara dan serbuk limbah cangkang kelapa belum banyak dilakukan di Indonesia. Hal-hal yang menjadi pertimbangan sehingga dianggap perlu dalam penelitian ini dapat dijelaskan berikut ini. Penelitian ini memanfaatkan bahan-bahan limbah yang tersedia melimpah di Indonesia, khususnya bahan limbah batubara dan limbah cangkang kelapa. Bahan-bahan yang tersedia dan tidak bernilai ini diolah dengan cara tertentu diubah menjadi bahan karbon yang digunakan sebagai bahan dasar rekayasa material komposit karbon-karbon. Teknik rekayasa limbah ini akan meningkatkan kegunaan serbuk limbah batubara dan limbah cangkang kelapa sehingga meningkatkan nilai tambahnya. Pengolahan dan pemanfaatan serbuk limbah batubara dan cangkang kelapa sebagai bahan dasar rekayasa komposit karbon-karbon memerlukan biaya dan waktu yang tidak sedikit, tetapi hasil dan manfaat penelitian di masa depan akan berkembang dengan baik. Hasil dari penelitian ini dapat dikembangkan menjadi material alternatif untuk memproduksi komponen-komponen mekanik gesek baik untuk peralatan industri maupun kendaraan ringan atau kendaraan berat dan kendaraan militer atau bahkan peralatan militer, misalnya untuk sepatu rem kendaraan atau pesawat, karbon *brush* konduktor elektrik, konduktor elektrik pada *pantograph* kereta rel listrik, dan lain-lain.

Bahan awal atau dasar dari material rekayasa dalam penelitian ini adalah karbon sebagai penguat yang di Indonesia sangat luas tersedia dari batubara dan limbah organik. Karbon dihasilkan dari bahan batubara yang dikarbonisasi untuk menghasilkan karbon hitam, bahan karbon juga bisa dihasilkan dari bahan-bahan lain misalnya dari limbah organik yang diproses menjadi karbon.

Konsep dasar penelitian ini adalah rekayasa material dari limbah yang tidak bernilai menjadi bahan bernilai tinggi.

Komposit karbon-karbon secara historis telah digunakan untuk aplikasi yang mensyaratkan stabilitas abrasi dan temperatur tinggi, misalnya nosel roket dan *exit cones* atau ketahanan aus pada temperatur menengah, misalnya *aircraft brakes*, konduktor *carbon brush* untuk generator elektrik, konduktor elektrik pada

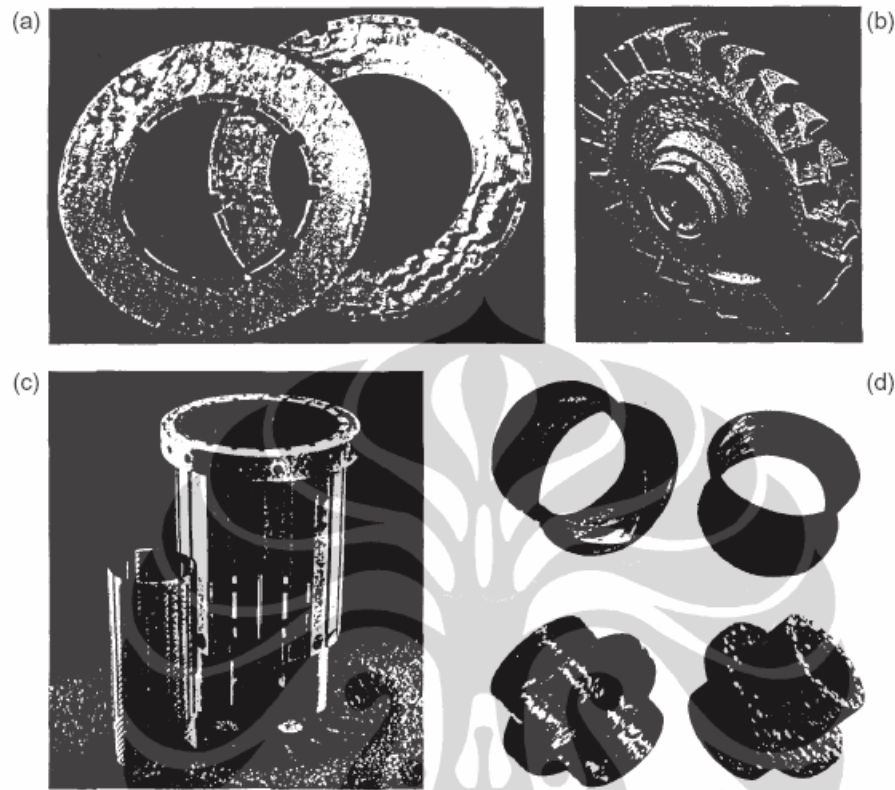
*pantograph* kereta rel listrik, dan lain-lain. Proses yang telah dikembangkan untuk penerapan material yang tebal ini dijalin untuk menghasilkan sebuah material yang padat dengan sifat yang disyaratkan. Proses tersebut secara tipikal meliputi fabrikasi beberapa jenis sampel pra bentuk komposit organik, pemanasan sampel pra bentuk tersebut sampai temperatur tinggi untuk menguraikan material organik menjadi karbon (biasa disebut karbonisasi), dan kemudian menginfiltrasi komposit tersebut untuk mengisi celah-celah yang tertinggal setelah dekomposisi, biasa dikenal dengan istilah densifikasi. Proses karbonisasi dan densifikasi dapat diulang-ulang sebanyak yang diperlukan sampai material mencapai densitas yang diinginkan [2].

Karbon adalah elemen yang terdiri dari empat kelompok yaitu, *diamond*, *graphite*, *carbynes* dan *fullerenes*, yang masing-masing mempunyai karakter teknologi dan *science* yang berbeda [3]. Serat karbon adalah serat sintetis hitam kaku dan sangat kuat, ringan dan ketebalan beberapa micron dengan rantai molekul aromatic panjang yang utamanya tersusun dari karbon. Serat karbon ini mampu mempertahankan struktur dan sifatnya dibawah kondisi fluid, tekanan dan temperatur yang ekstrim dan oleh karena itu dapat digunakan dengan semua jenis matriks, polimer, keramik dan metal, yang menerapkan teknik proses komposit yang berbeda. Pada konteks konsumsi masal, aplikasi utama dari komposit karbon-karbon adalah dalam sistem pengereman unjuk kerja tinggi. Pada sektor rekayasa umum, material ini digunakan dalam komponen mesin, sebagai material tahan api, sebagai cetakan tekan panas dan elemen pemanas, sebagai pengikat (baut) temperatur tinggi, tabung pelapis silinder, sebagai penghantar industri kaca dan lain-lain. Komposit karbon-karbon mempunyai potensi besar dalam sektor energi sebagai plat polar untuk *fuel cell*, dalam baterai penyimpan energi elektrik dan lain-lain. Ketika teknologi semakin ekonomis menjadi lebih bergairah, penerapan yang semakin banyak akan meningkat. Gambar 1. 2 menunjukkan contoh aplikasi dari komposit karbon- karbon.

## **1. 2. Peta perjalanan (road map) penelitian Komposit Karbon-Karbon**

Tinjauan referensi jurnal penelitian tentang komposit karbon-karbon yang pernah dilakukan menjelaskan tentang bahan yang disiapkan, proses manufaktur yang diterapkan, karakteristik dan pembahasan dan aplikasi dari produk komposit

yang dihasilkan. Hal ini diungkapkan dalam penjelasan berikut ini.



Gambar 1. 2. Komponen komposit karbon-karbon, (a) cakram rem, (b) rotor turbin, (c) elemen penahan panas dan (d) pelapis dan tabung pelindung [3].

Penerapan utama komposit karbon-karbon adalah pada sepatu rem pesawat (*aircraft brakes*). Empat *pitch* dan empat jenis karbon dapat digunakan sebagai persiapan komposit karbon-karbon. Porositas dan kuat tekan dari komposit dipengaruhi oleh perubahan bentuk dari material pada karbonisasi. Komposit kokas petroleum mempunyai kuat tekan paling rendah. Laju aus dari komposit karbon-karbon lebih rendah daripada yang dari material komersial, dengan komposit grafit yang menunjukkan laju aus yang paling rendah [4].

Penelitian komposit yang dibuat dari serat dalam berbagai arah dan polimer bersifat karbon dan *hydrocarbon* sebagai matriks prekursor, menyatakan bahwa sifat dan densitas tergantung pada jenis dan fraksi volume dari penguat, matriks prekursor yang digunakan dan temperatur perlakuan panas akhir. Komposit karbon-karbon digunakan dalam bermacam sektor yang mensyaratkan sifat mekanik tinggi pada temperatur tinggi, sifat gesek yang baik untuk sepatu

rem dalam kendaraan kecepatan tinggi atau konduktivitas termal yang tinggi untuk aplikasi pengelolaan termal [3].

Komposit yang diproses dari pra bentuk tenunan karbon dua setengah arah melalui densifikasi berulang menggunakan rute infiltrasi uap kimia dan perlakuan panas karbonisasi atau grafitisasi, selanjutnya karakter sifat mekanik dilakukan melalui pengujian tarik, tekan dan puntiran. Pekerjaan ini adalah tentang pembuatan komposit karbon-karbon berlapis dua setengah arah ini [5].

Pengaruh struktur yang mengandung *punch needle*, rasio masa material *non-woven* terhadap jaringan serat, tipe serat karbon *Polyacrylonitrile* lembaran *non-woven* dan ketebalan unit, pada sifat lendutan komposit karbon-karbon pernah diteliti. Kekuatan komposit karbon-karbon tidak linier dengan kekuatan serat karbon lembaran *non-woven* karena *interface* yang berpengaruh antara serat karbon dan karbon matriks [6].

Sifat pirolisis dari *pitch* bergantung pada komposisi kimianya, yang pada gilirannya bergantung pada kondisi proses yang digunakan pernah diteliti. Kerja ini berhubungan dengan sifat pirolisis 4 jenis *pitch* dicampur dengan 4 jenis karbon. Pembentukan dan pengembangan *mesophase* dimodifikasi oleh keberadaan karbon, terutama oleh *petroleum coke*. Tekstur optikal dari *pitch* yang dipirolisis tergantung pada jenis karbon yang digunakan sebagai pengisi [7].

Penelitian tentang *Coal tar pitch* dan karbon serbuk yang digunakan dalam pembuatan elektroda, *briquette* dan *electric brushes* pernah dilakukan. Penelitian ini berhubungan dengan studi sifat 4 jenis *pitch* dicampur dengan 4 jenis karbon. Interaksi yang kuat dengan antrasit dan sangat lemah dengan grafit, dan mempengaruhi peleburan mesofasa yang ada dalam *itches* yang diperlakukan secara termal selama langkah pencampuran [8].

Penelitian komposit karbon/phenolic yang digunakan dalam suku cadang nosel motor roket padat pernah dilakukan untuk menguji ketahanan panasnya, dan karakteristik kekuatan tinggi yang diperlukan untuk mengalami temperatur dan tekanan tinggi dari gas pembakaran, [9].

Pemanfaatan empat jenis *pitch* dan 4 jenis karbon untuk persiapan komposit karbon-karbon untuk diuji sebagai sepatu rem karbon. Ratio *pitch* terhadap karbon disesuaikan untuk mengoptimalkan kekuatan tekan komposit.



Sifat gesekan dari material terutama ditentukan oleh jenis karbon yang digunakan. Umumnya komposit ini menampilkan laju aus yang lebih rendah dan variasi koefisien gesek yang sama ketika dibandingkan terhadap material pelapis rem komersial [10].

Studi pemodelan komposit karbon-karbon berdasarkan pada serat karbon dan prekursor fasa menengah (*mesophase*) bersifat karbon pernah dilakukan. Serat berukuran mikro yang disisipkan dalam *mesophase* menciptakan texture penjangkaran (pengkaitan) yang kuat. Komposit karbon-karbon ini digunakan dalam industri pertahanan, olah raga dan transportasi [11].

Pada tahun 2005 pernah dilakukan penelitian tentang lembaran karbon grafit yang dimasukkan jalinan tebal berlubang jarum dengan dua langkah dilakukan untuk memadatkan pra bentuk berpori, melalui infiltrasi uap kimia isothermal dengan laju yang ditentukan [12].

*Carbon fabric* dari *polyacrylonitrile*, penembakan plasma dan oksidasi anodik diuji keausan dan gesekan temperatur tinggi serta uji sifat mekanik pernah dilakukan. *Carbon Fabric Composite* dengan oksidasi anodik menunjukkan sifat mekanik dan tribologi yang terbaik, dan *Carbon Fabric Composite* yang dietsa dengan  $\text{HNO}_3$  mempunyai sifat mekanik dan tribologi paling jelek. Sifat aus dan gesekan dari komposit serat karbon secara dekat tergantung pada temperatur lingkungan [13].

Jalinan serat karbon dari *polyacrylonitrile* yang diisi dengan serbuk, dipersiapkan melalui pencelupan serat karbon ke dalam perekat resin phenolic, yang mengandung serbuk untuk disatukan dalam proses *curing* selanjutnya. Disini ditemukan bahwa serbuk nano sebagai pengisi berkontribusi secara signifikan memperbaiki sifat mekanik dan ketahanan aus dari jalinan serat karbon [14].

Penelitian komposit karbon-karbon *unidirectional*, dikembangkan dengan teknik impregnasi/ karbonisasi tekanan tinggi, dengan *polyacrylonitrile* dan serat karbon berbasis *pitch* sebagai penguat dan *pitch* sebagai matriks *precursor* [15].

Pengembangan komposit karbon-karbon dua arah menggunakan teknik impregnasi/karbonisasi tekanan tinggi dengan jalinan serat karbon berbasis *polyacrylonitrile* sebagai penguat dan *coal tar* dan *pitch* sebagai *precursor* matriks pernah dilakukan. Pengaruhnya lebih jelas dalam komposit arah ganda

jika dibandingkan terhadap komposit arah tunggal [16].

Pengembangan komposit karbon berbasis *pitch* menunjukkan bahwa kuat tekan berhubungan dengan morfologi permukaan, struktur mikro dan kuat tekan dari kokas serbuk [17].

Sebuah eksperimen statis untuk mempelajari penurunan sifat material berbasis karbon oleh perendaman dalam semburan plasma. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah komposit yang diperkuat serat karbon dan grafit atau yang disebut komposit karbon-karbon. Percobaan ini menunjukkan bahwa kehilangan masa per satuan luas mendekati sebanding terhadap waktu terpapar dan secara kuat tergantung pada temperatur permukaan material [18].

Komposit karbon-karbon diterapkan sebagai material buatan untuk pengganti sambungan pinggul pernah dibuat. Material ini lolos kekuatan fatiq toleransi tinggi dan ketahanan korosi. Sebagai pra kondisi untuk mulai uji *biotribological*, biokompatibilitas specimen diuji melalui percobaan kultur sel di dalam *vitro*. Hasilnya menunjukkan bahwa specimen tersebut sesuai untuk penggunaan biomedik [19].

Pemodelan perilaku ablasi (pengikisan) komposit karbon-karbon yang digunakan di area *hot spot* dari ruang *reentry* dan kendaraan hipersonik pernah dilakukan. Paper ini memusatkan perhatian dengan pemodelan ablasi dari material komposit karbon-karbon [20].

Hasil Penelitian konduktivitas listrik *nanocomposites* berbasis *polypropylene* menyatakan bahwa penguat konduktif adalah grafit *nanoplatelets*, karbon hitam, serat karbon dan serat karbon *polyacrylonitrile*. Produk ini untuk magnet elektrik dan pelapis frekwensi radio seperti melindungi terhadap petir dalam pesawat, komponen baterai, kabel power dan membrane *fuel cell* [21].

Penambahan Zeolit Y ke dalam matriks polimer konduktif, untuk material sensor, menghasilkan densitas  $1.8331 - 2,0102 \text{ g/cm}^3$  dan konduktivitas elektrik  $10 \times 10^{-9} - 100 \times 10^{-6} \text{ (S/cm)}$  [22].

Pencampuran *polyaniline* dalam serat pulp yang disebarkan dalam reaksi polimerisasi untuk menghasilkan serat komposit polyaniline/pulp menghasilkan tensile strength  $1.5 \text{ N/mm}^2$  dan konduktivitas elektrik ( $<10^{-7}$ ) -  $1.9 \times 10^{-2} \text{ (S/cm)}$ , material ini digunakan untuk sebagai lapisan pelindung elektrode organik dan

konduktor [23].

Penelitian komposit berbasis serbuk alumina yang disisipkan dalam matriks karet alam menunjukkan sifat *electrorheological* dan *electrical* dari komposit berbasis serbuk alumina, phase yang dinamakan di dalam karet alam kering sebagai matriks. Peningkatan volume fraksi serbuk mengakibatkan peningkatan secara konstan konduktivitas elektrik [24].

Penelitian ini adalah tentang adhesif berbasis epoksi yang fokus dengan pemodelan sifat pengaruh ketebalan terhadap konduktiv dengan fraksi volume serbuk pengisi yang berbeda, yang mempunyai ukuran, bentuk, dan jenis yang berbeda. Penelitian ini menghasilkan konduktivitas elektrik 2,00E-03 sampai 1,67E-04 S/cm [25].

Penelitian yang dilakukan oleh Shen [26] terhadap ketahanan elektrik dari komposit matriks polimer berserat karbon menunjukkan konduktivitas elektrik dari 0.001 sampai 20 ( $\Omega \text{ mm}$ )<sup>-1</sup>.

Penelitian konduktivitas elektrik dari serbuk bersifat karbon menghasilkan konduktivitas elektrik dari 0.1 sampai 400 S/cm. Nilai konduktivitas elektrik dipengaruhi oleh tingkat densitas komposit karbon-karbon [27].

Berdasarkan latar belakang kajian artikel penelitian tentang komposit karbon-karbon, maka laporan ini adalah bukti telah dilakukan penelitian pembuatan komposit berbasis bahan karbon dari serbuk limbah batubara dan serbuk karbon limbah cangkang kelapa sebagai bahan penguat dalam matriks *coal tar pitch*, yang ditinjau dari sudut variasi ukuran karbon serbuk penguat dengan konsep penelitian sebagai berikut:

“Karakteristik komposit karbon-karbon berbasis limbah organik hasil proses tekan panas”. Peta perjalanan penelitian komposit karbon-karbon ditunjukkan pada Gambar 1.3.

### 1. 3. Kebaruan

Ringkasan tinjauan referensi jurnal penelitian tentang komposit karbon-karbon yang pernah dilakukan, menunjukkan bahan-bahan yang digunakan dan proses manufaktur yang diterapkan dalam membuat komposit karbon-karbon.

Empat jenis *pitch* (*coal-tar pitch*, *airblown pitch* dan dua *coal tar pitch* yang diperlakukan termal) dan empat jenis karbon (grafit, antrasit, *petroleum coke* dan *foundry coke*) digunakan sebagai persiapan komposit karbon. Empat jenis karbon adalah *petroleum coke* yang dikalsinasi, disuplai oleh industri [4]. Komposit yang dibuat dari serat karbon dalam berbagai arah dan polimer bersifat karbon dan *hydrocarbon* digunakan sebagai matriks *precursor*. Komposit ini dibuat dengan teknik deposisi uap kimia dengan gas hidrokarbon menghasilkan densitas menengah dan matriks dengan porositas rapat [3]. Penelitian komposit karbon-karbon menggunakan bahan berlapis dua setengah arah dengan urutan tumpukan, yang disediakan oleh industri, pernah dilakukan [5]. Pada tahun 2003 dikembangkan komposit dari bahan tipe serat karbon berbasis *Polyacrylonitrile* dari lembaran *non-woven* dan ketebalan unit pada sifat lendutan dari komposit karbon-karbon terhadap gradient tekanan infiltrasi uap kimia [6]. Pengembangan komposit karbon dengan bahan matriks *coal tar pitch* perendam komersial yang disediakan oleh industri sudah pernah dilakukan. Serbuk karbon yang digunakan sebagai pengisi adalah kokas petroleum muda (*green petroleum coke*), kokas foundry dan grafit yang disediakan oleh industri [7]. Empat jenis *pitch* sebagai matriks dan empat jenis karbon sebagai pengisi dari *green petroleum coke*, *petroleum coke*, *foundry coke* dan grafit yang disediakan oleh industri pernah digunakan sebagai bahan komposit karbon karbon [8]. Pada tahun 2001 pernah dilakukan pengembangan komposit karbon/phenolic menggunakan *prepreg* (*pre-impregnated*) jalinan dari *carbon/phenolic* yang memanfaatkan *prepreg* kain satin [9]. Empat jenis *pitch* dan 4 jenis karbon pengisi digunakan sebagai persiapan komposit karbon untuk sepatu rem karbon. Kokas petroleum muda (*green petroleum coke*), kokas pengecoran (*foundry coke*), grafit disediakan oleh industri [10]. Penelitian tentang penggunaan *mesophases* bersifat karbon sebagai matriks dalam pengembangan komposit karbon-karbon pernah dilakukan. Studi ini adalah pemodelan komputasi dari formasi tekstur dalam komposit karbon-karbon berdasarkan pada serat karbon dan prekursor *mesophase* bersifat karbon. Serat berukuran mikro yang disisipkan dalam *mesophase* menciptakan texture melalui penjangkaran (pengkaitan) yang kuat [11]. Lembaran grafit untuk memproduksi jalinan tebal berlubang jarum dengan teknik infiltrasi uap kimia isothermal dan

kemudian melalui impregnasi dengan resin phenolic dan karbonisasi pernah dilakukan [12]. Pembuatan komposit jalinan serat karbon dari *carbon fabric polyacrylonitrile* melalui pencelupan dalam perekat resin phenolic yang disediakan oleh industri pernah dilakukan pada tahun 2005 [13]. Pengembangan jalinan serat karbon dari *polyacrylonitrile* diisi dengan serbuk nano-SiO<sub>2</sub>, nano-TiO<sub>2</sub>, and nano-CaCO<sub>3</sub>, dipersiapkan melalui pencelupan serat karbon ke dalam perekat resin phenolic yang disediakan oleh industri pernah dilakukan [14]. Komposit karbon-karbon arah tunggal pernah dibuat pada tahun 2006, menggunakan serat karbon berbasis *polyacrylonitrile* kekuatan tinggi, serat karbon berbasis *pitch* modulus menengah, serat karbon *pitch* modulus tinggi dan serat karbon *pitch* modulus sangat tinggi sebagai penguat [15]. Jalinan serat karbon yang dibuat dari *polyacrylonitrile* kekuatan tinggi pernah digunakan untuk membuat komposit karbon-karbon arah ganda. Prekursor matriks yang digunakan untuk membuat komposit adalah *coal tar pitch* [16]. Penguat granular dari hancuran kokas *pitch*, hancuran kokas *pitch*, kokas metalurgi yang digrinda dan matriks *precursor* dari *coal tar pitch* yang disediakan oleh industri pernah digunakan untuk mengembangkan komposit karbon-karbon berbasis *pitch* [17]. Pengembangan komposit karbon-karbon tahan pengikisan termal yang diperkuat serat karbon dan grafit pernah dilakukan pada tahun 2010 [18]. Penggunaan kain karbon (*carbon fabrics*) berbasis *polyacrylonitrile* sebagai pra bentuk dan methane sebagai prekursor. Penelitian ini adalah tentang kepala tulang paha spherical dan mangkok acetabular dengan diameter dalam yang sama dari bahan komposit karbon [19]. Pada tahun 2010 pernah dilakukan membuat model perilaku ablasi (pengikisan) komposit karbon-karbon yang digunakan di area *hot spot* dari ruang *reentry* dan kendaraan hipersonik [20].

Berdasarkan kajian jurnal yang dijelaskan di atas, maka dapat disimpulkan bahwa bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan komposit karbon-karbon pada umumnya disediakan oleh fabrikasi komersial, baik bahan karbon sebagai penguat maupun bahan karbon sebagai matriks perekat.

Bahan-bahan penguat ada yang berbentuk serbuk, serat dan jalinan benang karbon (*fabric*). Jenis-jenis bahan ini di Indonesia belum ditemukan informasi

tentang industri karbon, baik bahan karbon berbentuk serbuk, serat ataupun berbentuk jalinan atau *fabric*.

Pengkajian terhadap jurnal-jurnal penelitian tentang komposit karbon-karbon tersebut juga menunjukkan, bahwa ternyata penelitian tentang komposit karbon-karbon berbasis bahan karbon serbuk dari limbah serbuk batubara dan serbuk karbon limbah cangkang kelapa dalam matriks *coal tar pitch* melalui proses *tekan panas* dan proses *curing* pirolisis belum pernah dilakukan, untuk menghasilkan material rekayasa komposit karbon-karbon yang mempunyai sifat fisik, mekanik tahan aus dan sifat konduktivitas elektrik.

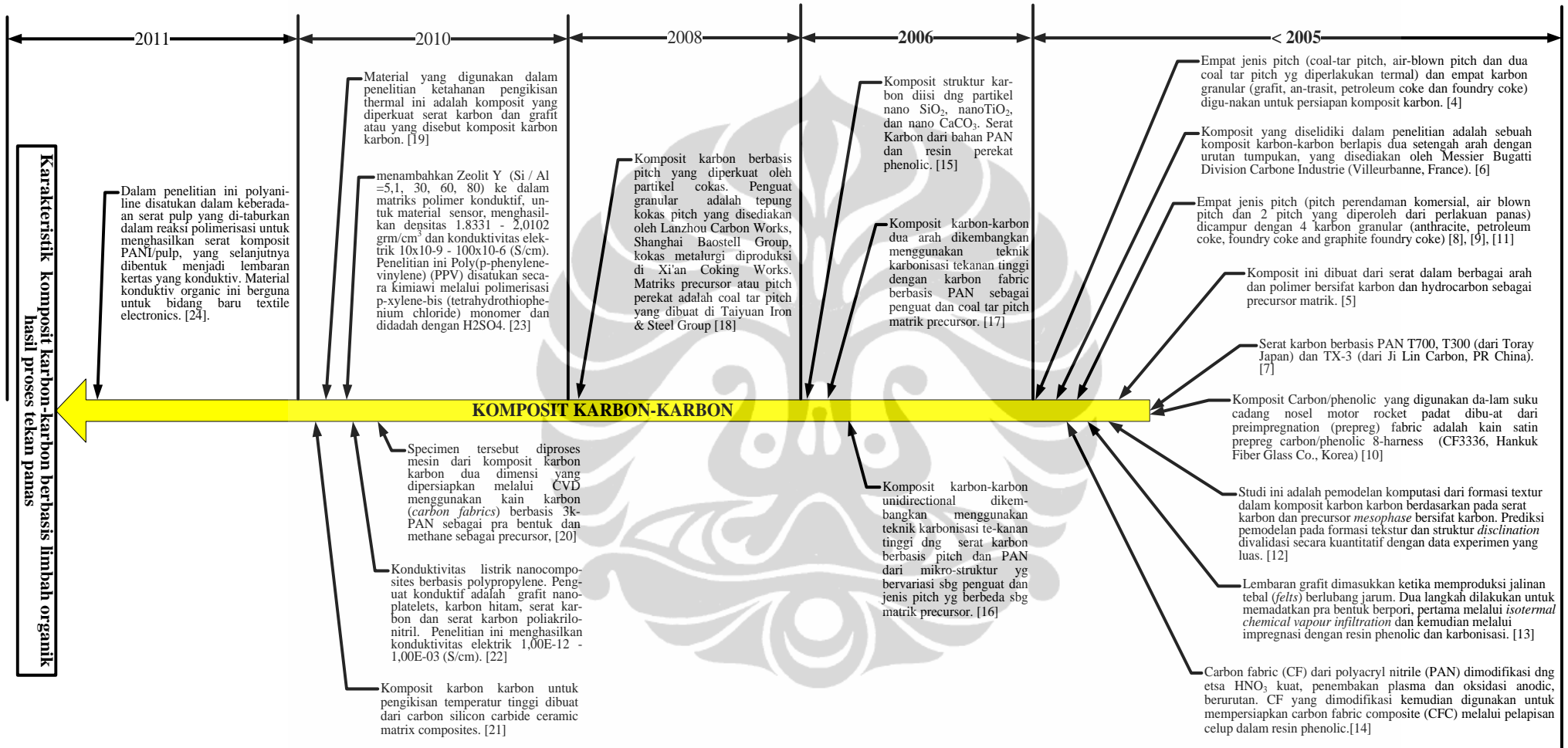
Berdasarkan konsep di atas maka kebaruan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Pemanfaatan limbah organik sebagai bahan penguat komposit karbon-karbon, yaitu limbah serbuk batubara dan serbuk karbon limbah cangkang kelapa.
- Proses pembuatan sampel pra bentuk menerapkan proses tekan panas pada temperatur 100°C.
- Proses *curing* pirolisis pra bentuk dalam temperatur 500°C menggunakan tungku vakum.
- Penerapan variasi ukuran karbon serbuk sebagai penguat dalam komposit karbon-karbon dalam hubungannya dengan sifat fisik, mekanik tahan aus dan sifat konduktivitas elektrik.

Untuk itulah maka dalam penelitian ini telah dilakukan rekayasa komposit karbon-karbon berbasis bahan serbuk limbah batubara dan serbuk karbon limbah cangkang kelapa dengan variasi ukuran serbuk dalam matriks *coal tar pitch* dengan proses *tekan panas* pada temperatur 100°C dan proses *curing* pirolisis 500°C yang menghasilkan karakteristik fisik, mekanik tahan aus dan sifat konduktivitas elektrik, dengan konsep sebagai berikut:

“Karakteristik komposit karbon-karbon berbasis limbah organik hasil proses tekan panas”.

Kajian dan pertimbangan jurnal referensi serta konsep kebaruan dari penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. 4.



Gambar 1. 3. Peta perjalanan (road map) penelitian Komposit Karbon-Karbon

#### 1. 4. Tujuan Penelitian

Pada umumnya pembuatan komposit karbon-karbon menggunakan bahan serat karbon yang diproduksi oleh fabrikasi komersial dan di Indonesia industri serat karbon belum ada, sehingga dalam penelitian ini bisa menjadi dorongan bagi industriawan untuk memproduksi serat karbon.

Penelitian ini secara umum bertujuan menentukan “karakteristik mekanik tahan aus dan konduktivitas elektrik komposit karbon-karbon berbasis limbah organik hasil proses tekan panas”.

Penelitian ini secara khusus bertujuan menentukan:

1. Pengaruh temperatur proses tekan panas terhadap sifat mekanik laju aus komposit karbon-karbon.
2. Pengaruh rasio komposisi campuran serbuk karbon batubara dan karbon cangkang kelapa dan ukuran serbuk terhadap sifat mekanik laju aus dan menentukan nilai laju aus terbaik.
3. Pengaruh rasio komposisi campuran serbuk karbon batubara dan karbon cangkang kelapa dan ukuran serbuk terhadap sifat mekanik kekuatan dampak dan menentukan kekuatan dampak terbaik.
4. Pengaruh rasio komposisi campuran serbuk karbon batubara dan karbon cangkang kelapa dan ukuran serbuk terhadap sifat konduktivitas elektrik dan menentukan konduktivitas elektrik terbaik.

Material rekayasa komposit karbon-karbon yang diteliti difabrikasi dengan proses kompaksi panas berbasis serbuk limbah batubara dan serbuk limbah cangkang kelapa sebagai bahan penguat dan *coal tar pitch* sebagai matriks dalam variasi ukuran serbuk penguat untuk menghasilkan sifat fisik, mekanik tahan aus dan sifat konduktivitas elektrik.

#### 1. 5. Permasalahan

Berdasarkan rumusan batasan masalah diatas, maka masalah utama yang diungkapkan dalam penelitian ini adalah:

Proses fabrikasi komposit karbon-karbon berbasis limbah organik yang dikarbonisasi, dengan proses tekan panas dan pirolisis untuk menyatukan dua jenis serbuk karbon menjadi komposit karbon-karbon.



## 1. 6. Rumusan batasan masalah

Material komposit karbon-karbon berbasis serbuk limbah batubara dan limbah cangkang kelapa terdiri dari tiga bentuk bahan dasar yaitu dua jenis bahan dasar karbon berbentuk serbuk dari serbuk limbah batubara dan limbah cangkang kelapa sebagai penguat dan bahan dasar *coal tar pitch* berfungsi sebagai matriks perekat, sehingga konsep komposit karbon-karbon adalah serbuk penguat karbon dalam bentuk padatan atau serbuk padat dalam matriks *coal tar pitch* yang dicairkan. Kedua material tersebut dicampurkan, dikompaksi dalam bentuk padat sambil dipanaskan, kemudian hasil kompaksi tersebut dipanaskan lagi (*curing* atau *sintering*), sehingga melalui proses pirolisis akan merubah matriks perekat menjadi karbon yang lebih memperkuat rekatan terhadap serbuk penguat maka terbentuklah komposit karbon.

Berdasarkan konsep di atas maka dalam penelitian ini dipersiapkan:

1. Bahan karbon diambil dari bahan dasar serbuk limbah batubara dan limbah cangkang kelapa, diuji komposisi carbon, hydrogen, nitrogen, sulfur, oksigen atau CHNSO, limbah batubara menunjukkan hasil dengan kandungan 72%C dan limbah cangkang kelapa menunjukkan hasil dengan kandungan 99%C.
2. *Coal tar pitch* berfungsi sebagai matriks perekat, diuji komposisi CHNSO menunjukkan hasil dengan kandungan 85% C.
3. Peralatan proses kompaksi panas (Tekan panas).
4. Tungku vakum untuk proses *curing*

Dua jenis bahan serbuk karbon penguat, satu jenis bahan matriks *coal tar pitch*, satu proses pemanasan dan penekanan (tekan panas) dan satu proses *curing* tersebut, maka dapat dihasilkan sebuah material rekayasa komposit karbon-karbon. Penelitian rekayasa material komposit karbon-karbon ini dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa batasan yang diterapkan dalam penelitian ini sebagai berikut:

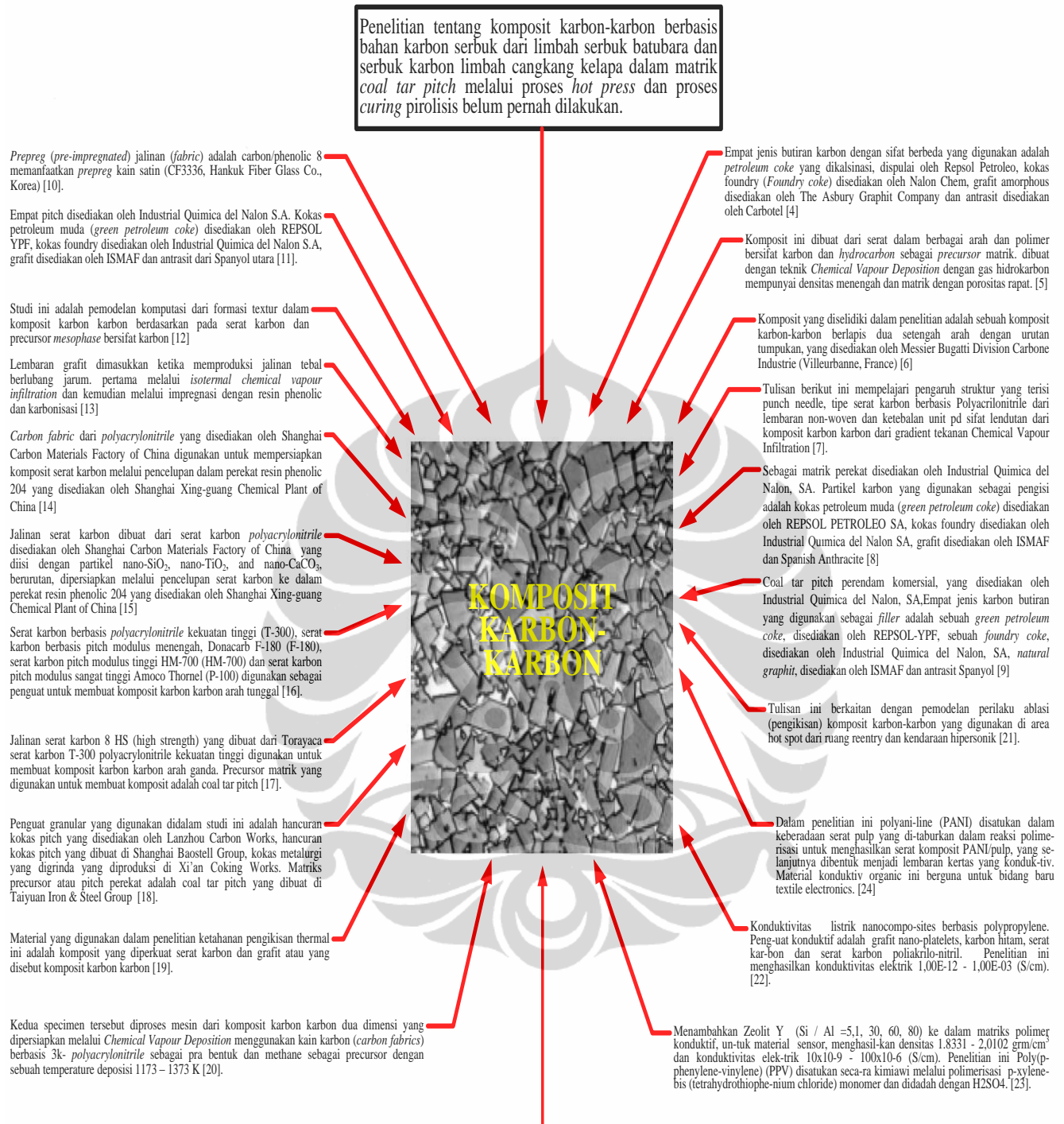
1. Ukuran serbuk dalam penelitian ini ditetapkan bervariasi dalam mesh 100; 150; 200; 250. Pemilihan ukuran mesh ini dengan pertimbangan ukuran kelonggaran sisi cetakan antara *dies* dan *punch*. Ukuran kelonggaran sisi *dies* dan *punch* adalah 0,5 mm setara dengan 500  $\mu\text{m}$ . Hal ini

menunjukkan bahwa kelonggaran sisi cetakan lebih besar daripada ukuran serbuk, misalnya untuk mesh 250 setara dengan 0.0610 mm atau 61  $\mu\text{m}$ .

2. Fraksi berat rasio komposisi antara serbuk penguat dengan matriks dalam penelitian ini ditetapkan fraksi berat serbuk penguat 70% dan matriks *coal tar pitch* 30%. Pemilihan ratio berdasarkan pertimbangan referensi bahwa matriks biasanya menyusun 30% - 40% struktur komposit.
3. Beban kompaksi pemadatan dalam *dies Tekan panas* ditetapkan dalam bentuk tekanan dalam *dies* maka tekanan kompaksi 794  $\text{kgf/cm}^2$  atau setara dengan 77,88 MPa atau 778,75 bar.
4. Temperatur kompaksi panas proses *Tekan panas* untuk meningkatkan kekuatan mekanik dan fisik komposit ditetapkan 100 $^{\circ}\text{C}$ , dengan waktu penahanan panas temperatur tersebut 30 menit.
5. Temperatur *curing* untuk memperbaiki ikatan serbuk ditetapkan 500 $^{\circ}\text{C}$  dalam dapur vakum dengan atmosfer gas nitrogen. Pemilihan temperatur berdasarkan pertimbangan dari hasil pengujian *thermogravimetri analyzer* yang menunjukkan bahwa proses karbonisasi bahan-bahan yang dicampurkan terjadi mulai menit ke 25 sampai pada menit ke 75 sama dengan selama 50 menit, pada temperatur mulai dari  $\pm 300^{\circ}\text{C}$  sampai dengan 800 $^{\circ}\text{C}$ .
6. Pengujian sifat mekanik dilakukan hanya terhadap kekuatan tekan, kekerasan, laju aus, dan kekuatan impak.
7. Pengujian sifat elektrik dilakukan hanya terhadap konduktivitas elektrik.

### 1. 7. Hipotesis Penelitian

Rekayasa material komposit karbon-karbon ini melibatkan serbuk karbon limbah batubara dan serbuk karbon cangkang kelapa sebagai serbuk penguat, dan *coal tar pitch* sebagai matriks perekat. Variasi ukuran serbuk dan komposisi campuran serbuk karbon batubara dan karbon cangkang kelapa menjadi varian dalam penelitian ini.



Untuk itulah maka dalam penelitian ini telah dilakukan rekayasa material komposit karbon karbon berbasis bahan serbuk limbah batubara dan serbuk karbon limbah cangkang kelapa dalam matrik coal tar pitch dengan variasi ukuran serbuk penguat dalam proses Hot Press yang mempunyai sifat mekanik tahan impact kecepatan tinggi, dengan konsep sebagai berikut:

**Karakteristik komposit karbon-karbon berbasis limbah organik hasil proses tekan panas**

Gambar 1. 4. Peta konsep kebaruan penelitian

Rekayasa material komposit karbon-karbon ini melibatkan proses *Tekan panas* sebagai proses kompaksi dan proses *curing* terhadap pra bentuk untuk meningkatkan ikatan antar serbuk yang berlaku konstan sama terhadap semua varian ukuran serbuk maupun komposisi campuran. Berdasarkan konsep ini, maka hipotesis penelitian ini adalah:

“Karakteristik mekanik tahan aus dan konduktivitas elektrik komposit karbon-karbon berbasis limbah organik hasil proses tekan panas dipengaruhi oleh ukuran serbuk, rasio komposisi campuran karbon dan temperatur”.



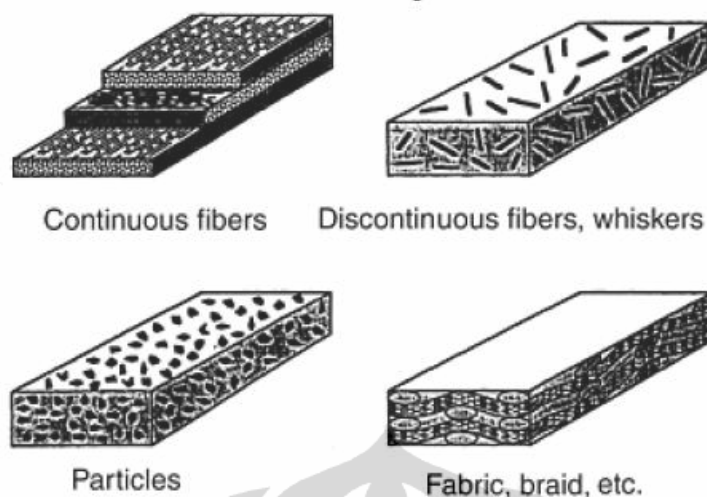
## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2. 1. Komposit

Material komposit adalah material rekayasa yang dibuat dari pencampuran dua atau lebih material untuk menciptakan sebuah kombinasi sifat material yang baru dan unik. Definisi di atas lebih umum dan dapat meliputi paduan metal, *plastic copolymer*, bahan tambang dan kayu. Material komposit berpenguat serat berbeda dari material di atas, yang di dalamnya, material pendukungnya berbeda pada tingkat molekuler dan dapat dipisahkan secara mekanika. Dalam bentuk *bulk*, material pendukung bekerja sama tetapi tetap dalam sifat aslinya. Sifat akhir dari material komposit lebih baik dari pada sifat material pendukungnya. Komposit didefinisikan sebagai sebuah kombinasi dari dua atau lebih komponen yang berbeda dalam bentuk atau komposisi pada skala makro, dengan dua atau lebih fasa yang berbeda yang mempunyai ikatan antarmuka yang diketahui antara dua komponen tersebut [1].

Material komposit dibentuk dari material penguat yang disisipkan dalam matriks perekat. Metode efektif untuk meningkatkan kekuatan dan memperbaiki sifat keseluruhan adalah dengan menyatukan fasa serbuk atau serat yang ditebarkan ke dalam matriks.

Komposit umumnya dikelompokkan pada dua tingkat berbeda. Kelompok pertama dibuat berdasarkan pendukung matriksnya. Kelompok komposit utama meliputi komposit matriks organik, komposit matriks metal, dan komposit matriks keramik. Istilah “komposit matriks organik” umumnya dipahami meliputi dua kelompok yaitu: komposit matriks polimer dan komposit matriks karbon (umumnya ditunjukkan sebagai komposit karbon-karbon). Komposit matriks karbon sebenarnya dibentuk dari komposit matriks polimer melalui pemasukan langkah extra dari karbonisasi dan densifikasi matriks polimer asal. Kelompok kedua merujuk pada bentuk penguatnya, misalnya penguat serbuk, penguat *whisker*, serat memanjang, komposit tenunan, seperti Gambar 2. 1. Serat atau serbuk penguat bisa dalam bentuk serbuk jika dari semua dimensinya secara kasar sama.



Gambar 2. 1. Bentuk umum dari penguat serat. Umumnya serat penguat bisa serat panjang lurus, serat putus-putus atau serat cincang, serbuk atau serpihan, atau serat memanjang yang dirajut, *braided*, atau *knitted* [2].

## 2. 2. Fungsi SERAT dan MATRIKS.

Material komposit dibentuk misalnya melalui penguatan plastik dengan serat atau serbuk. Untuk mengembangkan pemahaman yang baik tentang sifat komposit, di sini dijelaskan tentang peran bahan serat atau serbuk dan bahan matriks dalam komposit.

Fungsi utama serat atau serbuk dalam komposit adalah: [1]

- a) Untuk membawa beban. Dalam komposit struktur, 70 – 90% beban didukung oleh serat.
- b) Untuk memberikan kekakuan, kekuatan, stabilitas panas, dan sifat struktur lainnya dalam komposit.
- c) Menyediakan penghantaran atau insulasi elektrik, tergantung pada jenis serat atau serbuk yang digunakan.

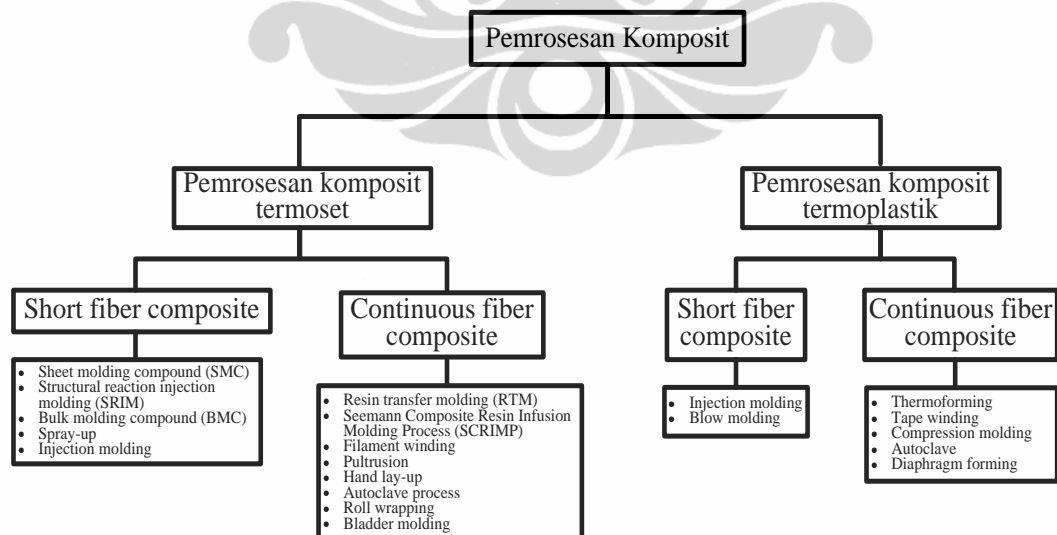
Fungsi penting material matriks adalah: [1]

- a) Material matriks mengikat serat atau serbuk bersama-sama dan menghantarkan beban ke serat dan serbuk. Matriks memberikan kekakuan dan bentuk terhadap struktur.
- b) Matriks mengisolasi serat atau serbuk sehingga masing-masing dapat bekerja secara terpisah. Hal ini dapat menghentikan atau memperlambat propagasi retak.

- c) Matriks memberikan kualitas permukaan akhir yang baik dan membantu produksi bentuk jadi atau mendekati bentuk jadi (bentuk akhir komponen).
- d) Matriks memberikan perlindungan untuk serat atau serbuk penguat terhadap serangan kimia (misalnya korosi) dan kerusakan mekanik (misalnya aus).
- e) Bergantung pada bahan matriks yang dipilih, mempengaruhi karakteristik unjuk kerja seperti duktilitas (liat, kenyal), kekuatan impak, dan lain lain. Sebuah matriks yang kenyal akan meningkatkan ketangguhan struktur. Untuk persyaratan ketangguhan yang lebih tinggi, bisa dipilih komposit berbasis termoplastik.
- f) Mode kegagalan sebagian besar dipengaruhi oleh jenis bahan matriks yang digunakan dalam komposisi dan juga kompatibilitasnya terhadap serat.

### 2. 3. Proses Pembuatan Komposit

Proses adalah ilmu mengubah material dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Karena material komposit melibatkan dua atau lebih material, teknik pemrosesan yang diterapkan pada komposit sangat berbeda dengan yang diterapkan untuk pemrosesan metal.



Gambar 2. 2. Klasifikasi teknik pemrosesan komposit [1].

Terdapat bermacam-macam teknik pemrosesan komposit yang tersedia untuk memproses bermacam tipe sistem resin dan penguat. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2. 2 .

#### 2. 4. Komposit matriks karbon.

Komposit matriks karbon terdiri dari matriks karbon yang diperkuat dengan kombinasi serat, *whiskers*, atau serbuk karbon. Selama beberapa tahun, komposit matriks karbon yang signifikan adalah hanya komposit karbon-karbon, dimana penguatnya adalah serat karbon *continuous* atau *discontinuous* atau serbuk. Komposit karbon-karbon digunakan dalam bermacam-macam penerapan, meliputi *electronic packaging*, *panel radiator* pesawat ruang angkasa, *nozzle rocket*, *reentry vehicles nose tips*, *space shuttle orbiter leading edge and nose cap*, *aircraft brakes*, dapur perlakuan panas, dan peralatan pembuatan kaca.

Keuntungan utama komposit karbon-karbon adalah: [28]

- a. Kekuatan yang tinggi dibandingkan dengan material lain pada temperatur sangat tinggi.
- b. Kekakuan yang tinggi.
- c. Tahan penguapan atau penglupasan pada kecepatan tinggi (*ablation*).
- d. Konduktifitas termal tinggi.
- e. Koefisien muai panas yang rendah.
- f. Densitas rendah.
- g. Tidak ada pencemaran akibat pelepasan gas.

Kelemahan utama komposit karbon-karbon adalah: [28]

- a. Rentan terhadap oksidasi pada temperatur sekitar 370 sampai 500°C.
- b. Tegangan tarik interlaminar dan tegangan geser yang rendah untuk material dengan penguatan dua arah penguatan.
- c. Microcracking tegangan rendah dalam beberapa arah untuk komposit tiga arah penguatan.
- d. Biaya tinggi dari kebanyakan sistem.

Faktor-faktor yang mempengaruhi sifat komposit meliputi jenis serat, bentuk penguat, orientasi dan karakteristik matriks dan fraksi volume. Matriks karbon umumnya material yang lemah, rapuh dan kekakuan rendah.



Seperti untuk semua jenis komposit, sifat komposit karbon-karbon juga bergantung pada penguat, matriks, ikatan antarmuka matriks dan serat penguat, dan proses pembuatan komposit karbon-karbon [28].

## 2. 5. Pembuatan serat karbon

Sumber bahan awal yang digunakan adalah *polyacrylonitrile*, *pitch* dan rayon. Meskipun detail proses spesifik untuk masing-masing bahan awal berbeda, tetapi semua mengikuti urutan dasar yang meliputi pemintalan, stabilisasi, karbonisasi, dan *sizing* untuk memudahkan penanganan. Serat karbon pendek (*whiskers*) sekarang juga diproduksi dalam proses bertingkat dari gas *hydrocarbon* yang menggunakan mekanisme pembentukan solid – liquid – uap.

Serat karbon berbasis *polyacrylonitrile*. Mayoritas serat karbon yang digunakan saat ini dibuat dari bahan *polyacrylonitrile*, yang adalah bentuk dari serat acrylic. Pembuatan bahan awal disusun dari pemintalan polimer *polyacrylonitrile* menjadi *filament* yang menerapkan varian proses pembuatan serat tekstil standard. Serat *polyacrylonitrile* berwarna putih, dengan densitas mendekati  $1,17 \text{ g/cm}^3$  dan struktur molekul yang terdiri atas molekul rantai panjang.

Serat berbasis *pitch*. *Pitch* adalah campuran yang kompleks dari *hydrocarbon aromatic* dan dapat dibuat dari *petroleum*, *coal tar*, dan *asphalt*. *Pitch* harus diproses melalui sebuah langkah perlakuan awal untuk memperoleh viscositas dan berat molekul dalam persiapan untuk membuat serat karbon unjuk kerja tinggi yang diinginkan [2].

## 2. 6. Sifat dan karakteristik serat karbon.

Komposit yang dibuat dari serat karbon lima kali lebih kuat daripada baja untuk komponen struktur, juga masih lima kali lebih ringan. Sebagai perbandingan terhadap aluminium, komposit serat karbon tujuh kali lebih kuat dan dua kali lebih kaku, juga 1,5 kali lebih ringan. Komposit serat karbon mempunyai sifat lelah yang super terhadap semua metal yang dikenal, dan ketika berpasangan dengan resin yang tepat, komposit serat karbon adalah salah satu bahan yang ada yang paling tahan korosi. Konduktivitas elektrik dari serat karbon berbasis *pitch* dan *polyacrylonitrile* digunakan untuk membuang elektrik static

dalam variasi yang luas dari produk berkaitan computer [2].

Serat grafit atau karbon telah menunjukkan variasi kekuatan dan modulus yang luas dan mempunyai jumlah ketersediaan yang besar, seperti ditunjukkan Tabel 2. 1 dan 2. 2

Tabel 2. 1: Serat karbon berbasis (PAN) *Polyacrylonitrile* [2].

Sifat	Komersial, modulus standard	Aerospace		
		Modulus standard	Modulus menengah	Modulus tinggi
Modulus tarik, GPa	228	220 – 241	290 – 297	345 – 448
Kekuatan tarik, MPa	380	3450 – 4830	3450 – 6200	3450 – 5520
Perpanjangan pada patahan, %	1,6	1,5 – 2,2	1,3 – 2,0	0,7 – 1,0
Ketahanan Elektrik, $\mu\Omega$ .cm	1650	1650	1450	900
Koduktivitas panas, W/m.K	20	20	20	50 – 80
Koefisien ekspansi panas, arah aksial, $10^{-6}$ K	-0,4	-0,4	-0,55	-0,75
Densitas, g/cm <sup>3</sup>	1,8	1,8	1,8	1,9
Kandungan karbon, %	95	95	95	+99
Diameter Filamen, $\mu$ m	6 – 8	6 – 8	5 – 6	5 – 8

Tabel 2. 2: Serat karbon berbasis PITCH [2].

Sifat	Modulus rendah	Modulus tinggi	Modulus sangat-tinggi
Modulus tarik, GPa	170 – 241	380 – 620	690 – 965
Kekuatan tarik, MPa	1380 – 3100	1900 – 2750	2410
Perpanjangan pada patahan, %	0,9	0,5	0,4 – 0,27
Ketahanan Elektrik, $\mu\Omega$ .cm	1300	900	220 – 130
Koduktivitas panas, W/m.K	...	...	400 – 1100
Koefisien ekspansi panas, arah aksial, $10^{-6}$ K	...	-0,9	-1,6
Densitas, g/cm <sup>3</sup>	1,9	2,0	2,2
Kandungan karbon, %	+97	+99	+99
Diameter Filamen, $\mu$ m	11	11	10

Kandungan karbon dari serat karbon modulus rendah adalah kurang dari 99%, sebagian besar adalah karena nitrogen yang tertahan. Peningkatan kandungan karbon dan densitas dicapai melalui temperatur perlakuan panas yang lebih tinggi, yang membuang nitrogen dan memberikan kesempurnaan kristalin yang lebih besar. Konduktivitas panas dan elektrik juga meningkat dengan peningkatan kemurnian dan kesempurnaan kristalin. Konduktivitas elektrik dari serat karbon harus diperhitungkan ketika proses, karena serat yang mengambang bebas dapat menciptakan hubung singkat pada perlengkapan elektrik [2].

Koefisien muai panas pada temperatur ruang dalam arah aksial sedikit negatif untuk serat karbon modulus rendah, dan meningkat negatif untuk serat

karbon dengan modulus yang lebih tinggi. Pada temperatur di atas 700°C koefisien ekspansi panas arah aksial dari semua serat karbon berbalik ke arah positif [2].

Ikatan antarmuka. Resin dan metal cair tidak mudah membasahi serat karbon, karena relatif lembam, permukaan serat non-polar. Serat kaca tergantung pada zat pasangannya untuk mengikat secara kimiawi dengan resin, serat karbon tidak pernah mencapai ikatan yang kuat. Sebagai gantinya, serat karbon bergantung pada kombinasi ikatan kimia yang lemah dan ikatan mekanik dengan bahan matriks. Perlakuan permukaan yang diterapkan oleh produsen serat karbon melapisi permukaan serat dengan kelompok kimia aktif seperti *hydroxyls*, *carboxyls* dan *carbonyls*. Teknik ini menjembatani antara serat dan resin matriks, dan tergantung pada jumlah ikatan daripada kekuatan ikatan untuk ikatan antar permukaan yang kuat [2].

## 2. 7. Metode pembentukan matriks karbon

Pertimbangan umum. Karbon tidak meleleh atau mengalir bahkan pada temperatur sangat tinggi, maka jika digunakan menjadi matriks harus dalam bentuk pra solid atau pra karbon. Inklusi dalam sebuah matriks dapat dilakukan dalam bermacam cara. Metode paling awal yang diterapkan adalah melalui pemasukkan cairan pra karbon yang diikuti solidifikasi dan karbonisasi dari pembentuk awal (prekursor) karbon. Kemudian, matriks tersebut terbentuk oleh pemasukkan gas yang mengandung karbon ke dalam sampel berpori yang panas, dengan penguraian kimiawi selanjutnya dari gas terhadap karbon solid dasar di dalam sampel berpori. Dalam hal infiltrasi cairan, sifat alir cairan dapat juga digunakan untuk dimasukkan karbon solid yang tergerus secara halus atau memodifikasi material menjadi matriks sebagai pengisi atau pengubah untuk bermacam sifat penggunaan akhir [2].

Pra bentuk pendahulu (prekursor) cair (*liquid*), adalah salah satu dari tiga jenis yang umum: *thermoplastic* (viskositas menurun dengan temperatur), *thermosetting* (berubah atau *transforming* menjadi nonfluid pada temperatur yang ditingkatkan), dan berbentuk uap (*evaporative*) atau pembawa larutan (keseluruhan menghilang selama pemrosesan lanjutan).

Jenis *thermoplastic* relatif mudah diproses menjadi komposit bukan karbon, tetapi tantangan signifikan saat ini adalah mengubahnya menjadi karbon murni. Sifat *thermoplastiknya* mensyaratkan bahwa ia juga diisikan di dalam sampel melalui cara eksternal, atau diperlakukan secara kimiawi (distabilisasikan) sebelum pemanasan ke temperatur karbonisasi [2].

Material *pitch* berbasis batubara atau *petroleum* adalah contoh yang baik dari jenis ini. Kebanyakan *pitch* adalah padat pada temperatur ruang. *Pitch* dapat dihancurkan dalam larutan mudah menguap atau dipanaskan untuk menurunkan viskositasnya sampai titik yang ia dapat menginfiltrasi sampel pra bentuk berpori. Karena *pitch* meleleh sebelum karbonisasi, sampel yang akan diisi harus ditahan di dalam tabung tertutup yang, pada temperatur cair *pitch*, merendam sampel secara sempurna di dalam cairan *pitch* [2].

Cairan dapat masuk ke pori-pori sampel melalui aksi kapiler atau melalui penggunaan tekanan eksternal. Ketika material terus dipanaskan, *pitch* tersebut akan mulai membeku (mengeras) melalui reaksi kondensasi, sebuah proses pelepasan gas. Peningkatan temperatur lebih jauh menyebabkan dekomposisi (penguraian) untuk membentuk karbon padat, tetapi tidak terjadi fase fluid dan karbon tertahan di dalam sampel. Hasil bersihnya adalah bahwa sebuah proses yang menggunakan jenis prekursor karbon ini memerlukan langkah-langkah fluidisasi (pencairan) melalui panas ataupun larutan, infiltrasi, *confinement* (pemasukkan) dan stabilisasi, karbonisasi akhir, dan pengeluaran sampel dari prekursor sisa karbonisasi. Bentuk *thermoplastic* lainnya dapat dilakukan dengan cara yang sama [2].

Cairan *thermosetting*. Pada temperatur yang ditingkatkan, cairan *thermosetting* memiliki sifat *curing* sampai suatu kepadatan yang tidak akan meleleh pada temperatur tinggi. Dari perspektif proses fabrikasi, ini adalah sifat yang sangat berguna, karena material penguat dapat di rendam awal (*preimpregnated*) dengan material pendahulu (prekursor), pemadatan dan dicetak panas (*heat molded*), dan di-*cured* (dipanaskan sampai mencapai pengerasan) sampai sebuah *nearnet shape* tercapai dalam satu langkah. Hasil *nearnet shape* kemudian dapat dikarbonisasi dan diproses lebih lanjut untuk menyelesaikan struktur komposit tanpa alat bantu [2].

Pembentuk awal penguap (*Evaporative precursor*). Metode ini menggunakan cairan pembawa (*carrier fluid*), yang diuapkan sebelum karbonisasi, untuk membawa material yang dihaluskan (*powdered*) ke dalam struktur penguat; serbuk itu sendiri tidak mempunyai daya alir (*fluidity*) bahkan pada temperatur sangat tinggi. Dalam teknik ini, cairan pembawa berisi padatan dimasukkan ke serat penguat melalui proses *preimpregnation* atau melalui langkah-langkah perendaman/pencelupan (*soaking*) dan penguapan berkali-kali. Tujuannya adalah untuk mendapatkan kandungan karbon yang sangat tinggi di dalam matriks sebelum karbonisasi. Karbonisasi lanjutannya kemudian menghasilkan karbon yang unggul di dalam komposit sekaligus menurunkan jumlah siklus proses [2].

Sifat dan karakteristik proses. Semua metode prekursor cair, untuk menghasilkan sebuah matriks karbon mengalami salah satu masalah, material prekursor tersebut selalu mempunyai kandungan karbon yang lebih rendah per satuan volume daripada jumlah matriks karbon yang sesungguhnya diperlukan. Oleh karena selalu terdapat penurunan volume prekursor ketika proses berjalan ke matriks akhir. Terlebih lagi, kebanyakan material prekursor cair kehilangan beberapa kandungan karbonnya dan semua kandungan nonkarbonnya selama proses karbonisasi.

Kehilangan masa dan volume ini mengakibatkan kepadatan komposit yang dikarbonisasi awal menjadi berpori dan lemah setelah karbonisasi. Kondisi ini bisa diperbaiki melalui reimpregnasi dan langkah karbonisasi berkali-kali, sampai mengurangi kembali porositas sekitar 5 – 10%. Material *pitch*, ketika diproses pada tekanan tinggi, dapat memberikan hasil sekitar 80%. Hasil karbon dapat ditingkatkan melalui pemilihan prekursor, melalui penggunaan *filler*, atau melalui pelaksanaan karbonisasi pada tekanan tinggi untuk mengurangi kehilangan *species* karbon yang menguap selama karbonisasi. Impregnasi tekanan tinggi dan metode karbonisasi dikembangkan secara khusus untuk mengatasi masalah kehilangan masa dalam material *pitch* [2].

## 2. 8. Kontribusi matriks terhadap sifat komposit

Semua bentuk matriks menunjukkan stabilitas karakteristik *thermal* dan kimia dari karbon, tetapi tidak semua menghasilkan sifat akhir yang sama pada komposit. Meskipun sifat komposit sering kali didominasi oleh sifat penguat, tetapi beberapa sifat, seperti geseran dan tarik didominasi oleh matriks. Terlebih lagi, sifat-sifat seperti konduktivitas *thermal* dan elektrik dapat dipengaruhi secara kuat oleh jenis bahan matriks. Bahkan sifat struktur yang lebih tradisional dipengaruhi oleh densitas dan porositas dari komposit, yang hampir keseluruhannya adalah karena matriks atau karena proses pembentukan matriks. Akhirnya, beberapa sifat unjuk kerja komposit, seperti koefisien gesekan dan aus dalam kanvas rem dan *clutches*, adalah fungsi yang kompleks dari sifat utama komposit yang bahan matriks dan prosesnya tidak dapat diabaikan [2].

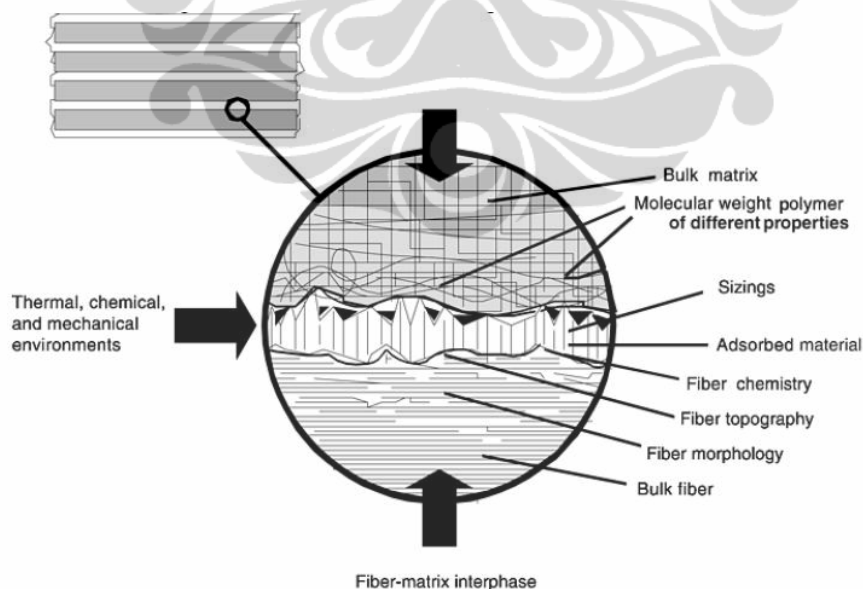
## 2. 9. Ikatan antar muka dan *Interphase*

Material komposit adalah kombinasi dari dua atau lebih unsur utama, salah satu yang mempunyai sifat mekanik super tetapi sulit untuk membentuknya (misalnya, serat, serbuk dll). Unsur utama yang super ini biasanya adalah penguat, sementara unsur utama yang lain adalah matriks yang melayani sebagai medium dimana penguat ditanamkan dan melayani sebagai penghantar beban luar dari serat penguat ke serat penguat. Komposit akhir adalah sebuah material yang mempunyai sifat mendekati sifat yang dimiliki unsur utama penguat, tetapi dalam bentuk yang dapat secara mudah difabrikasi menjadi komponen struktur. Termasuk dalam definisi material penguat ini adalah serbuk, serat, *flake* dan penguat lembaran [2].

Ikatan antarmuka. Sejak mula, sifat material komposit telah diprediksikan pada penerapan hubungan sifat struktur yang memperhitungkan unsur utama matriks dan serat. Faktor-faktor seperti, komposisi unsur utama, morfologi fisik, dan pengaturan geometrik telah disatukan dalam model yang dapat memprediksi sifat mekanik komposit. Suatu ikatan antarmuka yang optimal diperlukan bagi komposit untuk mencapai ketahanan lingkungan dan sifat mekanik dinamik dan statik yang maksimum. Sebenarnya, perekatan antarmuka antara serat dan matriks didasarkan pada metoda empirik untuk optimisasi dalam banyak komposit komersial yang dipasarkan saat ini. Dalam material komersial yang optimal,

fungsi ikatan antarmuka sebagai sebuah penghantar yang efisien dari beban antara serat dan matriks. Seperti demikian, sepanjang ikatan antarmuka adalah tetap utuh, sifat material komposit dapat dijelaskan secara cukup melalui model yang menganggap perekatan ideal antara serat dan matriks dan mempertimbangkan ikatan antarmuka menjadi batas dua dimensi [2].

*Interphase.* Perekatan serat-matriks dilihat sebagai kriteria yang perlu untuk mencapai sifat komposit yang diinginkan. Dalam definisi, *interphase* terjadi dari beberapa titik di dalam serat, dimana sifat lokal mulai berubah dari sifat *bulk* serat, menjadi matriks dimana sifat lokal menyamai kembali sifat *bulk*, melalui ikatan antarmuka serat-matriks yang sebenarnya. Kondisi yang diperlukan untuk interaksi ikatan antarmuka yang dapat diterima antara penguat dan matriks ditentukan oleh energi bebas permukaan dari dua unsur tersebut. Biasanya ini berarti bahwa energi permukaan dari penguat harus lebih besar daripada yang dari matriks. Sekali permukaan serat dan matriks terjadi kontak, ikatan fisik dan kimia dapat terbentuk pada ikatan antarmuka tersebut. Senyawa kimia permukaan penguat dapat bereaksi dengan senyawa kimia dalam matriks, yang membentuk ikatan kimia. Gaya-gaya tarik menarik Van der Waals, ikatan hidrogen, dan ikatan elektrostatik dapat juga terbentuk, yang bergantung pada sistem.



Gambar 2. 3. Diagram skematik interphase serat-matriks dan beberapa faktor yang berkontribusi terhadap pembentukannya [2].

Jumlah dan jenis masing-masing secara kuat mempengaruhi interaksi (perakatan) antara serat dan matriks. Struktur dan sifat matriks dalam *interphase* dapat juga dipengaruhi oleh kedekatannya terhadap permukaan serat. Keberadaan penguat dan keadaan fisik dan kimianya dapat mengubah morfologi lokal dari matriks di dalam daerah *interphase*. Ketidakmurnian dan komponen matriks yang tidak bereaksi dapat menyebar ke daerah *interphase*, yang mengubah struktur lokal dan bertentangan dengan kontak yang baik antara serat dan matriks atau menghasilkan sebuah material dengan sifat mekanik yang kecil. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2. 3. [2].

## 2. 10. Teori perekatan (*adhesion*)

Berbagai macam teori mencoba menjelaskan fenomena perekatan. Tidak ada teori tunggal yang menjelaskan perekatan dalam cara yang umum. Pengetahuan teori perekatan dapat membantu memahami syarat dasar sebuah ikatan yang baik.

Perekatan mekanik. Permukaan dari sebuah material solid tidak pernah benar-benar halus tetapi terdiri dari jaringan lembah dan puncak *microscopic*. Berdasarkan teori perekatan mekanik, perekat harus penetrasi rongga-rongga pada permukaan dan menggantikan udara yang terjebak pada ikatan antarmuka tersebut.

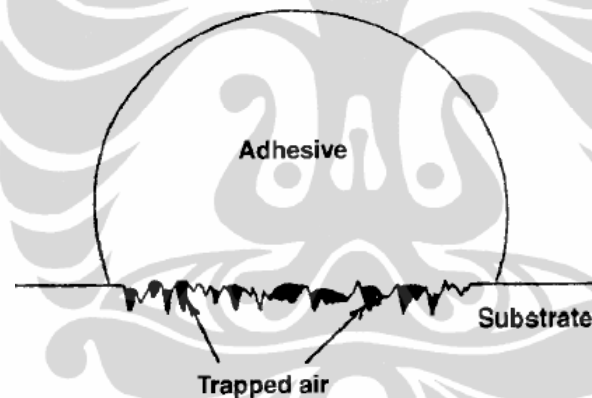
Penjangkaran mekanik yang timbul menjadi faktor utama ikatan pada banyak bahan berpori. Perekat juga sering kali mengikat lebih baik terhadap permukaan yang terkelupas daripada terhadap permukaan aslinya. Efek yang menguntungkan ini mungkin karena *interlocking* mekanik, formasi permukaan yang bersih, formasi permukaan yang lebih reaktif dan formasi luas permukaan yang lebih besar [28].

Perekatan serap (*adsorption*). Teori penyerapan menyatakan bahwa perekatan terjadi akibat dari kontak molekular antara dua material dan gaya-gaya permukaan yang berkembang. Proses penetapan kontak yang baik antara perekat dan bahan yang direkat (ditemplei) tersebut diketahui sebagai *wetting* (pembasahan). Seperti diilustrasikan pada Gambar 2. 4. Bagi perekat, untuk membasahi permukaan padat, perekat tersebut sebaiknya mempunyai tegangan

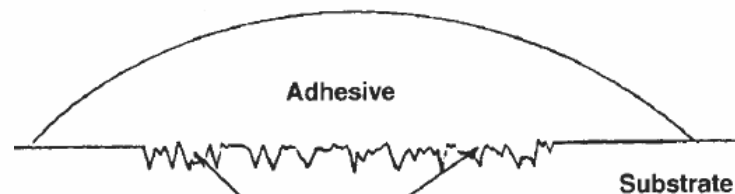


permukaan yang lebih rendah dari pada tegangan permukaan kritis bahan padat. Kebanyakan perekat organik dapat secara mudah membasahi permukaan metalik padat. Tetapi banyak bahan organik solid mempunyai tegangan permukaan lebih kecil daripada yang dipunyai perekat pada umumnya. Setelah kontak yang baik tercapai antara perekat dan bahan yang direkati melalui pembasahan, hal ini dipercaya bahwa keberhasilan perekatan terutama melalui gaya-gaya tarik menarik dari molekul. Empat jenis yang umum dari ikatan kimiawi dikenal sebagai *electrostatic*, *covalent* dan *metallic*, yang dikenal sebagai ikatan utama, dan gaya Van der Waals yang disebut sebagai ikatan sekunder [28].

Teori difusi dan *electrostatic*. Teori *electrostatic* menyatakan bahwa gaya-gaya *electrostatic* dalam bentuk lapisan ganda elektrik terbentuk pada ikatan antarmuka perekat dan bahan yang direkati. Gaya-gaya ini bertanggung jawab melawan pemisahan.



Pembasahan yang jelek dan permukaan yang kasar. Perekat belum mengalir ke dalam celah kekasaran permukaan, dan udara terjebak pada interface.



Adhesive completely fills irregularities

Pembasahan yang baik dan permukaan yang kasar. Perekat berada dalam kontak yang baik dengan substrat.

Gambar 2. 4. Ilustrasi pembasahan yang baik dan jelek oleh penyebaran perekat di atas permukaan [28].

Konsep dasar dari teori difusi adalah bahwa perekatan timbul melalui inter difusi molekul di dalam perekat dan bahan yang direkatkan. Teori difusi utamanya dapat diterapkan ketika perekat dan bahan yang direkatinya keduanya adalah *polymeric*, yang mempunyai kemampuan gerakan molekul rantai panjang. Ikatan yang terbentuk oleh larutan atau *thermoplastic* pengelasan panas akibat dari difusi molekul-molekul [28].

Teori lapisan batas lemah. Lapisan batas yang lemah dapat berasal dari perekat, bahan yang direkat, lingkungan, atau kombinasi dari ketiganya. Lapisan batas yang lemah dapat terjadi pada perekat dan bahan yang direkat jika bahan pengotor mendekati permukaan ikatan dan membentuk ikatan yang lemah terhadap substrat. Ketika kegagalan ikatan terjadi, ini adalah lapisan batas lemah yang gagal, meskipun kegagalan kelihatan terjadi pada ikatan antarmuka perekat dan bahan yang direkat. Kegagalan sambungan perekat dengan bahan yang direkat akan terjadi secara terpadu di dalam oksida yang lemah. Ketika perekat tidak membasahi substrat, lapisan batas yang lemah dari udara terjebak pada ikatan antarmuka, yang menyebabkan penurunan kekuatan sambungan, seperti diilustrasikan pada Gambar 2. 4. [28].

## **2. 11. Konsep komposit karbon-karbon**

Lebih dari tiga dekade terakhir, serat karbon telah terbukti menjadi penguat utama untuk penerapan yang luas dari komposit lanjut. Serat karbon adalah serat sintesis hitam kaku dan sangat kuat, ringan dan ketebalan beberapa micron dengan rantai molekul aromatic panjang yang utamanya tersusun dari karbon. Serat karbon ini mampu mempertahankan struktur dan sifatnya dibawah kondisi fluid, tekanan dan temperatur yang ekstrim dan oleh karena itu dapat digunakan dengan semua jenis matriks, polimer, keramik dan metal, yang menerapkan teknik proses komposit yang berbeda. Menariknya dalam serat karbon sebagai penguat komposit untuk penerapan structural dimulai dengan tuntutan dari sektor *aeronautic* untuk material kaku dan kuat serta berat yang ringan.

Komposit matriks karbon yang diperkuat serbuk/serat karbon atau disebut komposit karbon-karbon mempunyai peringkat densitas  $1,6 - 2,0 \text{ g/cm}^3$ , jauh lebih rendah dari keramik dan metal dan sehingga menurunkan berat komponen,

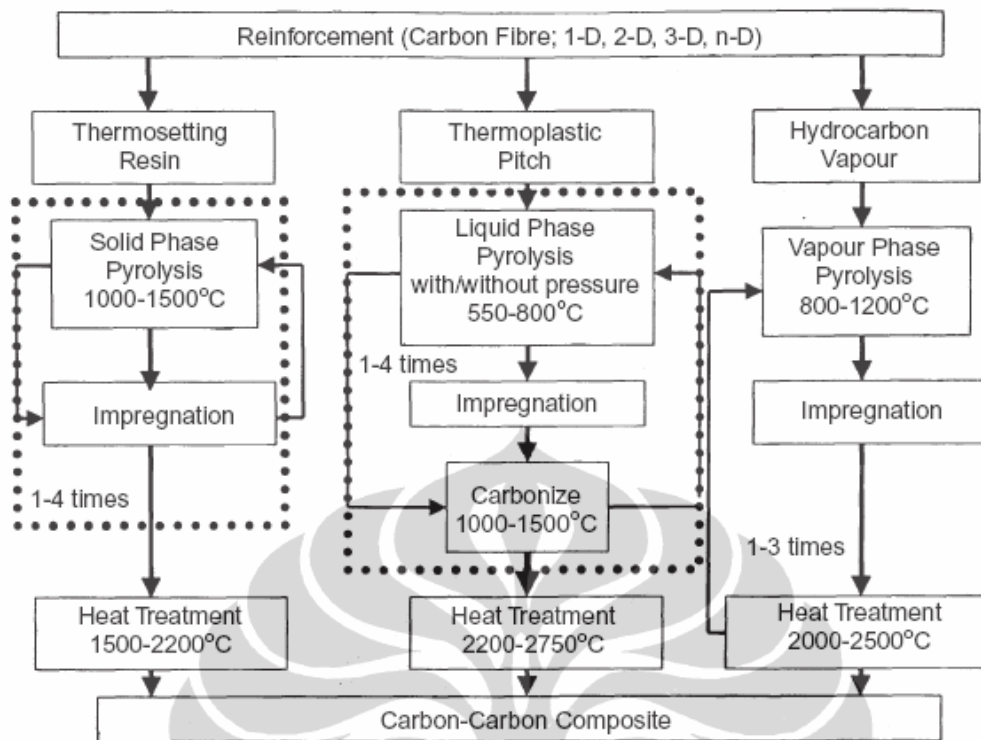
suatu pertimbangan yang penting untuk kendaraan udara. Beberapa sifat yang berguna dan sangat penting dari komposit karbon-karbon adalah berat yang ringan, kekuatan tinggi pada temperatur tinggi dalam lingkungan *non-oxidising*, koefisien muai panas yang rendah, konduktivitas panas yang tinggi (lebih tinggi dari perak dan tembaga), ketahanan kejutan panas yang tinggi dan penurunan yang rendah dalam lingkungan abrasi tekanan tinggi. Kekuatan mekanik komposit karbon-karbon meningkat dengan temperatur, bertolak belakang terhadap kekuatan metal dan keramik, yang menurun dengan peningkatan temperatur. Sifat istimewa dari komposit karbon-karbon telah membuat material ini secara ekstrim berguna untuk aplikasi *aerospace* dan pertahanan seperti cakram rem, nosel rocket, pemanas tungku dan lain-lain, untuk tujuan manusia sebagai *implant biomedic*, dan lain-lain [3].

## 2. 12. Proses pembuatan komposit karbon-karbon

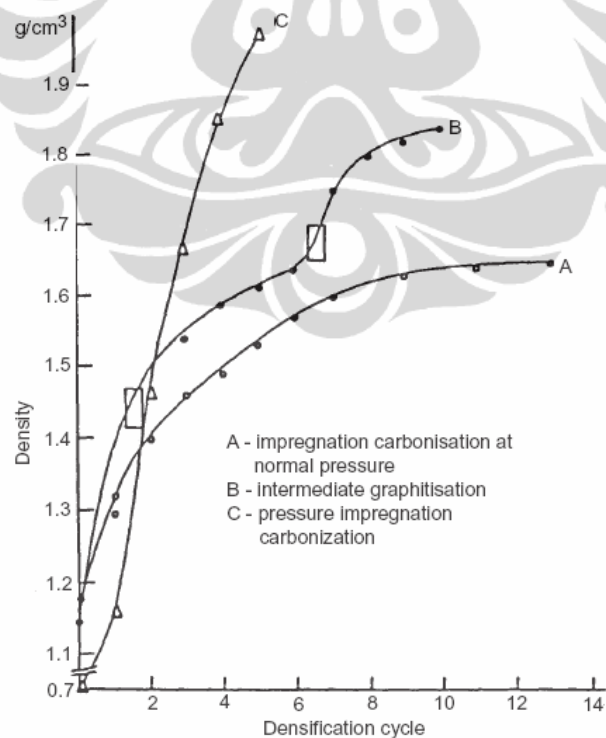
Seperti karbon, komposit karbon-karbon juga dapat dimanufaktur melalui penerapan teknik yang berbeda seperti semua pirolisis solid yang menggunakan resin *thermosetting*, atau jalur *pitch* yang menggunakan jalur karbonisasi infiltrasi liquid atau jalur *Chemical Vapor Deposition*. Metode fabrikasi komposit karbon-karbon melibatkan fabrikasi 3D (*three directionally reinforced*) atau membentuk serat karbon berpori MD (*multi directions*) yang mempunyai bentuk yang diinginkan atau kerangka karbon-karbon berpori (UD, 2D atau 3D) dengan serat karbon dan matriks bersifat karbon yang dilanjutkan dengan densifikasi. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2. 5. [3].

Densifikasi dapat dicapai melalui infiltrasi fasa uap kimia dimana di dalamnya gas hidrokarbon seperti methane, propane dan lain lain menginfiltrasi ke dalam struktur serat berpori yang dipanaskan sampai temperatur 1000 – 1400°C dan dibuat terurai didalamnya [3].

Deposisi uap kimia adalah sebuah proses yang sangat lambat dan ini memerlukan waktu berbulan-bulan untuk mendapatkan komposit karbon-karbon yang padat. Struktur berpori dapat juga direndam dengan resin *phenolic/pitch* liquid yang dilanjutkan karbonisasi dan perlakuan panas (1000 – 2700°C). Pirolisis dari matriks resin/*pitch* dapat dilakukan pada tekanan normal atau pada tekanan tinggi *Hot Isostatic Press*.



Gambar 2. 5. Pemrosesan komposit karbon-karbon [3].



Gambar 2. 6. Peningkatan densitas komposit karbon-karbon dan siklus densifikasi[3].

Manocha juga menjelaskan bahwa densitas yang diinginkan bisa dicapai melalui siklus densifikasi yang berulang, jumlah siklus perendaman akan lebih sedikit jika digunakan proses *hot isostatic press*. Teknik pendekatan baru telah dilibatkan, dimana komposit setelah perendaman tertentu atau siklus karbonisasi tekanan normal diperlakukan panas sampai temperatur tinggi dan kemudian direndam ulang atau *reimpregnated*. Perlakuan panas temperatur tinggi lanjutan (antara) membuka pori-pori untuk infiltrasi lebih lanjut. Gambar 2. 6 menunjukkan perbandingan dari proses densifikasi [3].

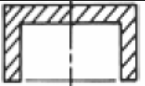


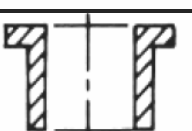


## 2. 13. Fabrikasi pra bentuk

Semua serat karbon dapat digunakan sebagai penguat dalam banyak bentuk yang berbeda, misalnya serat random, tenunan dua arah dalam tumpukan, jahitan, atau konfigurasi berlubang-lubang, *geometric* tiga arah untuk meningkatkan kekuatan arah keluar axis, atau jalinan multi arah untuk meminimalkan ruang-ruang kosong. Orientasi satu arah tidak banyak untuk aplikasi teknik, tetapi banyak penelitian dasar telah dilaksanakan menggunakan komposit satu arah sebagai model.

Teknik manufaktur yang ditunjukkan dalam Tabel 2. 3 berhubungan dengan mampu proses dari bentuk yang berbeda. Dalam beberapa kasus, kombinasi teknik proses utama adalah mungkin untuk struktur yang rumit.

Tabel 2. 3: Teknik pemrosesan untuk geometrik yang berbeda [2].

Bentuk	Axial-pressing, 2-D	Vacuum-sack, 2-D	Auto-clave, 2-D	Winding, 2-D	Weaving, 2.5/3-D
	Mudah	Mudah	Mudah	Mungkin	Mungkin
	Mudah	Mudah	Mudah	Tidak Mungkin	Mungkin
	Tidak Mungkin	Mungkin	Mungkin	Mudah	Mungkin
	Tidak Mungkin	Mungkin	Mungkin	Mudah	Mungkin

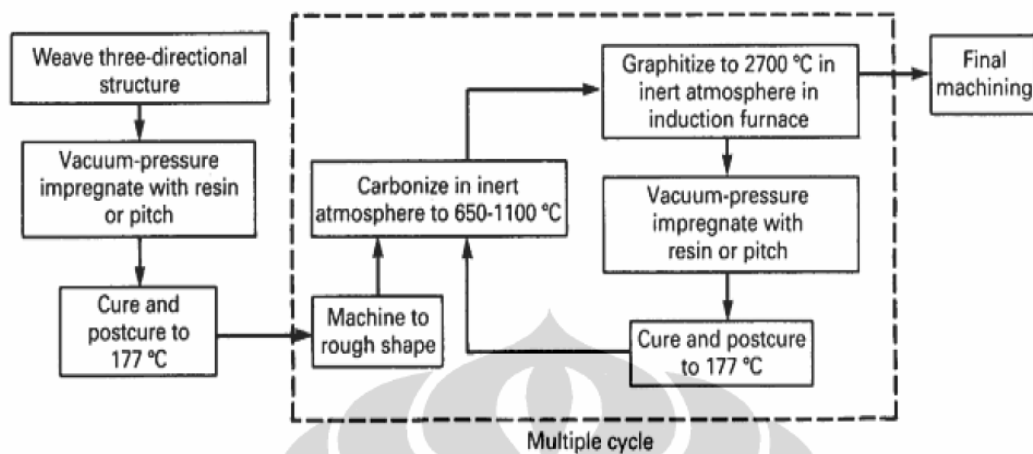
	Tidak Mungkin	Mungkin	Mudah	Tidak Mungkin	Mungkin
	Tidak Mungkin	Mungkin	Mungkin	Mudah	Mungkin
	Tidak Mungkin	Mungkin	Mungkin	Mudah	Mungkin
	Tidak Mungkin	Mungkin	Mudah	Tidak Mungkin	Mungkin
	Tidak Mungkin	Mungkin	Mudah	Tidak Mungkin	Mungkin
	Tidak Mungkin	Tidak Mungkin	Mungkin	Tidak Mungkin	Mungkin

## 2. 14. Proses densifikasi

Umumnya, komposit karbon-karbon terbaik hasil proses densifikasi matriks graphit karbon yang terikat dengan baik yang mengisi rongga terbuka dari sampel pra bentuk. Proses densifikasi sebenarnya ditentukan oleh karakteristik dari sampel pra bentuk. Empat faktor yang paling penting adalah jenis serat karbon, volume serat, ketebalan sampel pra bentuk dan distribusi ukuran rongga di dalam sampel pra bentuk. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2. 7. [2].

Pencelupan matriks prekursor. Terdapat dua katagori umum matriks prekursor yang digunakan untuk densifikasi karbon-karbon adalah resin *thermosetting*, dan *pitch* berbasis tar batubara (*coal tar pitch* = aspal berbasis batubara) dan petroleum. Resin *thermosetting* mengalami polimerisasi untuk membentuk *cross-linked*, padatan yang tidak dapat lebur (*infusible solids*). Sebagai akibat pirolisis, resin-resin ini membentuk *amorphous (glassy) carbon*. Hasil carbon pada 800 °C adalah sekitar 50 sampai 60% berat. *Coal tar pitch* dan *petroleum pitch* adalah campuran dari *polynuclear aromatic hydrocarbon*. Dari titik pelunakannya sampai sekitar 400 °C, *pitch* yang dicairkan mengalami bermacam perubahan, yang meliputi penguapan fraksi berat molekular yang

rendah, polimerisasi, pembelahan (penguraian) dan pengaturan kembali struktur molekular.



Gambar 2. 7. Model proses densifikasi komposit karbon-karbon [2].

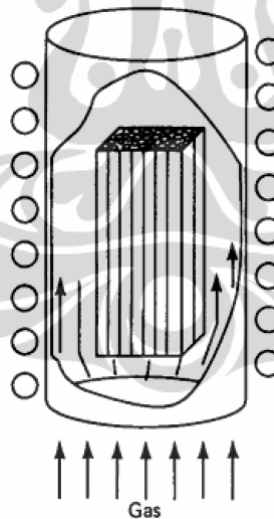
Pada temperatur di atas 400 °C, lapisan *mesophase* terbentuk dalam *pitch* cair isotropik. Lapisan *mesophase* ini berubah bentuk, bersatu, dan membeku untuk membentuk daerah susunan yang panjang. Pengaturan seperti daun (Lamellar) dari struktur molekular dalam daerah-daerah ini menyokong formasi struktur grafit pada pemanasan lebih lanjut sampai 2000 °C. Hasil cokas dari *coal tar pitch* dan *petroleum pitch* adalah sekitar 50% berat setelah pirolisis pada tekanan atmosfer. Pirolisis *coal tar pitch* pada 600 °C dibawah tekanan 6,9 MPa memberikan hasil cokas 90%. Peningkatan dalam tekanan pirolisis tidak meningkatkan hasil cokas di atas level 90%. [2].

Perendaman cair. Teknik pemrosesan yang umum menggunakan perendam cairan organik sebagai matriks pembentuk awal melibatkan siklus yang berulang dari perendaman sampel pra bentuk dan perlakuan panas untuk menghasilkan komposit yang padat. Viscositas perendam dan hasil kokas, densitas, struktur mikro, dan derajat grafitisasi harus dipertimbangkan. Semua faktor-faktor ini dipengaruhi oleh hubungan tekanan-temperatur-waktu yang diterapkan selama proses [2].

Proses tersebut dimodifikasi melalui penerapan langkah karbonisasi di bawah tekanan mulai dari 6,8 sampai 103 MPa. Proses yang dimodifikasi ini telah ditandai sebagai proses *pressure-impregnation-carbonization* (PIC). Tekanan isostatik mendorong *pitch* ke dalam pori kecil yang tidak terisi selama

perendaman vakum awal. Ketika *pitch* mulai pirolisis, tekanan isostatik tinggi menahan lebih banyak fraksi uap dari *pitch* dalam fasa kondensasi. Hal ini mengurangi jumlah liquid yang didorong keluar dari komposit oleh produk pirolisis *pitch* [2].

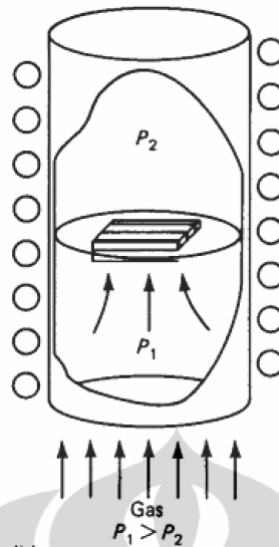
Infiltrasi uap kimia karbon menggunakan hidrokarbon gas seperti gas methane, propane/propylene, dan benzene untuk mengendapkan matriks karbon secara internal di dalam sampel pra bentuk serat karbon. Proses ini dapat diwujudkan menggunakan tiga metoda yang berbeda. Teknik yang secara umum paling banyak digunakan, ditunjukkan Gambar 2. 8, gas alam atau gas bersifat karbon dialirkan lewat melalui sampel pra bentuk serat karbon yang ditempatkan di dalam tungku isothermal tekanan rendah. Endapan yang merata keseluruhan sampel pra bentuk dapat dicapai melalui pengoperasian pada temperatur cukup rendah untuk mengijinkan difusi gas yang cepat, dibandingkan pengendapan karbon.



Gambar 2. 8. Teknik infiltrasi uap kimia aliran gas alam [2].

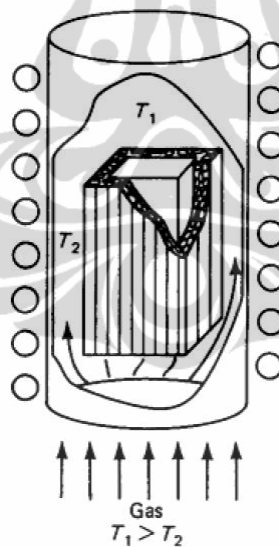
Transfer masa melalui sampel pra bentuk serat dapat diperbaiki melalui pemasukan tekanan yang meningkat perlahan yang melewati sampel pra bentuk. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2. 9.





Gambar 2. 9. Teknik infiltrasi uap kimia dengan gradien tekanan [2].

Laju pengendapan bisa menjadi lebih tinggi. Laju pengendapan dapat juga dicapai melalui penggunaan proses pengendapan dengan gradien temperatur. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2. 10.



Gambar 2. 10. Teknik infiltrasi uap kimia dengan gradien temperatur [2].

Problem utama dengan infiltrasi uap kimia adalah untuk mencapai endapan yang seragam dari matriks karbon ke seluruh sample pra bentuk yang tebal. Transfer masa dari gas yang pekat harus cukup tinggi dalam sampel pra bentuk untuk menjaga konsentrasi yang relatif konstan dari seluruh molekul yang mengandung karbon. Karena itu, laju karbon yang diendapkan harus rendah

dibandingkan transfer masa karbon ke dalam dan ke seluruh sampel pra bentuk [2].

Transfer masa molekul yang mengandung karbon ke dalam sampel pra bentuk biasanya melalui bauran (*diffusion*), yang secara perlahan meningkat dengan temperatur. Sebuah alternatif menggunakan gradien temperatur, demikian bahwa yang diendapkan pada sebuah batas yang bergerak menyapu ke seluruh ketebalan. Waktu pengendapan secara signifikan dapat diturunkan, karena transfer masa dari gas pengendapan kebanyakan melewati sampel pra bentuk yang belum mendapatkan endapan karbon matriks [2].

## **2. 15. Aspek struktural komposit karbon-karbon**

Manocha menjelaskan faktor penting yang utama dalam mencapai konduktivitas panas tinggi dan tangguh adalah pemilihan serat karbon yang tepat, struktur mikro matriks karbon, densitas dan struktur makro dari komposit. Urutan pemrosesan dan pemilihan prekursor kebanyakan mempengaruhi densitas, struktur makro (bentuk, ukuran dan jumlah cacat, misalnya cacat pori, retak dan lain-lain) dan struktur mikro matriks. Untuk mendapatkan ikatan matriks dan serat yang diinginkan dan untuk mengurangi retakan pada ikatan antarmuka matriks dan serat, pelapisan karbon pirolitik juga digunakan pada permukaan serat [3].

## **2. 16. Sifat komposit karbon-karbon.**

Komposit karbon-karbon mempunyai banyak sifat temperatur tinggi yang diinginkan dari karbon konvensional dan grafit, yang meliputi kekuatan yang tinggi, modulus yang tinggi, *creep* yang rendah. Terlebih lagi, konduktivitas termal yang tinggi dan *Coeffisient of Thermal Expansion* yang rendah, berpasangan dengan kekuatan yang tinggi, menghasilkan sebuah material dengan sensitifitas terhadap termal shock yang rendah [2].

Sifat yang menarik dari komposit karbon-karbon adalah kekuatan dan kekakuan, *fracture toughness*, konduktivitas termal dan ketahanan terhadap oksidasi pada temperatur tinggi. Sifat mekanik dari bagian dan fraksi volumenya, ikatan (ikatan) dan mekanisme propagasi retak mengendalikan sifat mekanik dari komposit, sementara sifat termal ditetapkan atau dipengaruhi oleh gejala

perpindahan panas. Terlebih lagi, material pendukung, baik penguat dan matriks mungkin sekali mengalami perubahan dalam sifatnya selama pemrosesan ketika dipengaruhi oleh temperatur perlakuan panas, perubahan dimensi yang berbeda, tegangan termal dan lain lain. Semua faktor ini mempengaruhi sifat akhir dari komposit [3].

## 2. 16. 1. Sifat mekanik komposit karbon-karbon.

Kekuatan dan retak komposit karbon-karbon ditentukan oleh teori Cook-Gorden untuk penguatan padatan rapuh (Cook & Gorden 1964), yang menyatakan bahwa jika ratio kekuatan ikatan dari ikatan antarmuka terhadap kekuatan paduan (*cohesive*) dari padatan berada dalam peringkat yang benar, peningkatan yang besar dalam kekuatan dan ketangguhan dari material rapuh sebaliknya tercapai [3].

Komposit karbon-karbon dapat mendekati kekuatan dan modulus yang sama seperti yang dicapai dengan komposit matriks resin.

Tabel 2. 4: Sifat mekanik komposit karbon-karbon *unidirectional* (~55% vol) [2].

	Sejajar		Tegak lurus	
	HTU	HMS	HTU	HMS
<b>Modulus, GPa</b>				
Tarik	125	220	...	...
Tekan	10	250	7,5	...
<b>Kekuatan, MPa</b>				
Tarik	600	575	4	5
Tekan	285	380	25	50
Tekuk	1250	825	20	30
Geser	20	28	...	...
Ketangguhan retak, kJ/m <sup>2</sup>	70	20	0,4	0,8

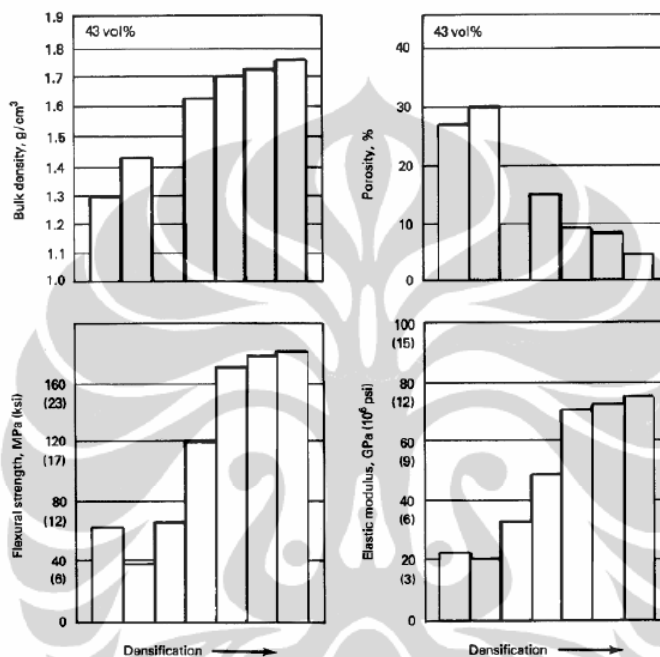
HTU, high tensile untreated surface; HMS, high modulus surface treated

Semua sifat komposit karbon-karbon dari serat adalah *anisotropic*. Ini berasal dari serat karbon yang secara ekstrim anisotropic karena pola geometric kristal grafitnya. Sepanjang sumbu serat, kekakuan, kekuatan dan konduktivitas elektrik dan panas adalah paling bagus. Arah melintang serat, sifat ini adalah jelek. Dalam kasus penguatan dua arah, rasio anisotropy sebesar antara 5/1 dan 10/1, [2].

Tabel 2. 5. Resistivitas elektrik dan konduktivitas panas sejajar dan tegak lurus terhadap laminates dari komposit karbon-karbon *two-directional* [2].

HTT °C	Resistivitas elektrik, $\mu\Omega.m$		Koduktivitas panas, W/m.K	
	Sejajar	Tegak lurus	Sejajar	Tegak lurus
200	33	98	36	4
800	8	68	127	39

HTT= *Heat treatment temperature*



Gambar 2. 11. Perubahan sifat dengan sejumlah redensifikasi (*two-directional weave*) [2].

## 2. 16. 2. Sifat gesekan komposit karbon-karbon.

Komposit karbon-karbon telah memperluas lingkup aplikasinya dari material berbasis karbon dalam aplikasi yang berkaitan keausan dari perapat bantalan dan *electric brushes* sampai sepatu rem untuk kendaraan berat, seperti kendaraan militer, pesawat sipil dan supersonic sampai truk dan kereta api. Ini telah ada karena sifat tribologi dasar dari karbon dengan kekuatan ekstra tinggi dan kontribusi konduktivitas panas dari serat penguat. Komposit karbon-karbon menunjukkan koefisien gesek  $\mu$  yang rendah dalam arah serat (0,3 – 0,5) dan 0,5 – 0,8 dalam arah tegak lurus serat. Laju aus juga menunjukkan kecenderungan yang sama (0,05 – 0,1 dan 0,1 – 0,3 mm). Mekanisme aus dan gesekan dari komposit karbon-karbon pada penerapan sepatu rem sangat kompleks dan faktor-

faktor yang bervariasi seperti temperatur puncak, formasi debris (serbuk) dan lapisan pada permukaan yang bergesekan yang lebih jauh mempengaruhi koefisien gesek dan lain lain. Umumnya, untuk memfabrikasi cakram rem untuk kendaraan yang berbeda, tipe serat yang berbeda (*Polyacrylonitrile* dan kekuatan tinggi berbasis pitch dan konduktifitas panas yang tinggi) digunakan dalam sejumlah konfigurasi, juga tunggal ataupun dalam kombinasi dengan matriks karbon yang diturunkan dari jenis prekursor yang berbeda, pitch atau deposisi uap kimia. Dalam sepatu rem komposit karbon-karbon komersial, lapisan fabric serat karbon digunakan dengan serat panjang (*tows*) yang diselipkan dalam arah ketiga dan pitch/ alur deposisi uap kimia untuk densifikasi. Bagaimanapun, pemilihan bahan-bahan pendukung dan parameter proses berada pada kebijaksanaan pembuat atau manufacturer [3].

### **2. 16. 3. Proteksi oksidasi komposit karbon-karbon**

Karbon cenderung bereaksi dengan oksigen pada temperatur  $450^{\circ}\text{C}$  ke atas. Untuk pemaparan yang lama dari komposit ini pada temperatur yang meningkat dalam lingkungan yang normal, ini adalah penting bahwa komposit ini harus dilindungi terhadap oksidasi. Sistem proteksi oksidasi untuk komposit karbon-karbon didasarkan pada modifikasi matriks melalui penambahan beberapa penghambat oksidasi (seperti B, Si, Zr atau senyawanya) dan atau pengendapan lapisan keramik pada permukaan. Pelapisan ini umumnya adalah pelapisan multilayer dari material *functionally gradient* dari carbide, nitrid dan oksida Si, Zr, Ta, Al dan lain-lain [3].

## BAB 3 METODE PENELITIAN

### 3. 1. Langkah Penelitian

Penelitian telah dilaksanakan melalui tiga tahapan penelitian eksperimen dengan jenis material yang sama, tetapi dengan variasi yang berbeda. Hasil kesimpulan tiap tahapan penelitian menjadi pertimbangan tahapan penelitian berikutnya.

Tahap penelitian pendahuluan yang telah dilakukan dengan merekayasa dan mengkarakterisasi komposit karbon-karbon berbasis limbah organik. Penelitian ini memanfaatkan karbon hasil karbonisasi limbah organik cangkang kelapa, limbah batubara, semikokas yang dipanaskan ulang dan grafit produksi fabrikasi sebagai serbuk karbon penguat dalam material rekayasa komposit karbon-karbon dengan matrik karbon dari *coal tar pitch*. Hasil uji sifat kuat tekan dan kekerasan terbaik dari empat jenis serbuk penguat dari penelitian ini digunakan untuk penelitian tahap selanjutnya.

Tahap dua penelitian yang telah dilakukan adalah penelitian dengan memanfaatkan limbah batubara sebagai salah satu bahan yang baik dari hasil penelitian tahap pendahuluan. Penelitian ini adalah tentang komposit karbon-karbon berbasis bahan karbon serbuk dengan ukuran  $\geq 80$  mesh dari limbah serbuk batubara sebagai penguat dalam matrik *coal tar pitch* melalui proses tekan panas dengan pemanasan temperatur bervariasi dari 300; 330; 350°C yang menghasilkan sifat mekanik tahan aus. Penelitian menguji sifat mekanik tahan aus material komposit karbon-karbon berbasis serbuk limbah batubara, dengan proses tekan panas, seperti penjelasan di atas.

Tahap tiga penelitian yang telah dilaksanakan ini memanfaatkan bahan serbuk yang terbaik yang telah ditunjukkan dalam penelitian pendahuluan dan penelitian tahap dua. Rekayasa material komposit karbon-karbon ini memanfaatkan serbuk limbah batubara dan serbuk karbon cangkang kelapa dicampur untuk dijadikan sebagai serbuk penguat, dan *coal tar pitch* sebagai matrik perekat. Variasi ukuran serbuk dan komposisi campuran serbuk batubara dan karbon cangkang kelapa menjadi fokus dalam penelitian ini. Penelitian

menganalisis pengaruh ukuran serbuk karbon terhadap karakteristik komposit karbon-karbon berbasis limbah organik.

Serbuk limbah cangkang kelapa dan batubara sudah menunjukkan peranan yang baik sebagai serbuk penguat dalam penelitian tahap pendahuluan. Langkah-langkah semua penelitian yang telah dilaksanakan dapat dilihat pada penjelasan berikut ini.

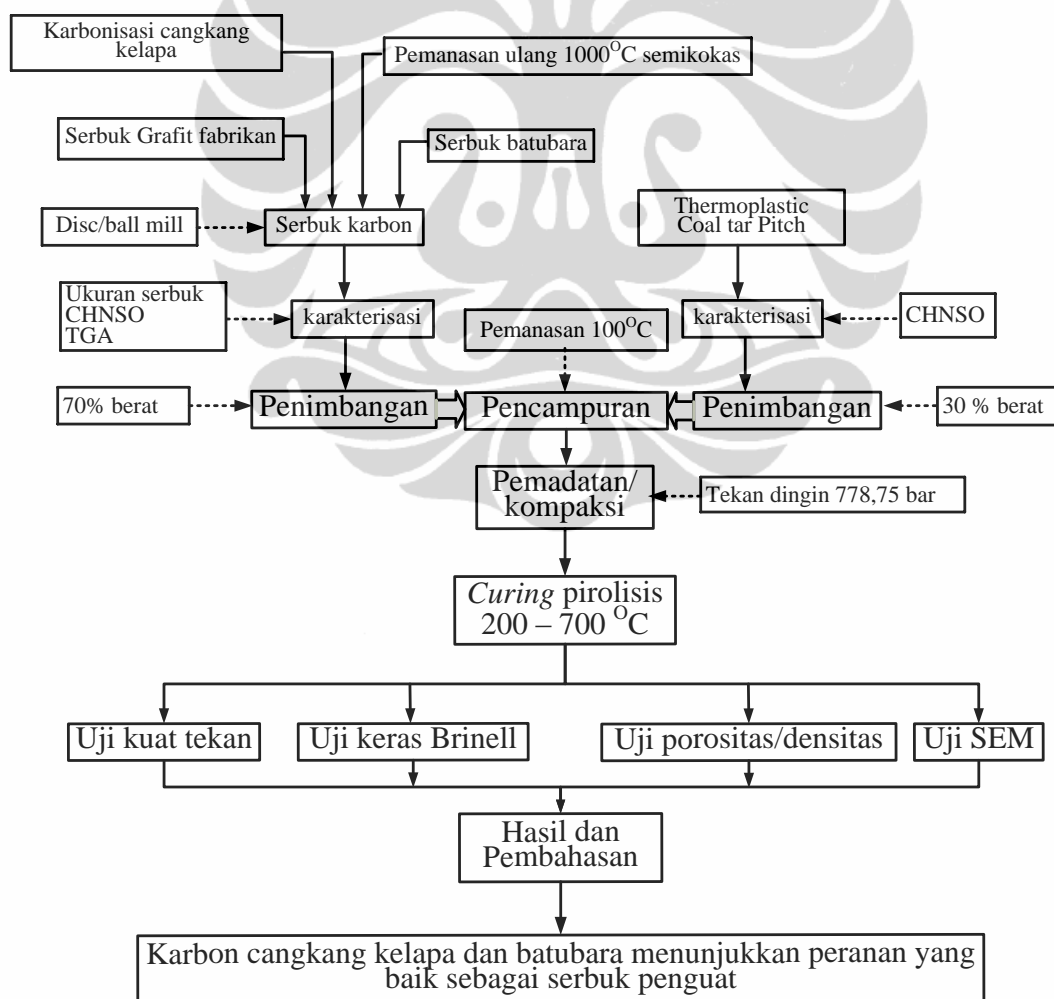
### 3. 2. Penelitian pendahuluan

Penelitian tahap pendahuluan dilaksanakan melalui tahapan sebagai berikut:

1. Limbah organik cangkang kelapa, serbuk limbah batubara, serbuk semikokas batubara dikarbonisasi. Proses ini dilakukan dengan tungku vakum berkelanjutan. Proses karbonisasi dilakukan pada temperatur 500 sampai 1000°C. Hal ini dilakukan untuk mencari kandungan karbon yang paling tinggi dari bahan-bahan yang dikarbonisasi. Proses karbonisasi dilakukan secara sendiri-sendiri terhadap masing-masing bahan limbah.
2. Sampel karbonisasi dikarakterisasi dengan *carbon analyzer* untuk mengetahui persentase kandungan karbon dari proses karbonisasi masing-masing limbah.
3. Selain uji kandungan karbon, hasil karbonisasi juga diuji dengan alat *Thermogravimetri Analyzer*.
4. Hasil produksi karbon selanjutnya digiling dengan *discmill* dan *ballmill* sampai mencapai tingkat serbuk dengan ukuran mesh  $\geq 325$ .
5. Serbuk serbuk dengan mesh  $\geq 325$  ditimbang untuk mencapai proporsi 70% berat serbuk dan 30% berat *coal tar pitch*. Langkah ini menimbang berat serbuk sebesar 17,5 g dan berat *coal tar pitch* 7,5 g.
6. *Coal tar pitch* dipanaskan sampai mencair pada temperatur 100°C, selanjutnya serbuk karbon ditaburkan untuk dicampurkan dengan cairan *coal tar pitch*.
7. Campuran serbuk dan matrik *coal tar pitch* dipadatkan dengan press hidrolik dalam sebuah cetakan dengan tekanan 778,75 bar. Sampel pra bentuk mencapai ketebalan  $\pm 10$  mm dan diameter 40 mm.

8. Sampel pra bentuk dipanaskan dalam proses *curing* pirolisis di dalam tungku vakum kedap oksigen (teknik pirolisis). Pada proses ini dilakukan dengan variasi temperatur dari 200 – 700°C, sesuai data karakterisasi uji *Thermogravimetri Analyzer*.
9. Spesimen diuji sifat fisik dan mekanik. Pada tahap ini spesimen diuji kekuatan tekan dengan mesin *Universal Testing* mesin.
10. Spesimen diuji *scanning electron mycroscopic* untuk mengetahui topografi dari padatan spesimen hasil pirolisis.
11. Spesimen diuji porositas dan densitas, untuk mengetahui tingkat kepadatan dari spesimen hasil uji kompaksi dan pirolisis.
12. Spesimen diuji kekerasan dengan metode *hardness* Brinell.

Tahapan penelitian tersebut ditunjukkan dalam Diagram alir pada Gambar 3. 1.



Gambar 3. 1. Diagram alir penelitian tahap pendahuluan



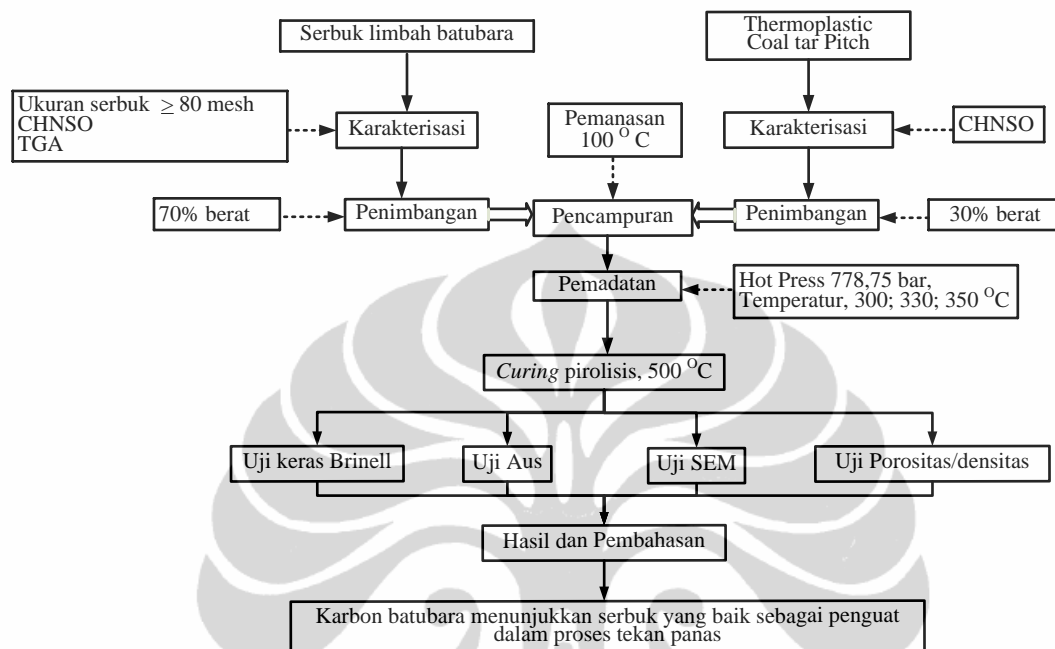
### 3. 3. Penelitian sifat mekanik tahan aus komposit karbon-karbon

Penelitian tahap dua dengan memanfaatkan salah satu serbuk yang baik dari penelitian tahap pendahuluan, yaitu limbah batubara sebagai serbuk penguat dalam matrik *coal tar pitch*. Penelitian ini dilaksanakan melalui tahapan sebagai berikut.

1. Serbuk limbah batubara digiling dalam mesin *discmill* atau *ballmill* sehingga mencapai mesh  $\geq 80$ .
2. Hasil penggilingan serbuk, selanjutnya disaring (diayak) dengan mesin ayakan vibrasi, dengan mesh  $\geq 80$ .
3. Serbuk hasil produksi *sieving* dikarakterisasi dengan *carbon analyzer* untuk mengetahui persentase kandungan karbon dari serbuk limbah batubara tersebut.
4. Serbuk hasil produksi *sieving* diuji dengan alat *Thermogravimetri Analyzer*.
5. Serbuk karbon batubara hasil *sieving* dengan mesh  $\geq 80$  selanjutnya ditimbang dengan proporsi 70% berat serbuk dan 30% berat *coal tar pitch*.
6. *Coal tar pitch* dipanaskan sampai mencair pada temperatur 80 s/d 100°C, selanjutnya ditaburkan serbuk karbon penguat serbuk limbah batubara untuk dicampurkan dengan cairan *coal tar pitch*, dalam sebuah panci aluminium.
7. Campuran serbuk karbon batubara dan matrik *coal tar pitch* dipadatkan di dalam sebuah cetakan dan ditekan dengan mesin press hidrolik dengan tekanan 778,75 bar, sambil dipanaskan pada temperatur bervariasi dari 300; 330; 350°C. Proses ini disebut sebagai proses *Hot Press*.
8. Sampel pra bentuk dipanaskan di dalam ruang tungku kedap oksigen (teknik pirolisis) dengan atmosfer nitrogen. Proses ini dilakukan dalam temperatur dari 500°C, ditahan pada temperatur tersebut selama 15 menit, sesuai data karakterisasi uji *Thermogravimetri Analyzer*.
9. Sampel diuji sifat keras dengan metoda Brinell.
10. Sampel diuji ketahanan aus dengan mesin OGOSHI.
11. Sampel diuji porositas dan densitas, dengan metode Archimedes.

12. Untuk mengetahui topografi sampel hasil pirolisis, dilakukan uji *scanning electron mycrosopic*.

Tahapan penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 3. 2.



Gambar 3. 2. Diagram alir penelitian tahap dua

### 3. 4. Penelitian pengaruh ukuran serbuk karbon penguat

Penelitian tahap tiga dengan memanfaatkan dua jenis bahan karbon sebagai serbuk penguat dalam komposit karbon-karbon, yaitu karbon cangkang kelapa dan karbon limbah serbuk batubara. Variasi ukuran serbuk dan komposisi campuran serbuk batubara dan karbon cangkang kelapa menjadi fokus dalam penelitian ini. Langkah penelitian dilaksanakan mengikuti tahapan sebagai berikut.

1. Limbah organik cangkang kelapa dikarbonisasi. Proses ini dilakukan dengan tungku vakum berkelanjutan. Proses karbonisasi dilakukan pada temperatur 900°C.
2. Karbon limbah cangkang kelapa digiling dalam mesin *disc/ballmill*.
3. Serbuk karbon limbah cangkang kelapa hasil penggilingan diayak untuk mencapai ukuran mesh 100; 150; 200; 250,
4. Bahan serbuk limbah batubara digiling dalam mesin *disc/ballmill*.

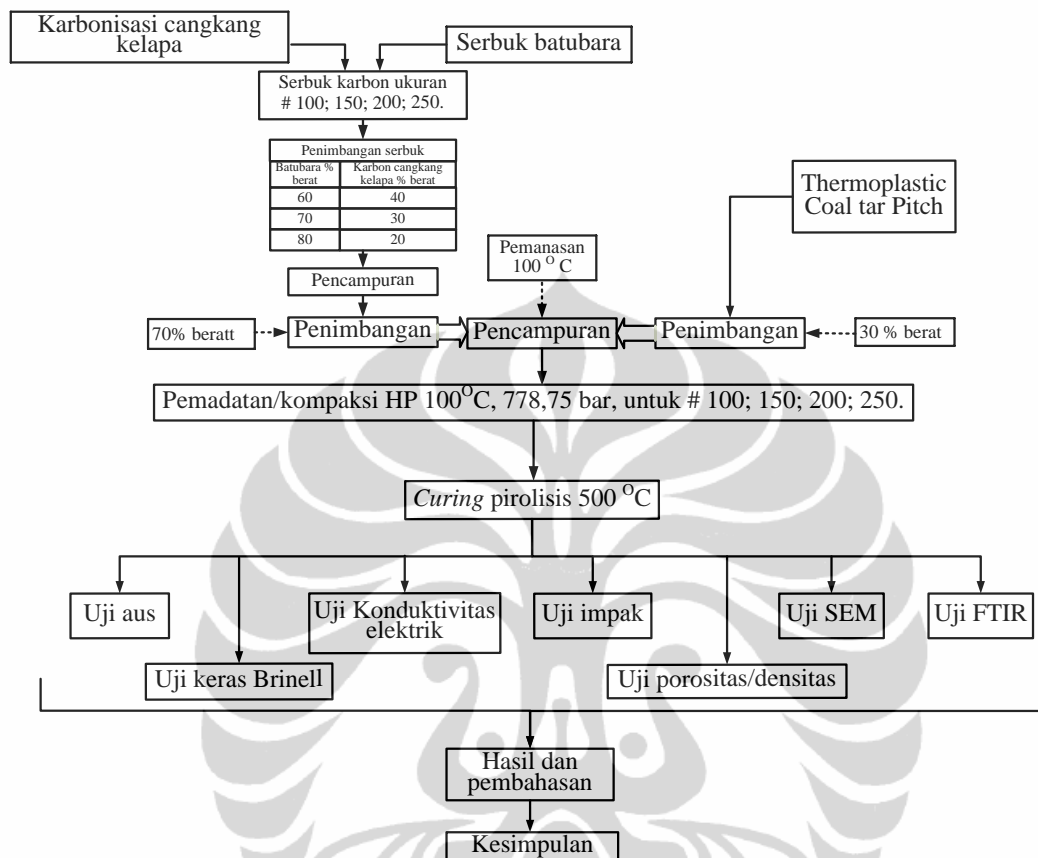
5. Serbuk karbon limbah batubara hasil penggilingan diayak untuk mencapai ukuran mesh 100; 150; 200; 250, pengayakan dilakukan dalam mesin ayakan vibrasi.
6. Serbuk karbon limbah batubara dari masing-masing ukuran mesh ditimbang dengan persentase berat 60%; 70%; 80% dari berat serbuk penguat sampel pra bentuk.
7. Serbuk karbon limbah cangkang kelapa dari masing-masing ukuran mesh ditimbang dengan persentase berat 40%; 30%; 20% dari berat serbuk penguat sampel pra bentuk.
8. Serbuk karbon limbah batubara dan serbuk limbah cangkang kelapa dari masing-masing ukuran mesh dicampur menjadi serbuk penguat sampel pra bentuk dengan ratio berat sebagai berikut:

Mesh	Ratio serbuk % berat	
	Karbon batubara	Karbon limbah cangkang kelapa
100	60	40
	70	30
	80	20
150	60	40
	70	30
	80	20
200	60	40
	70	30
	80	20
250	60	40
	70	30
	80	20

9. Campuran serbuk karbon limbah batubara dan serbuk karbon limbah cangkang kelapa merupakan 70% berat serbuk penguat dari berat sampel pra bentuk, 30% berat sampel pra bentuk adalah dari matrik perekat *coal tar pitch*.
10. Matrik *coal tar pitch* ditimbang dengan berat 30% dari berat sampel pra bentuk.
11. Campuran serbuk karbon batubara dan karbon limbah cangkang kelapa sebagai serbuk penguat 70% dicampur dengan matrik perekat *coal tar*

*pitch* 30% dengan pemanasan 100°C dalam panci aluminium sampai *coal tar* meleleh dan bercampur dengan serbuk karbon dari dua jenis bahan.

Tahapan penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 3. 3.



Gambar 3. 3 Diagram alir penelitian tahap tiga

12. Campuran serbuk penguat dan matrik perekat *coal tar pitch* selanjutnya dipadatkan dalam cetakan dengan tekanan 778,75 bar, dan dipanaskan 100°C, serta ditahan pada temperatur tersebut selama 30 menit.
13. Sampel pra bentuk selanjutnya diproses *curing* pirolisis dalam dapur vakum kedap oksigen pada temperatur 500°C, dan ditahan selama 15 menit.
14. Sampel selanjutnya dilakukan pengujian kekerasan dengan metode Brinell, uji aus dengan mesin OGOSHI.
15. Sampel dilakukan pengujian densitas dan porositas.
16. Sampel dilakukan pengujian *scanning electron microscopic*.
17. Sampel dilakukan pengujian dampak.

18. Sampel dilakukan pengujian konduktivitas elektrik.
19. Sampel dilakukan pengujian *Fourier Transform InfraRed* (FTIR).

### 3. 5. Bahan Penelitian

Bahan penelitian ini terdiri dari tiga bahan mentah dipersiapkan untuk membuat sampel pra bentuk, semua bahan yang digunakan adalah bersifat limbah dan selanjutnya diolah untuk menjadi bahan karbon, kecuali grafit dalam penelitian pertama merupakan produk fabrikasi.

#### 3. 5. 1. Bahan matriks *coal tar pitch*

Bahan yang dipersiapkan untuk matrik perekat adalah limbah *coal tar pitch*. *Coal tar pitch* adalah limbah buangan residu dari proses gasifikasi batubara. *Coal tar pitch* berwarna hitam, berbentuk padat lunak, bersifat plastis, bila dipanaskan 100°C meleleh dan mencair, dan mudah berubah bentuk. Bentuk *coal tar pitch* ditunjukkan pada Gambar 3. 4.



Gambar 3. 4. Bentuk limbah *coal tar pitch*

#### 3. 5. 2. Bahan cangkang kelapa

Limbah cangkang kelapa merupakan limbah organik kulit kelapa yang dapat dibeli di pasar tradisional. Bentuk dan wujud cangkang kelapa mentah (belum dikarbonisasi) ditunjukkan pada Gambar 3. 5.

Bentuk arang karbon cangkang kelapa hasil proses karbonisasi terhadap cangkang kelapa pada temperatur 900°C ditunjukkan pada Gambar 3. 6.



Gambar 3. 5. Limbah cangkang kelapa



Gambar 3. 6. Arang cangkang kelapa

### 3. 5. 3. Bahan serbuk batubara

Limbah serbuk batubara adalah berupa serbuk limbah yang dikirimkan dari tambang batubara Tanjungenim Sumatra Selatan. Gambar 3. 7 menunjukkan serbuk karbon limbah batubara.



Gambar 3. 7. Limbah serbuk batubara

### 3. 6. Alat proses

Peralatan proses untuk pembuatan sampel pra bentuk komposit karbon-karbon yang digunakan dalam penelitian adalah hasil rancang bangun peneliti dengan mahasiswa Teknik Mesin PNJ. Peralatan tersebut dapat dilihat pada penjelasan berikut ini.

#### 3. 6. 1. Tungku vakum

Tungku vakum digunakan untuk proses karbonisasi bahan limbah organik dan untuk proses *curing* pirolisis sampel pra bentuk, sehingga menjadi sampel komposit karbon-karbon yang siap diuji sifat fisik dan mekanik. Tungku vakum ini dilengkapi dengan pengatur temperatur otomatis. Konsep desain tungku vakum ini dapat digunakan dalam dua sistem sistem tekanan negatif dan sistem tekanan positif. Tekanan negatif adalah proses pemvakuman dengan menggunakan sistem pompa air yang bekerja mengalirkan air bertekanan tinggi ke sistem venturi yang dilengkapi dengan pipa isap ke tabung ruang bakar di dalam tungku pemanas. Sedang sistem tekanan positif adalah tungku vakum yang digunakan dengan menghembuskan gas inert (nitrogen) ke dalam tabung ruang bakar sehingga ruang bakar kedap oksigen. Kedua sistem mengakibatkan tabung ruang bakar menjadi kedap oksigen, sehingga tidak terjadi proses oksidasi dan membakar sampel yang dipanaskan. Desain tungku vakum ini mengkonsumsi daya 5000 Watt untuk pemanas dan 1500 Watt untuk pompa sistem vakum, desain temperatur mencapai 1200°C, desain sistem vakum mencapai -24 cmHg. Kapasitas volume ruang pembakar adalah Ø 22 cm dan tinggi 32 cm.

#### 3. 6. 2. Mesin *disc/ballmill*

Mesin *disc/ball mill* digunakan untuk menghancurkan dan melembutkan serpihan karbon dan serbuk batubara, sehingga mencapai ukuran mesh yang direncanakan.

Konsep desain mesin ini memanfaatkan getaran yang ditimbulkan oleh pasangan bandul *unbalance* pada poros motor listrik 3 fasa 1 pk dengan kecepatan putar  $\pm 1000$  rpm, yang didukung oleh enam pegas untuk menggoncang mangkok yang berisi bola baja dan cakram baja. Ketika bola dan cakram (*disc*)

baja di dalam mangkok bergoncang akan membentur berulang-ulang dan menghancurkan bahan sampel karbon. Kapasitas mangkok bola baja dirancang 250 g sampel karbon.

### 3. 6. 3. Mesin pengayak (*siever*)

Mesin ini dirancang bisa digunakan secara bergantian sebagai mesin *disc/ball mill* dan mesin pengayak, dengan cara mengganti mangkok bola baja dengan ayakan yang telah disiapkan dalam rangkaian. Konsep desain mesin ayakan ini juga memanfaatkan getaran yang ditimbulkan oleh pasangan bandul *unbalance* pada poros motor listrik 3 fasa 1 pk dengan kecepatan putar  $\pm 1000$  rpm, yang didukung oleh enam pegas untuk menggetarkan ayakan di atas mesin tersebut. Jumlah ayakan yang bisa dirangkai maksimum enam wadah yang tiap wadah mempunyai ukuran mesh yang berbeda, wadah paling bawah adalah penampung hasil serbuk dengan ukuran mesh paling besar yang dipasang, atau ukuran serbuk paling kecil.

### 3. 6. 4. Proses pencampuran

Pencampuran dilakukan dalam panci aluminium sambil dipanaskan di atas kompor listrik  $\pm 100^{\circ}\text{C}$  untuk mencairkan *coal tar pitch*, selanjutnya ditaburkan campuran bahan serbuk karbon serbuk batubara dan karbon serbuk cangkang kelapa, sesuai proporsinya, sambil diaduk selama 7 sampai 10 menit. Campuran yang baik akan berbentuk seperti gula pasir dengan besar butiran yang relatif sama besar.

### 3. 6. 5. Proses pemadatan panas (*hot press*)

Selanjutnya campuran serbuk dan *coal tar pitch* dipadatkan dalam sebuah cetakan dan ditekan dengan mesin tekan hidrolik manual sambil dipanaskan. Desain cetakan sampel pra bentuk dengan diameter 40 mm dengan kelonggaran samping dari silinder cetak terhadap *punch* penekan dibuat 0,5 mm. Diameter luar silinder cetak dibuat 60 mm. Tebal dinding silinder cetak 10 mm. Diameter dinding pemanas 80 mm. Jarak dinding silinder cetak terhadap dinding pemanas 10 mm. Bagian bawah pada tutup silinder cetak dibuat lubang tidak tembus untuk



menempatkan ujung deteksi *thermocouple* untuk mendeteksi temperatur yang terjadi di dalam silinder cetak. Desain pemanas dibuat maksimum 600°C dengan daya  $\pm$  3000 Watt. Selanjutnya dicetak tekan dengan mesin hidrolik manual dengan tekanan maksimum press hidrolik 11 USton. Ketinggian alas mesin press hidrolik dapat diatur sesuai kebutuhan panjang langkah penekanan.

### **3. 6. 6. Proses *curing* pirolisis**

Proses *curing* pirolisis dilakukan di tungku vakum, sampel pra bentuk dimasukkan ke dalam tabung ruang bakar dengan disusun pada rak. Tabung ruang bakar selanjutnya ditutup rapat dan dimasukkan ke dalam tungku pemanas. Temperatur pemanasan diatur pada 500°C. Pemanasan memerlukan waktu 2,5 jam untuk mencapai temperatur 500°C. Tungku pemanas akan mati secara otomatis, ketika temperatur telah mencapai 500°C.

Proses *curing* pirolisis membutuhkan waktu 24 jam sejak pemanasan dimulai sampai pendinginan ke temperatur ruang. Ketika temperatur tungku pemanas telah mencapai temperatur ruang, sampel dikeluarkan dari ruang pembakar.

### **3. 7. Peralatan karakterisasi**

Karakterisasi dilakukan untuk mengetahui sifat bahan mentah seperti karbon cangkang kelapa, karbon batubara dan *coal tar pitch*. Karakterisasi juga dilakukan terhadap bahan sampel pra bentuk dari komposit karbon-karbon. Peralatan karakterisasi yang digunakan dalam penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

#### **3. 7. 1. Karakterisasi komposisi kandungan karbon**

Bahan karbon hasil pirolisis dilakukan karakterisasi kandungan karbon dengan alat LECO CHN-2000 untuk mengetahui senyawa-senyawa yang terkandung dalam bahan karbon. Pengujian ini akan menghasilkan informasi tentang bahan-bahan ikutan yang terkandung dalam karbon, sehingga dengan pengujian ini dapat menunjukkan tingkat kemurnian karbon.

### 3. 7. 2. Karakterisasi dengan *Thermogravimetry Analyzer*

Karbon hasil pirolisis dilakukan dengan karakterisasi *Thermogravimetry Analyzer*. Bahan-bahan yang digunakan untuk pembuatan komposit dikarakterisasi dengan uji *thremogravimetry analyzer*. Pengujian ini untuk mengetahui sifat berat bahan terhadap perubahan panas yang berkaitan dengan perubahan temperatur pembakaran bahan yang bersangkutan. Pembakaran dilakukan terhadap bahan dengan berat 30 mg, dipanaskan dalam *crucible* keramik dengan kondisi atmosfer udara. Hasil uji dalam bentuk grafik hubungan antara temperatur-waktu-% penurunan berat. Tujuan pengujian adalah untuk mengetahui derajat temperatur proses terbentuknya karbon terhadap bahan yang dikarbonisasi.

### 3. 7. 3. Pengujian *scanning electron microscopic*.

Uji *Scanning Electron Microscopic* untuk mengetahui secara visual kualitatif kondisi topografi ikatan antar serbuk oleh matrik dari komposit karbon-karbon. Melalui cara ini dengan perbesaran tertentu dapat diketahui bentuk dan ukuran serbuk penguat komposit, dapat diketahui juga bentuk dan ukuran rongga-rongga atau pori yang terjadi dalam komposit.

### 3. 7. 4. Pengujian kekerasan.

Pengujian kekerasan komposit dilakukan dengan metode Brinell, dengan pertimbangan pengujian Brinell bisa berlaku universal dengan mengubah beban tekan pada alat uji Brinell. Pengujian dilakukan dengan pembebanan  $P$ , terhadap diameter indentor  $D$ , sehingga mendapatkan diameter indentasi akibat penekanan  $d$ . Selanjutnya dihitung untuk mendapatkan angka kekerasan Brinell dengan rumus sebagai berikut:

$$BHN = \frac{2P}{(\pi \cdot D) (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3.1)$$

### 3. 7. 5. Pengujian aus.

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui ketahanan bahan komposit karbon-karbon terhadap abrasi gesekan. Pengujian ketahanan aus dilakukan dengan mesin OGOSHI. Nilai laju keausan dihitung dengan formula yang seperti berikut:

$$Wear_{rate} = \frac{B.b^3}{12.r.x} \quad (3.2)$$

Dimana B tebal cincin (mm), b lebar alur jejak ausan (mm), r jari-jari cincin (mm) dan x adalah jarak luncur (m), Pengukuran jejak hasil indentasi dan hasil gesekan aus dilakukan dengan alat *microscope* pengukur.

### 3. 7. 6. Pengujian densitas.

Pengujian densitas mengukur berat komposit pada besaran volume tertentu, konsepnya menentukan tingkat kepadatan komposit karbon-karbon dengan berbagai macam bahan penguat. Pengujian densitas dilakukan secara eksperimental dengan metode Archimedes, pengujian ini didasarkan pada standar pengujian ASTM D792 [2][46] yang rumusannya adalah sebagai berikut:

- a. Sampel ditimbang pada temperatur ruang ( $\pm 20 - 25^\circ\text{C}$ ) sehingga diperoleh masa kering dari sampel.
- b. Selanjutnya sampel direndam dalam air murni dalam *beaker glass*. Perendaman harus dilakukan hingga seluruh permukaan sampel berada dalam *beaker glass* – dalam air murni – tidak menyentuh alas dari *beaker glass*, alias digantung sambil ditimbang.
- c. Setelah diperoleh masa sampel, baik di udara (kering) maupun di dalam air (basah), selanjutnya dilakukan perhitungan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\rho = \frac{A}{A - b} \times \rho_{air\ murni} \quad (3.3)$$

Keterangan:  $\rho$  = densitas bulk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )  
 A = masa sampel kering (g)  
 B = masa sampel tergantung dalam air (g)  
 $\rho_{air\ murni}$  = masa jenis air murni ( $0,9775 \text{ g}/\text{cm}^3$ )

### 3. 7. 7. Pengujian porositas.

Pengujian porositas untuk mengetahui persentase keradaan pori-pori yang dikandung dalam komposit karbon-karbon, konsepnya semakin banyak persentase pori dalam komposit akan semakin memperlemah komposit tersebut, karena pori atau rongga potensial memicu retakan, yang melemahkan ikatan serbuk.

Uji porositas dilakukan setelah uji densitas, selanjutnya dihitung dengan rumusan sebagai berikut:

$$\text{Porositas} = 1 - \frac{\text{Densitas hasil uji}}{\text{Densitas karbon}} \times 100\% \quad (3.4)$$

Densitas karbon memiliki nilai  $2,25 \text{ g/cm}^3$ . Densitas hasil uji adalah nilai densitas dari masing-masing sampel komposit karbon-karbon. Dari rumusan tersebut dapat dilihat bahwa persentase porositas akan berbanding terbalik dengan densitasnya.

### 3. 7. 8. Pengujian kuat tekan.

Kuat tekan sampel pra bentuk diuji dengan mesin *universal testing machine* mengikuti standar ASTM D 3410. Pengujian dilakukan dengan mengukur beban yang terbaca untuk memecahkan sampel prabentuk. Kuat tekan dihitung dengan membagi beban yang terbaca oleh luas penampang dari sampel pra bentuk. Pengujian dilakukan dengan menekan beban secara aksial terhadap sampel uji. Tekanan pemadatan sampel dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$p = \frac{F}{A_{\text{cetakan}}} \quad (3.5)$$

Keterangan:  $p$  = tekanan sampel  $\text{kg/cm}^2$ ,  $F$  = beban press hidrolik kg,  $A$  = luas penampang cetakan  $\text{cm}^2$ .

### 3. 7. 9. Pengujian impak

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kekuatan komposit karbon-karbon terhadap beban kejut. Uji impak dilaksanakan dengan peralatan dan metode sebagai berikut:

Impact Tool	: Resil Impactor CEAST
Method	: ISO 179/1eU
Method of tested	: Unnotched
Velocity of Impact	: $2,9 \text{ m/s}^2$
Pendulum energy	: 1 J
Span length	: 62 mm
Humidity	: 56%

Temperature : 23°C

### 3. 7. 10. Pengujian konduktivitas elektrik

Pengukuran yang dilakukan adalah terhadap resistansi elektrik, panjang jarak arus listrik mengalir dan luas penampang tempat arus listrik mengalir pada komposit yang bersangkutan. Selanjutnya resistensi statik atau  $\rho$  dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\rho = \frac{R.A}{l} \quad [\Omega \cdot m] \quad (3.6)$$

Dimana,  $\rho$  adalah tahanan statik dalam  $\Omega \cdot m$ , hasil perhitungan, R adalah tahanan listrik dalam  $\Omega$ , hasil pengukuran, A luas penampang dalam  $m^2$ , hasil pengukuran, l panjang jarak arus mengalir dalam m, hasil pengukuran.

Konduktivitas listrik dari komposit ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad [1/\Omega \cdot m] \text{ atau dengan satuan } [S/m] \quad (3.7)$$

Pengukuran diawali secara kualitatif dengan cara menghubungkan sampel komposit terhadap aliran listrik yang dilengkapi dengan lampu pijar, ketika lampu pijar menyala maka hal ini menunjukkan sampel komposit tersebut mampu menghantarkan daya elektrik.

### 3. 7. 11. Pengujian FTIR

FTIR mempunyai kepanjangan *Fourier Transform InfraRed*. Dalam *infrared spectroscopy*, radiasi dilewatkan melalui sampel. Beberapa radiasi infrared diserap oleh sampel dan beberapa radiasi ditransmisikan (*transmitted*). Spektra yang dihasilkan menggambarkan transmisi dan absorpsi molekular, yang menciptakan sidik jari (jejak) molekular dari sampel. Seperti sidik jari, tidak ada dua struktur molekul yang unik menghasilkan spektra *infrared* yang sama. *Infrared spectroscopy* dapat menghasilkan identifikasi positif (analisis kualitatif) dari tiap jenis material yang berbeda. Spektra yang dihasilkan umumnya rumit, mempunyai pita-pita serapan yang sangat sempit dan khas untuk tiap senyawa sehingga penggunaannya terutama untuk identifikasi senyawa organik (kualitatif), untuk tujuan kuantitatif analisis ini tidak banyak digunakan.

## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4. 1. Analisis karbon

#### 4. 1. 1. Uji komposisi bahan karbon.

Kandungan karbon setiap bahan yang digunakan dalam penelitian ini dilakukan uji *ultimate test* CHNSO dengan mesin uji LECO CHN-2000. Kandungan karbon, hidrogen dan nitrogen ditentukan dengan mengikuti standar ASTM D 5373, kandungan abu ditentukan mengikuti standar ASTM D 3174, total sulfur ditentukan mengikuti standar ASTM D 4239. Hasil pengujian dijelaskan sebagai berikut:

Jenis karbon yang digunakan sebagai serbuk penguat dalam komposit mempunyai kandungan karbon rata-rata di atas 70%, kecuali grafit mempunyai kandungan karbon 67,01%, grafit ini adalah produksi fabrikasi. Kandungan karbon tertinggi dihasilkan oleh limbah cangkang kelapa yang dikarbonisasi sampai 900°C, mengandung karbon sebesar 99,27%. Sebagai bahan matriks perekat yang digunakan dalam pembuatan komposit karbon-karbon ini adalah *coal tar pitch* yang mengandung karbon 84,99%, seperti ditunjukkan dalam Tabel 4. 1.

Tabel 4. 1: Hasil uji carbon analiser bahan serbuk penguat komposit

No	Bahan	Kode bahan	Pemanasan °C	Parameter analisis, %						
				C	H	N	S	O	Ash	moisture
1	Cangkang kelapa	ABK	900	99,27	0,16	0,62	0,05	0	1,64	-
2	Batu bara	BB	limbah	72,31	3,39	1,36	1,70	2,67	14,7	4,44
3	Semi kokas batu bara	SM-KOK RH(ABB)	1000	93,85	0,06	0,97	1,33	0	8,17	-
4	Grafit	AG	fabrikasi	67,01	0,21	0,06	0,04	4,05	23,02	0,67
5	Pitch batu bara	Pitch BB	limbah	84,99	5,91	1,32	0,61	5,03	2,14	-

Sebagai perbandingan hasil pengujian CHNSO, Blanco [4] melakukan pengujian CHNSO untuk bahan serbuk karbon dari bermacam-macam bahan yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4. 2, dan hasilnya tidak jauh berbeda dengan penelitian ini. Kokas petroleum, kokas pengecoran, grafit dan antrasit akan digunakan sebagai serbuk penguat dalam komposit karbon-karbon oleh Blanco.

Tabel 4.2: Karakteristik utama serbuk karbon [4].

Karbon	Analisis elemen, % w						
	C	H	N	S	O	Ash	Moisture
Kokas Petroleum	99,71	0,06	0,05	0,02	1,16	-	-
Kokas foundry	90,90	0,19	1,53	0,42	0,83	6,13	0,56
Grafit	76,17	0,32	0,04	0,31	3,09	20,07	0,64
Antrasit	91,53	1,85	0,54	0,34	3,19	2,55	4,40

Sebagai perbandingan, Mendez, tahun 2001 dan 2003 melakukan pengujian *coal tar pitch* komersial dengan uji yang sama dan menunjukkan kandungan karbon 92,47%C, hidrogen 4,53%H, nitrogen 1,12%N, sulfur 0,56%S dan oksigen 1,61%O, [7] [8]. Penggunaan *coal tar pitch* sebagai matriks *precursor* dengan pertimbangan antara lain murah dan kemampuannya menumbuhkan karbon yang dapat digrafitisasi dan kandungan karbonnya relatif tinggi. Hasil karbon dari *pitch* dapat ditingkatkan dan porositas bahan karbon dapat diturunkan melalui perlakuan panas [10].

Mendez, A juga melakukan pengujian CHNSO pada bahan serbuk karbon yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3: Karakteristik utama serbuk karbon [7] [8].

Karbon	Analisis elemen, % w						
	C	H	N	S	O	Ash	Moisture
Antrasit	82,28	1,69	0,95	1,00	2,97	11,37	3,41
Grafit	88,54	0,05	-	0,24	0,76	11,50	0,08
Kokas petroleum	86,30	2,88	1,82	5,82	1,43	1,39	0,13
Kokas foundry	92,23	0,11	1,06	0,52	0,42	5,79	0,10

Bahan karbon penguat dan *coal tar pitch* dilakukan pengujian sifat fisik yaitu *apparent density* mengikuti standar ASTM D 792 [2]. Pengujian dilakukan dalam ukuran mesh  $\geq 100$ . Hasil pengujian *apparent density* ditunjukkan dalam Tabel 4. 4.

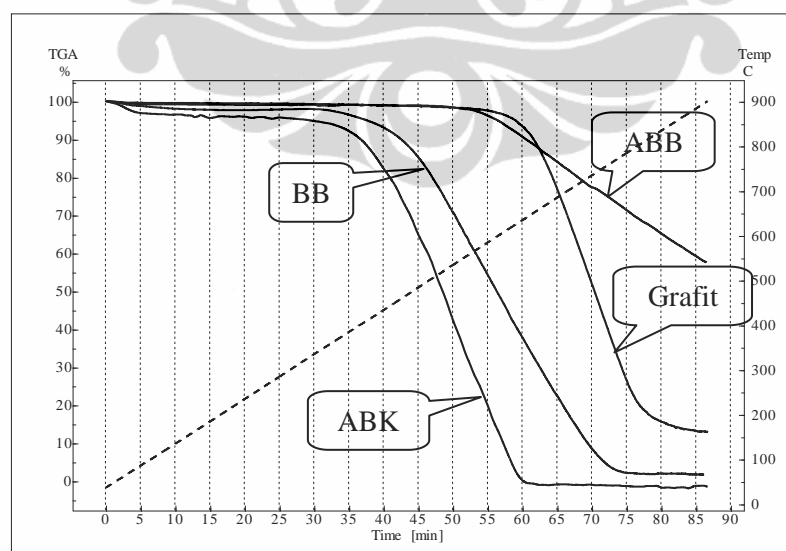
Tabel 4. 4: Data uji densitas bahan komposit

UJI DENSITAS BAHAN SERBUK			
	Karbon Batubara	Karbon Cangkang Kelapa	<i>Coal tar pitch</i>
No	Densitas [g/cm <sup>3</sup> ]	Densitas [g/cm <sup>3</sup> ]	Densitas [g/cm <sup>3</sup> ]
1	1,604	1,298	1,026
2	1,576	1,461	0,984
3	1,635	1,487	0,864
4	1,692	1,214	1,006
5	1,658	1,437	1,219
Rerata	1,633	1,379	1,020

Sebagai perbandingan, pengujian densitas oleh Mendez tahun 2001 dan 2003 [7][8] terhadap bahan serbuk karbon penguat antrasit menunjukkan  $1,696 \text{ g/cm}^3$ , grafit  $2,345 \text{ g/cm}^3$ , kokas petroleum  $1,469 \text{ g/cm}^3$ , kokas *foundry*  $2,020 \text{ g/cm}^3$ ,. Kravetskii [35] dengan melapisis bahan serbuk karbon untuk komposit menghasilkan densitas bahan karbon yang meningkat dari 1,42; 1,44; 2,3; 2,5  $\text{g/cm}^3$ . Sementara Wrobel [36] mendapatkan densitas bahan serat karbon  $1,65 \text{ g/cm}^3$ , yang menjadi serat penguat pada komposit polimer epoxy resin. Akinci [46] dalam mengisikan grafit dengan densitas dari 0,98 sampai  $1,67 \text{ g/cm}^3$  untuk memperkuat komposit bermatrik polimer polypropylene.

#### 4. 1. 2. Analisis *thermogravimetry* bahan karbon.

Hasil pengujian *thermogravimetry* terhadap jenis karbon menunjukkan bahwa proses karbonisasi bahan cangkang kelapa mulai terjadi pada  $350^\circ\text{C}$ , pada menit ke 35, berlangsung selama 25 menit, sampai menit ke 60 pada temperatur  $650^\circ\text{C}$ . Analisis ini menjadi dasar temperatur proses *curing* sampel pra bentuk komposit dari bahan dasar karbon cangkang kelapa dengan kode ABK (arang cangkang kelapa). Hasil pengujian *thermogravimetry* dalam bentuk grafik akuisisi data dari mesin uji ditunjukkan pada Gambar 4. 1.



Gambar 4. 1. Hasil uji *thermogravimetry analyzer* ABK, BB, ABB, Grafit



Bahan semikokas batubara yang dipanaskan ulang pada temperatur 1000°C akan mengalami karbonisasi pada temperatur sekitar 600°C pada menit sekitar ke 55, berlangsung selama 32 menit, sampai menit ke 87, pada temperatur 900°C, dengan kode ABB 1000 (arang batubara 1000). Data ini menjadi dasar temperatur proses *curing* sampel pra bentuk komposit dari bahan dasar karbon semikokas batubara dan *coal tar pitch*, seperti ditunjukkan dalam Gambar 4. 1.

Bahan batubara mentah mengalami karbonisasi pada temperatur sekitar 500°C pada menit sekitar ke 35, berlangsung selama 40 menit, sampai menit ke 75 pada temperatur 800°C. Data ini menjadi dasar temperatur proses *curing* sampel pra bentuk komposit dari bahan dasar serbuk batubara dan *coal tar pitch* dengan kode BB (batubara), seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 1.

Bahan grafit hasil produksi fabrikasi mengalami karbonisasi mulai pada temperatur sekitar 650°C pada menit ke 60, berlangsung selama 20 menit, sampai menit ke 80 pada temperatur 850°C. Analisis ini menjadi dasar dari temperatur proses *curing* sampel pra bentuk komposit dari bahan dasar grafit dan *coal tar pitch* atau dengan kode AG (arang grafit), seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 1.

Hasil pengujian *thermogravimetri* karbon cangkang kelapa, karbon batubara dan *coal tar pitch* ditunjukkan pada Gambar 4. 2. Gambar tersebut menunjukkan persentase penurunan berat karbon ketika temperatur pemanasan meningkat perlahan.

Bahan *coal tar pitch* mengalami penguapan kandungan air selama 15 menit awal, sampai pada temperatur 200°C, selanjutnya *coal tar pitch* mengalami karbonisasi mulai menit ke 15, selama selama 55 menit, sampai pada menit ke 70, mulai dari temperatur 200°C sampai 750°C, ketika temperatur meningkat terus sampai 900°C maka karbon dari *coal tar pitch* tersebut berubah menjadi abu, dan berat bahan tersebut tinggal  $\pm 10\%$  dari berat semula. Sebagai perbandingan, Guillen [42] melakukan pengujian TGA terhadap 9 jenis *coal tar pitch*, hasil pengujian menunjukkan bahwa *coal tar pitch* mengalami penguapan *moisture* sampai temperatur 200°C, dan selanjutnya mengalami karbonisasi sampai temperatur 600°C, *coal tar pitch* tersebut kehilangan berat sampai 60%.

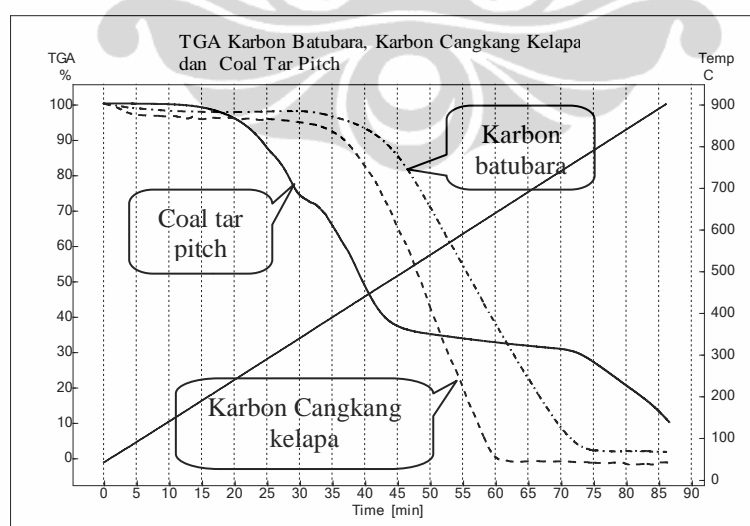
*Pitch* adalah *precursor* utama untuk menghasilkan karbon yang dapat digrafitisasi. *Coal tar pitch* dan *petroleum pitch* adalah yang paling umum

digunakan, keduanya tersusun dari hidrokarbon tetapi dengan kemampuan yang berbeda. Mora melakukan pengujian TGA terhadap *coal tar pitch*, hasilnya menunjukkan *coal tar pitch* mengalami penguapan *moisture* sampai pada temperatur 250°C, dan selanjutnya karbonisasi sampai temperatur 550°C, dan *coal tar pitch* tersisa berat sekitar 30% dan ini adalah abu [44].

Pengujian TGA terhadap *coal tar pitch* juga dilakukan oleh Blanco [45], hasil pengujian menunjukkan bahwa *coal tar pitch* mengalami penguapan *moisture* sampai pada temperatur 200°C dan selanjutnya mengalami karbonisasi sehingga kehilangan berat sampai 60%.

Berdasarkan analisis perbandingan dengan peneliti lain, ternyata hasil pengujian TGA terhadap bahan *coal tar pitch* dalam penelitian ini tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan, artinya sifat termal *coal tar pitch* sebagai bahan matriks penelitian ini mempunyai sifat termal yang sama dengan *coal tar pitch* yang digunakan oleh peneliti lain.

Berdasarkan analisis karakteristik uji *thermogravimetri*, selanjutnya dalam penelitian ini, sampel pra bentuk komposit ketiga bahan dilakukan proses *curing* pirolisis pada temperatur 500°C, hal ini dilakukan dalam kondisi atmosfer nitrogen, untuk menghindari terbakarnya bahan komposit tersebut.



Gambar 4. 2. Hasil uji *thermogravimetry analyzer coal tar pitch*

## 4. 2. Karakterisasi sifat mekanik

Karakterisasi sifat mekanik komposit karbon-karbon dilakukan dalam bentuk pengujian kuat tekan, pengujian kekerasan, pengujian aus dan pengujian kuat impak. Karakteristik sifat mekanik untuk penelitian pendahuluan dilakukan pengujian kuat tekan dan pengujian kekerasan. Karakterisasi sifat mekanik untuk penelitian tahap ke dua dilakukan pengujian kekerasan dan laju aus dari komposit karbon-karbon. Karakterisasi sifat mekanik untuk penelitian tahap ke tiga dilakukan pengujian kekerasan, laju aus dan kekuatan impak.

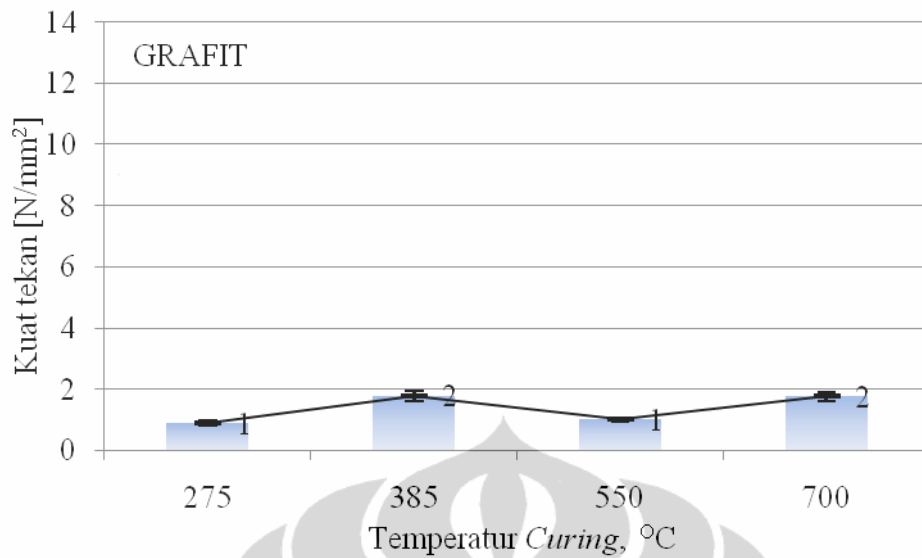
### 4. 2. 1. Karakterisasi sifat mekanik

Penelitian pendahuluan memanfaatkan karbon hasil karbonisasi limbah cangkang kelapa, serbuk limbah batubara, semikokas yang dipanaskan ulang pada  $1000^{\circ}\text{C}$  dan grafit produksi fabrikasi sebagai serbuk karbon penguat dalam material rekayasa komposit karbon-karbon dengan matriks karbon dari *coal tar pitch*. Target penelitian ini adalah meneliti sifat mekanik dan fisik dari material rekayasa komposit karbon-karbon berbasis limbah organik, dengan matriks *coal tar pitch* yang dipadatkan secara dingin dan dikarbonisasi melalui proses *curing* vakum sehingga menghasilkan bahan komposit karbon-karbon.

#### 4. 2. 1. 1. Analisis hubungan kuat tekan terhadap temperatur *curing*

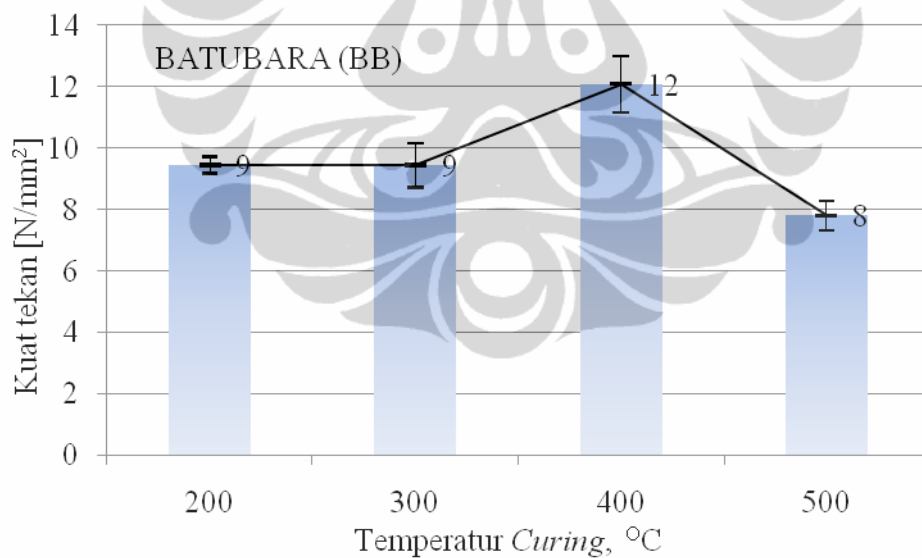
Hasil uji kuat tekan komposit berbahan karbon serbuk grafit, dengan temperatur *curing* 275; 385; 550;  $700^{\circ}\text{C}$  menunjukkan semakin tinggi temperatur proses *curing* terhadap sampel pra bentuk, dihasilkan kuat tekan yang semakin tinggi. Nilai kuat tekan tertinggi  $2\text{ N/mm}^2$ , diperoleh pada temperatur *curing*  $700^{\circ}\text{C}$ . Nilai kuat tekan terendah  $1\text{ N/mm}^2$ , diperoleh pada temperature *curing*  $275^{\circ}\text{C}$ , seperti ditunjukkan dalam Gambar 4. 3.

Hasil uji kuat tekan komposit berbahan serbuk batubara dengan matriks *coal tar pitch*, pada temperatur *curing* 200; 300; 400;  $500^{\circ}\text{C}$ , menunjukkan penurunan kuat tekan komposit karbon-karbon berbahan serbuk batubara. Komposit mengalami kuat tekan tertinggi ketika diproses *curing* pada temperatur  $400^{\circ}\text{C}$ , yaitu  $12\text{ N/mm}^2$ , dan nilai terendah yaitu  $8\text{ N/mm}^2$ .



Gambar 4. 3. Hubungan temperatur *curing* VS kuat tekan, komposit karbon-karbon berbahan grafit

Jika dilihat nilainya maka untuk jenis komposit ini semakin tinggi temperatur *curing*, kuat tekan semakin turun. Hal tersebut ditunjukkan pada Gambar 4. 4.

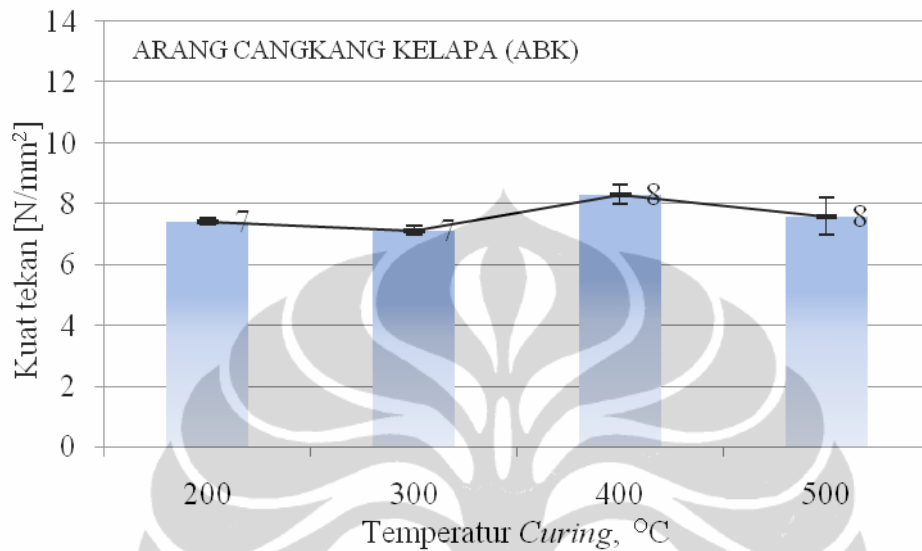


Gambar 4. 4. Hubungan temperatur *curing* VS kuat tekan, komposit karbon-karbon berbahan serbuk karbon batubara (BB)

Hasil uji kuat tekan komposit berbahan karbon cangkang kelapa dengan matriks *coal tar pitch*, pada temperatur *curing* 200; 300; 400; 500°C menunjukkan kecenderungan semakin tinggi temperatur *curing* semakin meningkatkan kuat tekan komposit. Nilai kuat tekan tertinggi dihasilkan oleh proses *curing* pada

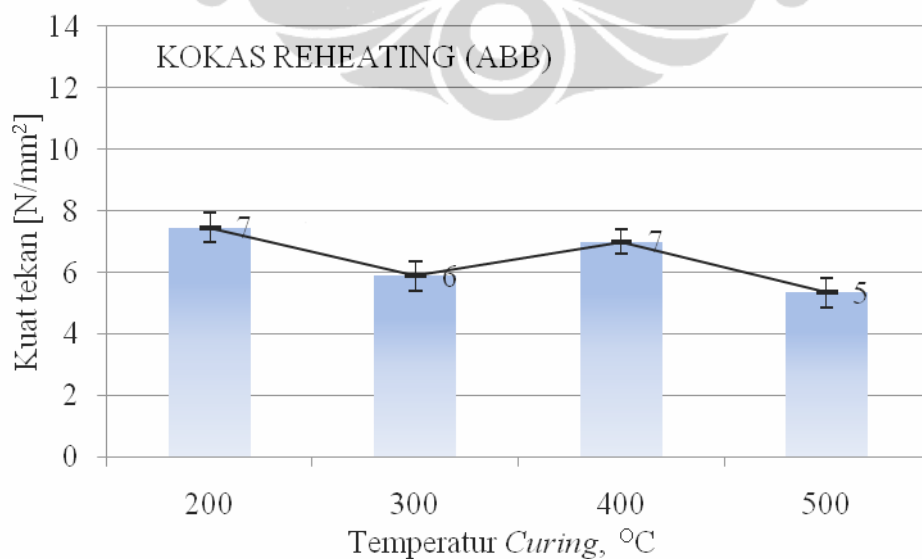
temperatur 400°C, yaitu 8,31 N/mm<sup>2</sup>. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 4. 5.

Hasil uji kuat tekan komposit dengan bahan penguat semikokas batubara dipanaskan ulang 1000°C, dengan kode ABB 1000 (arang batubara 1000), menunjukkan penurunan kuat tekan ketika temperatur *curing* ditingkatkan.



Gambar 4. 5. Hubungan temperatur *curing* VS kuat tekan, komposit karbon-karbon berbahan serbuk arang cangkang kelapa (ABK)

Nilai kuat tekan tertinggi diperoleh pada temperatur *curing* 200°C, yaitu 7 N/mm<sup>2</sup>, seperti ditunjukkan dalam Gambar 4. 6.



Gambar 4. 6. Hubungan temperatur *curing* VS kuat tekan, komposit karbon-karbon berbahan serbuk semikokas *reheating* (ABB)

Bahan penguat komposit batubara dan semikokas *reheating*, mengalami kecenderungan yang sama yaitu semakin temperatur ditingkatkan maka kuat tekan cenderung menurun.

Tetapi gejala yang berbeda ditunjukkan oleh komposit dengan bahan penguat serbuk grafit dan cangkang kelapa yang cenderung meningkat kuat tekannya ketika temperatur *curing* ditingkatkan, meskipun perlakuan *curing* pada temperatur yang berbeda pada bahan grafit.

Blanco [4] menyatakan, kuat tekan tidak hanya tergantung pada struktur mikro dari material, yang meliputi rongga dan retakan yang terbentuk pada saat karbonisasi, tetapi juga dipengaruhi oleh sifat serbuk karbon. Blanco juga menyatakan bahwa porositas dan kekuatan tekan komposit karbon-karbon dipengaruhi oleh deformasi material pada karbonisasi. Penelitian ini diperkirakan juga mengalami hal yang sama misalnya pada kasus komposit karbon-karbon dengan penguat serbuk grafit. Komposit dengan serbuk grafit mempunyai kuat tekan yang rendah dibanding terhadap bahan serbuk karbon cangkang kelapa. Douarce [5] menyatakan bahwa fenomena oksidasi menurunkan semua sifat mekanik. Pelemahan sifat kuat tekan dalam penelitian ini diperkirakan adalah akibat terjadinya oksidasi pada saat proses pirolisis karbonisasi. Karakteristik serbuk karbon, komposisi kimia dan sifat fisik *pitch* dan sifatnya selama langkah proses yang berbeda mengendalikan sifat akhir dari komposit karbon-karbon yang dihasilkan. Ketika *pitch* digunakan sebagai matriks pembentuk dalam komposit karbon-karbon, keberadaan serbuk karbon penguat yang berbeda bisa mengubah beberapa sifatnya, yang bergantung pada komposisi *pitch* dan jenis karbon. Berbagai karbon berinteraksi sangat berbeda dengan serbuk utama. Interaksi ini sangat lemah terhadap grafit [8]. Penelitian ini nampaknya merupakan bukti dari teori tersebut. *Coal tar pitch* tidak mampu merekat dengan baik terhadap serbuk grafit, sehingga menghasilkan kuat tekan yang paling lemah di antara serbuk karbon penguat yang lain.

Densitas yang tinggi tidak selalu mengakibatkan kekuatan tekan yang tinggi, ikatan antarmuka (*interface*) antara *pitch* perekat dan serbuk karbon sebagai penguat semakin melemah setelah karbonisasi (pirolisis). Kuat tekan dari komposit karbon-karbon tidak hanya berkaitan dengan densitas volume dan proses

densifikasi, tetapi juga berkaitan terhadap sifat serbuk yang meliputi kuat tekan dari serbuk itu sendiri, struktur mikro serbuk dan morfologi permukaan serbuk. Semakin tinggi kuat tekan serbuk, semakin kasar permukaan serbuk, semakin banyak rongga dari tiap serbuk karbon, maka akan semakin tinggi kuat tekan komposit karbon berbasis *coal tar pitch* [17].

Densitas yang tinggi dalam komposit karbon-karbon adalah sifat yang diharapkan ketika rongga yang ada semakin sedikit, yang pada gilirannya mempengaruhi kekuatan. Kuat tarik dan tekan komposit karbon-karbon dipengaruhi kekuatan ikatan antarmuka (*interface*) antara serbuk dan matriks, temperatur perlakuan panas (karbonisasi pirolisis) dan densitas komposit [48]. Komposit karbon-karbon dengan bahan serbuk karbon cangkang kelapa dan serbuk karbon batubara mempunyai kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan terhadap komposisi karbon dari bahan grafit dan semikokas batubara, hal ini bisa terjadi diperkirakan karena serbuk karbon cangkang kelapa dan karbon batubara mempunyai kuat tekan yang lebih tinggi dari grafit dan semikokas batubara. Serbuk karbon cangkang kelapa dan batubara diperkirakan juga mempunyai permukaan yang lebih kasar daripada grafit dan semikokas batubara.

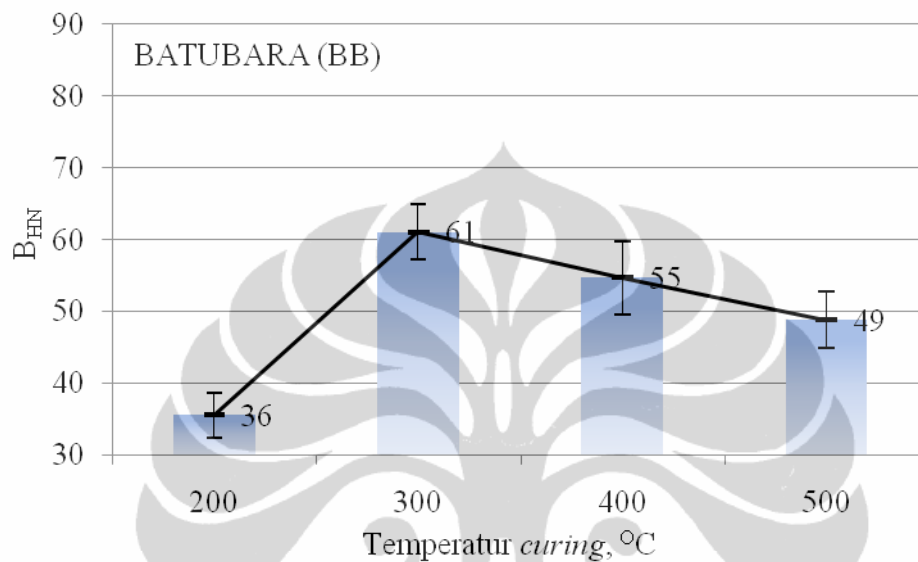
Sebagai perbandingan Mendez dan kawan-kawan menghasilkan komposit karbon dengan kuat tekan 20 – 130 N/mm<sup>2</sup> [10]. Ling-jun, dan kawan-kawan mengungkapkan penyebab kelemahan sifat mekanik secara umum. Bagian dari gas atau pengotor di dalam bahan karbon pasti akan melepaskan diri selama proses grafitisasi dan karbonisasi sehingga menyebabkan penurunan kepadatan sampel karbon. Penelitian ini menghasilkan komposit dengan kuat tekan 38,61 – 83,46 N/mm<sup>2</sup> [17].

#### **4. 2. 1. 2. Analisis hubungan nilai kekerasan terhadap temperatur *curing***

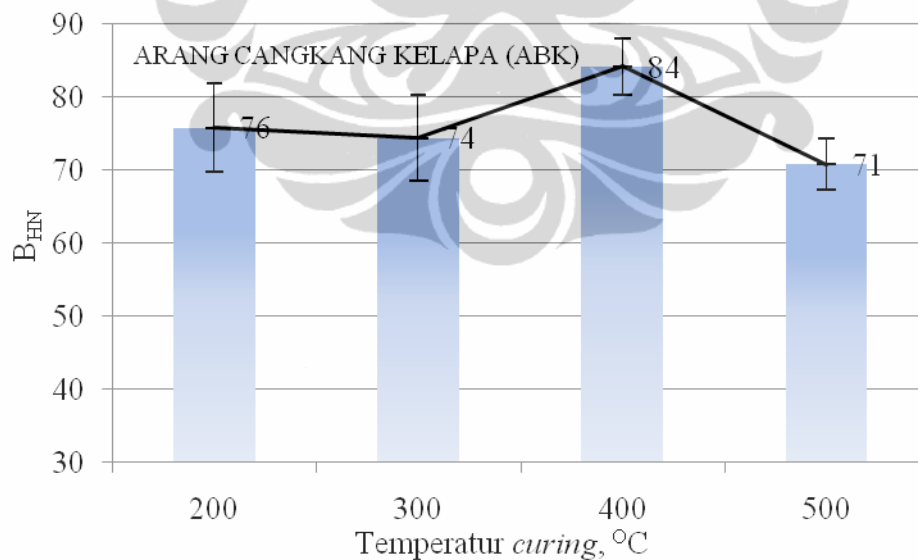
Pengujian kekerasan dilakukan terhadap komposit dengan bahan penguat serbuk batubara, arang cangkang kelapa dan serbuk semikokas *reheating*. Hal ini dilakukan dengan pertimbangan masing-masing komposit mengalami perlakuan temperatur *curing* yang sama, yaitu 200; 300; 400; 500°C.

Secara garis besar, distribusi nilai uji keras yang dilakukan menunjukkan kecenderungan bahwa ketika temperatur *curing* ditingkatkan menyebabkan peningkatan nilai kekerasan dari komposit karbon-karbon berbahan penguat

serbuk batubara. Nilai kekerasan tertinggi adalah  $B_{HN}$  61, diperoleh ketika proses *curing* pada temperatur  $300^{\circ}\text{C}$ , kekerasan paling rendah adalah  $B_{HN}$  36 dihasilkan oleh komposit pada proses temperatur *curing*  $200^{\circ}\text{C}$ , selanjutnya pada temperatur *curing*  $500^{\circ}\text{C}$  menghasilkan nilai kekerasan  $B_{HN}$  49, sehingga secara garis besar terjadi peningkatan nilai kekerasan, fakta tersebut ditunjukkan pada Gambar 4. 7.



Gambar 4. 7. Grafik hubungan temperatur *curing* VS  $B_{HN}$ , komposit bahan serbuk batubara atau BB



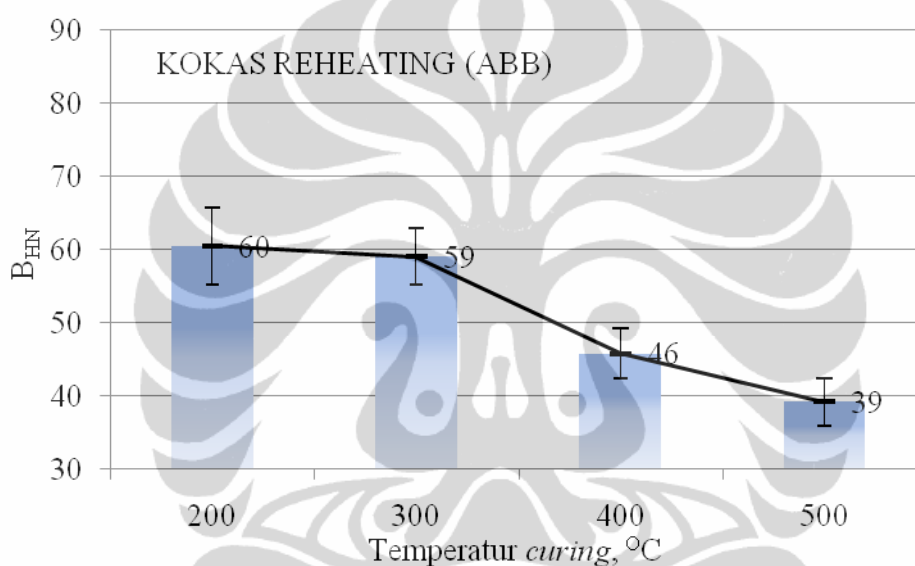
Gambar 4. 8. Grafik hubungan temperatur *curing* VS  $B_{HN}$ , komposit bahan arang cangkang kelapa atau ABK

Distribusi nilai keras komposit karbon-karbon dengan bahan penguat dari arang cangkang kelapa menunjukkan kecenderungan penurunan kekerasan ketika



temperatur perlakuan *curing* ditingkatkan. Nilai kekerasan tertinggi  $B_{HN}$  84 dihasilkan oleh komposit karbon-karbon yang dipanaskan pada temperatur  $400^{\circ}\text{C}$ , hal ini ditunjukkan dalam Gambar 4. 8.

Kecenderungan penurunan nilai kekerasan ketika temperatur perlakuan *curing* ditingkatkan, juga terjadi pada komposit karbon-karbon dengan bahan penguat dari serbuk arang semikokas batubara yang dipanaskan ulang  $1000^{\circ}\text{C}$ . Nilai kekerasan tertinggi adalah  $B_{HN}$  60 dihasilkan oleh komposit karbon-karbon yang diproses *curing* pada temperatur  $200^{\circ}\text{C}$ , seperti ditunjukkan dalam Gambar 4. 9.



Gambar 4. 9. Grafik hubungan temperatur *curing* VS  $B_{HN}$ , komposit bahan semikokas *reheating* atau ABB

Penyebab penurunan kekerasan dan sifat mekanik lainnya dalam komposit karbon-karbon berbasis *coal tar pitch* adalah pengembangan matriks *pitch* karena pembentukan retakan internal atau rongga-rongga yang tidak keluar di permukaan. Sifat mekanik dari komposit karbon tidak hanya tergantung pada bahan penguat dan matriks, tetapi juga pada karakteristik ikatan antarmuka antara serbuk dan matriks. Interaksi antara komponen tersebut berpengaruh langsung pada kekuatan mekanik untuk sistem komposit *pitch* / karbon [10].

Sifat mekanik, termasuk sifat kekerasan, dari komposit karbon-karbon berbasis *pitch* yang dikarbonisasi tidak hanya dipengaruhi oleh derajat karbonisasi ataupun grafitisasi, tetapi juga oleh densitas volume dan kekuatan asal dari

sampel. Semakin rendah derajat karbonisasi, semakin tinggi densitas volume dan semakin tinggi kekuatan mekanik bahan mentah dapat memperbaiki sifat mekanik, termasuk tingkat kekerasan komposit karbon-karbon berbasis pitch [17]. Hal ini dapat dibuktikan bahwa nilai kekerasan komposit karbon-karbon berbasis serbuk karbon cangkang kelapa mempunyai nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan terhadap komposit dengan bahan serbuk karbon batubara dan semikokas.

Secara eksperimen kekuatan tarik komposit karbon-karbon adalah pengaruh langsung dari densitas komposit, temperature perlakuan panas dan kekuatan ikatan antarmuka antara serbuk dan matriks. Sifat mekanik termasuk kekerasan yang efektif dari komposit karbon-karbon dipengaruhi oleh tiga kondisi, ikatan yang sempurna antara matriks dan serbuk karbon, peretakan (pelepasan ikatan) pada ikatan antarmuka (*interface*) matriks dan serbuk karbon, dan keberadaan rongga matriks yang mendorong pelepasan ikatan antarmuka, seperti yang dialami oleh komposit karbon-karbon dalam penelitian ini, yang ditunjukkan struktur mikro pada analisis SEM pada sub bab 4. 4. Pada saat pendinginan dari temperatur perlakuan panas (karbonisasi) ke temperatur ruang juga dapat menggagalkan kesatuan antar elemen, memperbesar pelepasan ikatan antarmuka serbuk dan matriks [48].

Penelitian ini diprediksi juga mengalami hal yang sama, hal ini dapat dibuktikan melalui pembentukan rongga-rongga yang terdeteksi pada topografi hasil uji SEM dalam penjelasan di belakang.

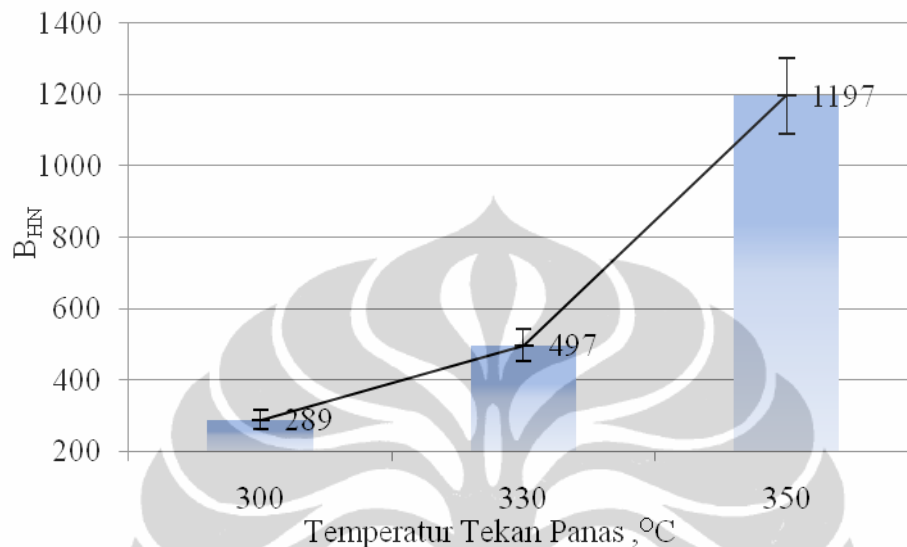
#### **4. 2. 2. Karakterisasi sifat mekanik penelitian tahap dua**

Penelitian ini adalah tentang komposit karbon-karbon berbasis bahan karbon serbuk dengan ukuran  $\geq 80$  mesh dari limbah serbuk batubara dalam matriks *coal tar pitch* melalui proses tekan panas dengan pemanasan temperatur bervariasi dari 300; 330; 350°C yang mempunyai sifat mekanik tahan aus.

##### **4. 2. 2. 1. Analisis hubungan kekerasan terhadap temperatur tekan panas.**

Hubungan temperatur proses tekan panas terhadap kekerasan komposit karbon-karbon ditunjukkan dalam Gambar 4. 10. Gambar tersebut menunjukkan

kecenderungan bahwa ketika temperatur proses tekan panas ditingkatkan menyebabkan peningkatan nilai kekerasan dari komposit karbon-karbon berbahan penguat serbuk batubara. Nilai kekerasan maksimum diperoleh ketika temperatur tekan panas dilakukan pada 350°C, yaitu  $B_{HN}$  1197.



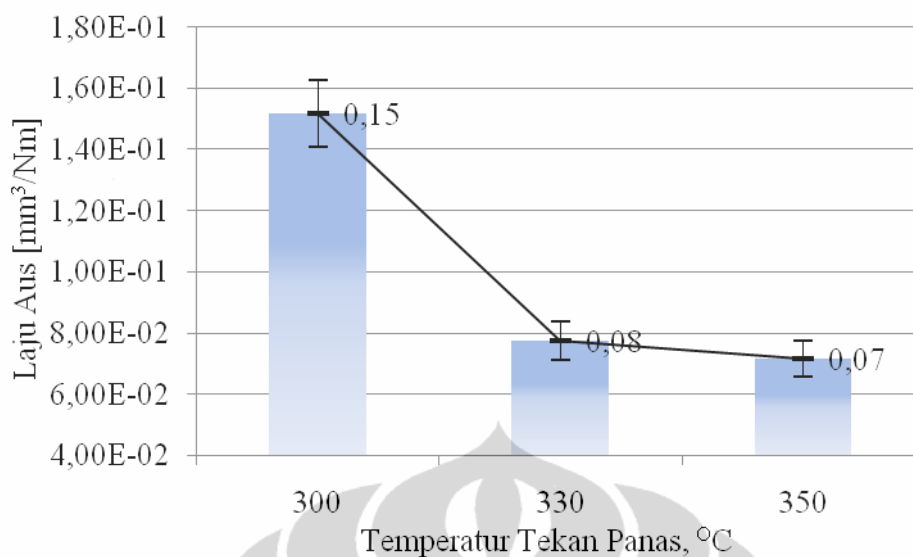
Gambar 4. 10. Grafik hubungan temperatur tekan panas VS  $B_{HN}$

#### 4. 2. 2. 2. Analisis hubungan sifat laju aus terhadap temperatur tekan panas.

Penurunan laju aus dari komposit karbon-karbon ketika temperatur proses tekan panas ditingkatkan ditunjukkan dalam Gambar 4. 11. Ketika hal ini dihubungkan dengan grafik Gambar 4. 10, maka hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur proses tekan panas semakin meningkatkan nilai kekerasan komposit karbon-karbon, dan sehingga mengurangi laju keausan.

Komposit karbon-karbon yang diproses dengan tekan panas, dengan temperatur yang ditingkatkan dapat meningkatkan ketahanan aus dari material tersebut. Ketahanan aus maksimum dari komposit karbon-karbon adalah ketika laju aus terkecil yaitu  $0,07 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ , dan tertinggi  $0,15 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ .

Pencetakan dalam penelitian ini, yaitu pemanasan sekaligus juga ditekan, untuk meminimalisir pembangkitan retakan yang terjadi bersamaan dengan *spring-back*. Selama karbonisasi, *pitch* dan *green petroleum coke* dan antrasit mengalami transformasi yang dapat menyebabkan material berubah bentuk. Faktor lain yang mempengaruhi sifat mekanik dari komposit karbon adalah kualitas campuran atau ikatan antarmuka serbuk karbon dan *pitch* [10].



Gambar 4. 11. Grafik hubungan temperatur tekan panas VS laju aus,

Sifat gesek dan aus dari komposit karbon-karbon dipengaruhi oleh temperatur lingkungan ketika bergesekan, yang berkontribusi terhadap degradasi dan dekomposisi dari perekatan dari komposit tersebut [14].

Proses pengausan dalam penelitian ini diperkirakan terjadi dalam tiga tingkat, karena pemotongan mikro dari serbuk yang tajam, matriks karbon yang melingkupi serbuk tergesek dan terbentuknya serbuk menjadi serpihan. Serbuk karbon yang sejajar terhadap arah gesekan terkelupas dan menanggung beban, yang mengakibatkan retakan dan pecahan serbuk, dan bagian tersebut mengalami retak dan terkelupas dari permukaan yang bergesekan, yang selanjutnya pelepasan ikatan antarmuka terbentuk [19].

Sifat tribologi komposit karbon-karbon dipengaruhi oleh faktor kelembaban pada kerja ausan, struktur mikro, proses fabrikasi, yang semuanya mempengaruhi unjuk kerja ketahanan aus komposit [33].

Pembasahan permukaan yang baik dapat meningkatkan kekuatan ikatan adesif melalui peningkatan kerja termodinamik dari perekatan atau oleh pengurangan cacat ikatan antarmuka. Bila lebih banyak cacat, misalnya alur-alur berbentuk rongga, tonjolan-tonjolan pada permukaan serbuk yang dapat meningkatkan kekasaran permukaan serbuk karbon, hal ini akan meningkatkan kontak permukaan yang lebih besar antara serbuk karbon dan matriks untuk meningkatkan gaya ikatan Van Der Waals, yang memperbaiki derajat ikatan

*interlocking* mekanik antara serbuk dan matriks. Adesi antara serbuk karbon dan matriks memainkan peranan penting pada sifat tribologi dari komposit karbon-karbon [37].

Sifat aus dan gesekan dari material komposit karbon-karbon didasarkan pada beberapa parameter yang membentuk sistem tribologi, jenis serbuk dan matriks, ikatan antarmuka, beban, kecepatan, kelembaban, tekanan kontak permukaan, pelumasan [38].

Blanco [43] memasukkan pertimbangan kontribusi oksidasi terhadap aus dari komposit karbon-karbon, selama kondisi oksidasi matriks karbon yang pertama teroksidasi dan ini mengakibatkan penurunan kekuatan dari komposit tersebut.

Ketika beban kerja konstan dan kecepatan gesekan meningkat, gaya gesek pada serbuk meningkat. Jika gaya gesek pada serbuk melebihi kekuatan ikatan matriks dan serbuk, maka hal ini menyebabkan pecah dan terkelupasnya serbuk. Lapisan permukaan lepas dengan ausan yang semakin besar, yang terdiri dari serbuk yang saling terikat dengan lemah. Ketahanan aus material dapat diasumsikan dengan efisiensi kerja perlindungan lapisan permukaan, yang bergantung pada sifat kekuatan dan deformasi material dan rekatan terhadap bahan dasar. Karakteristik ini muncul ditentukan oleh sifat permukaan dan bentuk dari serbuk ausan, yang tergantung pada komposisi, struktur dan sifat dari material serbuk karbon dan matriks. Perlakuan panas temperatur rendah menunjukkan aus abrasif yang tinggi dan aus karena oksidasi [43]. Pada penelitian juga menunjukkan bahwa perlakuan panas pada saat penekanan dengan temperatur yang rendah maka menghasilkan laju aus yang tinggi dibandingkan ketika ditekan dengan temperatur yang lebih tinggi.

Sebagai perbandingan, Manocha dalam meneliti komposit karbon-karbon menunjukkan koefisien gesek yang rendah dalam arah serat 0,3 – 0,5 dan 0,5 – 0,8 untuk arah tegak lurus serat. Laju aus menunjukkan hal yang sama 0,05 – 0,1 mm untuk arah sejajar serat dan 0,1 – 0,3 mm untuk arah tegak lurus serat [3].

Mendez [10] menguji komposit karbon yang dibuat dari empat jenis *pitch* dan 4 jenis karbon yang digunakan sebagai sepatu rem karbon menghasilkan laju aus  $6 \times 10^{-8}$  g/Nm.

Su [13] membuat jalinan karbon untuk komposit jalinan karbon melalui pelapisan celup dalam resin *phenolic* menghasilkan laju aus 0,5 – 1,8 ( $10^{-13}$ )  $\text{mm}^3/\text{Nm}$ .

Howling [39] menghasilkan faktor aus yang lebih rendah dari  $1 \times 10^{-7}$   $\text{mm}^3/\text{Nm}$  untuk material komposit karbon-karbon.

Sementara dalam penelitian ini laju aus diperoleh maksimum 0,15  $\text{mm}^3/\text{Nm}$  dan menurun ketika panas pemadatan ditingkatkan, laju aus menjadi 0,07  $\text{mm}^3/\text{Nm}$ . Hal ini diprediksi bahwa selama karbonisasi senyawa pitch yang mudah menguap terlepas. Senyawa yang mudah menguap tersebut akan mencari jalan keluarnya, yang mengakibatkan tegangan dan pemuaian dalam material. Pemuaian ini juga dapat mempengaruhi sifat material, seperti densitas dan sifat mekanik [17]. Oksidasi terhadap aus dari komposit karbon-karbon, selama kondisi oksidasi matriks *coal tar pitch* yang pertama teroksidasi dan ini mengakibatkan penurunan kekuatan dari komposit tersebut [43] dan ini diperkirakan terjadi pada pengujian aus dalam penelitian ini.

#### **4. 2. 3. Karakterisasi sifat mekanik penelitian tahap tiga**

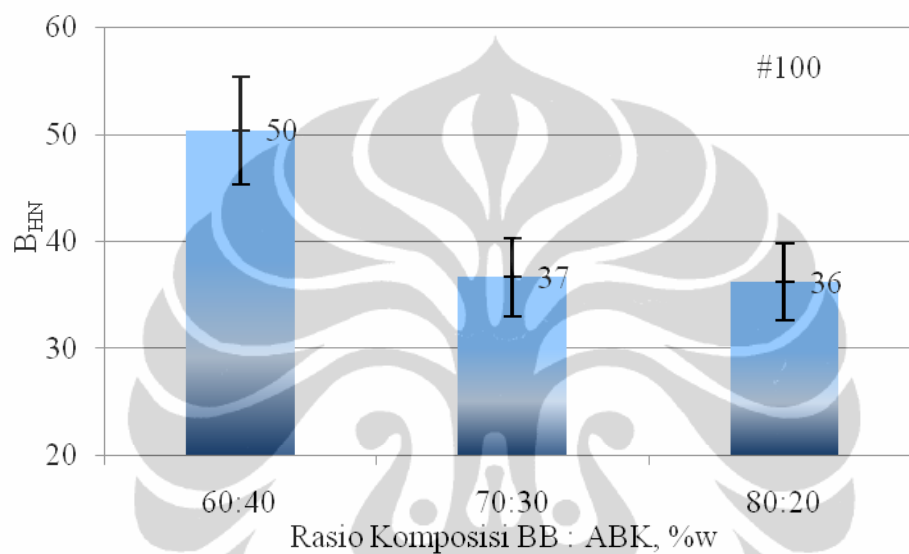
Penelitian tahap tiga adalah pembuatan komposit berbasis bahan karbon dari serbuk limbah batubara dan serbuk karbon limbah cangkang kelapa sebagai bahan penguat dalam matriks *coal tar pitch*, yang ditinjau dari sudut variasi ukuran karbon serbuk penguat dengan konsep penelitian sebagai berikut: “Pengaruh ukuran serbuk karbon terhadap karakteristik komposit karbon-karbon berbasis limbah organik”. Variasi ukuran serbuk dan komposisi campuran serbuk batubara dan karbon cangkang kelapa menjadi fokus dalam penelitian ini. Rekayasa material komposit karbon-karbon ini melibatkan proses tekan panas sebagai proses kompaksi dan proses *curing* pirolisis.

##### **4. 2. 3. 1. Analisis hubungan kekerasan terhadap rasio komposisi.**

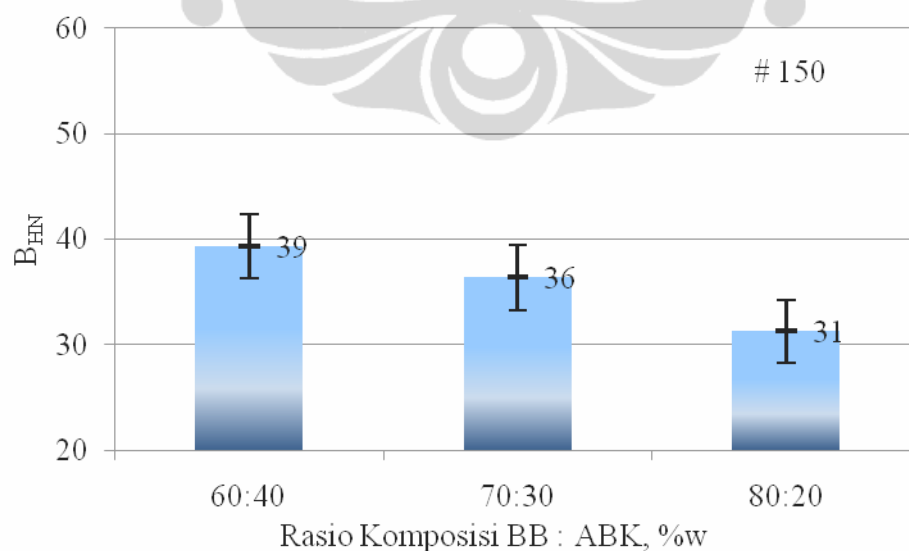
Perubahan komposisi campuran BB : ABK mempengaruhi nilai kekerasan komposit, dalam gambar ditunjukkan semakin banyak kandungan BB ternyata kekerasan komposit semakin turun hal ini menunjukkan bahwa bahan komposit dari karbon cangkang kelapa lebih keras dibandingkan bahan komposit dari

karbon batubara, seperti ditunjukkan dalam Gambar 4. 12.

Nilai kekerasan tertinggi adalah  $B_{HN}$  50, diperoleh dari komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi BB:ABK = 60:40, artinya kandungan karbon batubara 60% berat dan kandungan karbon cangkang kelapa 40% berat menghasilkan nilai kekerasan Brinell yang lebih tinggi dibandingkan dengan rasio komposisi BB:ABK = 80:20, yang menghasilkan nilai kekerasan  $B_{HN}$  36, untuk ukuran serbuk yang sama yaitu mesh 100.



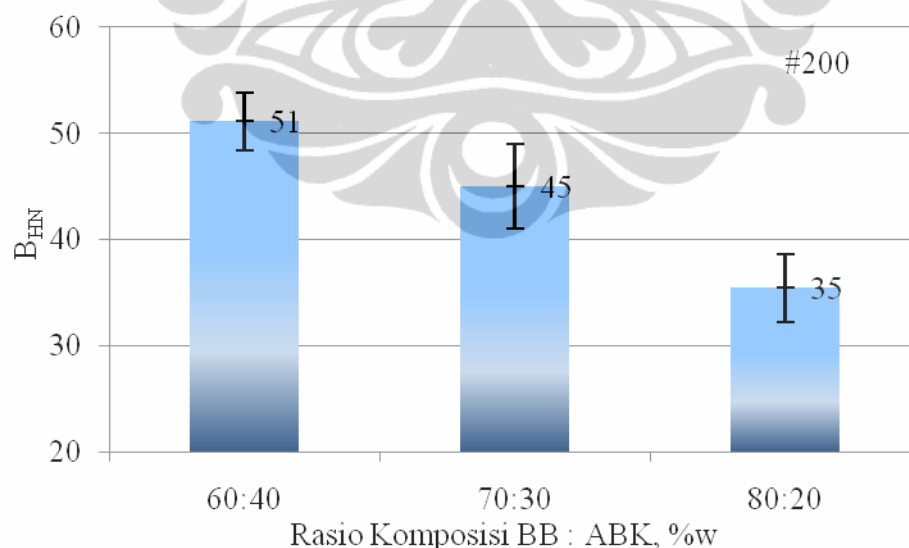
Gambar 4. 12. Grafik hubungan rasio komposisi VS  $B_{HN}$ , mesh 100.



Gambar 4. 13. Grafik hubungan rasio komposisi VS  $B_{HN}$ , mesh 150.

Hasil pengujian dan penghitungan kekerasan komposit untuk semua komposisi dengan mesh 150 dijelaskan dalam Gambar 4. 13. Komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk mesh 150 dalam rasio komposisi BB:ABK = 60:40 menghasilkan nilai kekerasan  $B_{HN}$  39, sementara itu rasio komposisi BB:ABK = 80:20 menghasilkan nilai kekerasan yang semakin rendah yaitu  $B_{HN}$  31. Hal ini juga menunjukkan kandungan karbon batubara yang semakin tinggi akan semakin melemahkan kekerasan komposit karbon-karbon, dalam gambar ditunjukkan bahwa semakin banyak kandungan BB ternyata kekerasan komposit semakin turun hal ini menunjukkan bahwa bahan karbon cangkang kelapa lebih keras daripada bahan karbon batubara.

Hasil pengujian dan penghitungan kekerasan komposit untuk semua komposisi pada mesh 200 dijelaskan dalam Gambar 4. 14. Komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi BB:ABK = 60:40, menghasilkan  $B_{HN}$  51, sementara itu rasio komposisi 80:20 menghasilkan kekerasan  $B_{HN}$  35, dalam gambar ditunjukkan semakin banyak kandungan BB ternyata kekerasan komposit semakin turun hal ini menunjukkan bahwa bahan komposit dari karbon cangkang kelapa lebih keras dibandingkan bahan komposit dari karbon batubara.

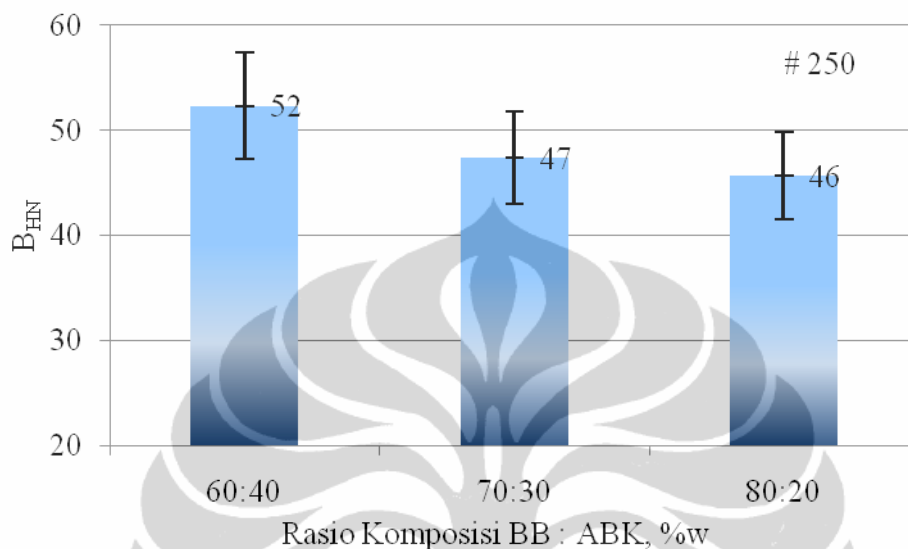


Gambar 4. 14. Grafik hubungan rasio komposisi VS  $B_{HN}$ , mesh 200

Hasil pengujian dan penghitungan kekerasan komposit untuk semua komposisi pada mesh 250 ditunjukkan pada Gambar 4. 15. Kecenderungan yang

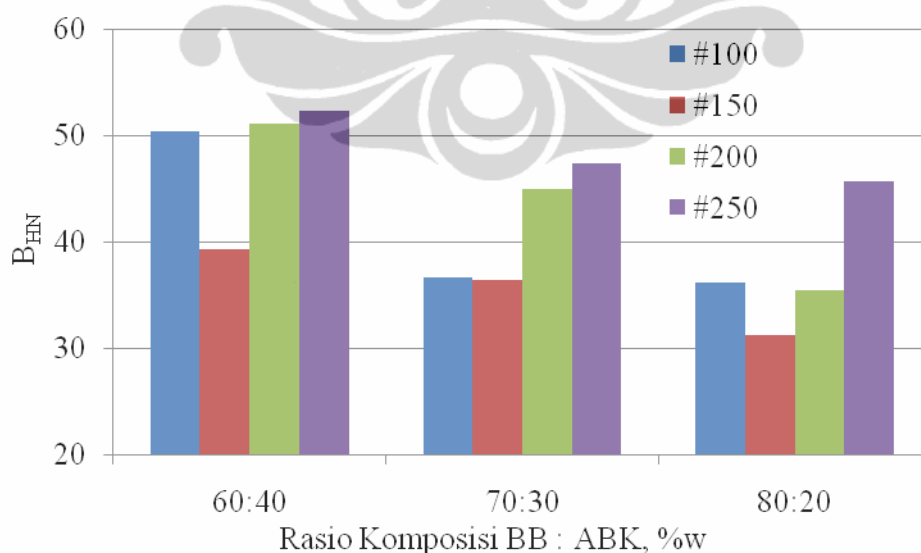


sama dengan komposit dari jenis ukuran serbuk lainnya yaitu penurunan kekerasan komposit. Rasio komposisi 60:40 menghasilkan kekerasan dengan nilai  $B_{HN}$  52, sementara rasio komposisi 80:20 menghasilkan nilai kekerasan  $B_{HN}$  46.



Gambar 4. 15. Grafik hubungan rasio komposisi VS  $B_{HN}$ , mesh 250

Empat jenis ukuran serbuk dan dalam rasio komposisi yang sama ternyata menunjukkan kecenderungan yang sama, tetapi menghasilkan nilai yang berbeda.

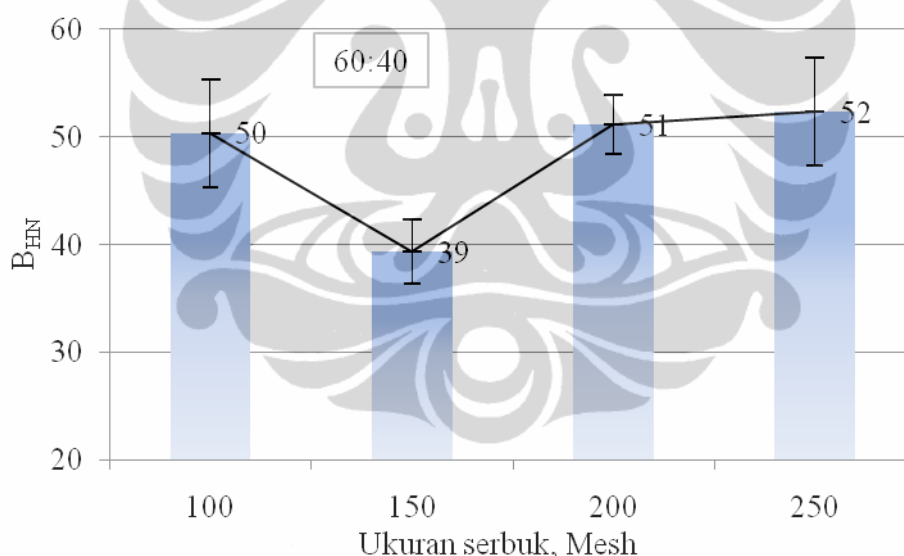


Gambar 4. 16. Perbandingan Grafik hubungan rasio komposisi VS  $B_{HN}$ , mesh 100; 150; 200; 250

Sebagai perbandingan ke empat jenis ukuran serbuk, berikut ini ditunjukkan grafik pengaruh rasio komposisi BB : ABK terhadap nilai kekerasan komposit, yang menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu menurunnya nilai kekerasan komposit ketika komposisi BB : ABK berubah dari 60:40 ke 80:20. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 4. 16.

#### 4. 2. 3. 2. Analisis hubungan nilai kekerasan terhadap ukuran serbuk

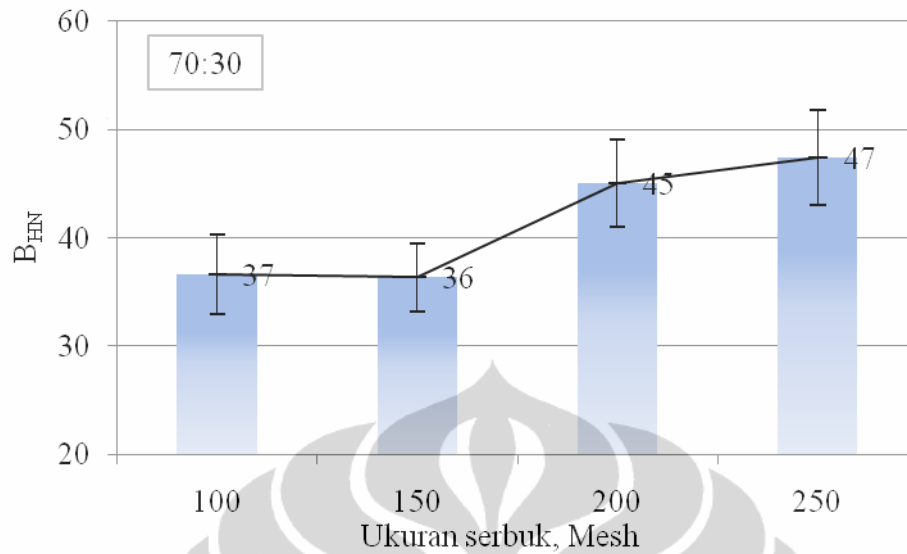
Ukuran serbuk juga menjadi *faktor* berpengaruh terhadap peningkatan nilai kekerasan. Semakin besar ukuran mesh, nilai kekerasan komposit karbon semakin meningkat. Untuk komposisi BB:ABK 60:40, nilai kekerasan pada mesh 100 adalah 50  $B_{HN}$ , dan nilai kekerasan cenderung meningkat menjadi 52  $B_{HN}$  pada mesh 250 kecenderungan ini ditunjukkan dalam Gambar 4. 17. Secara garis besar menunjukkan peningkatan nilai kekerasan, ketika ukuran serbuk semakin mengecil.



Gambar 4. 17. Peningkatan nilai kekerasan akibat pembesaran mesh, rasio 60:40.

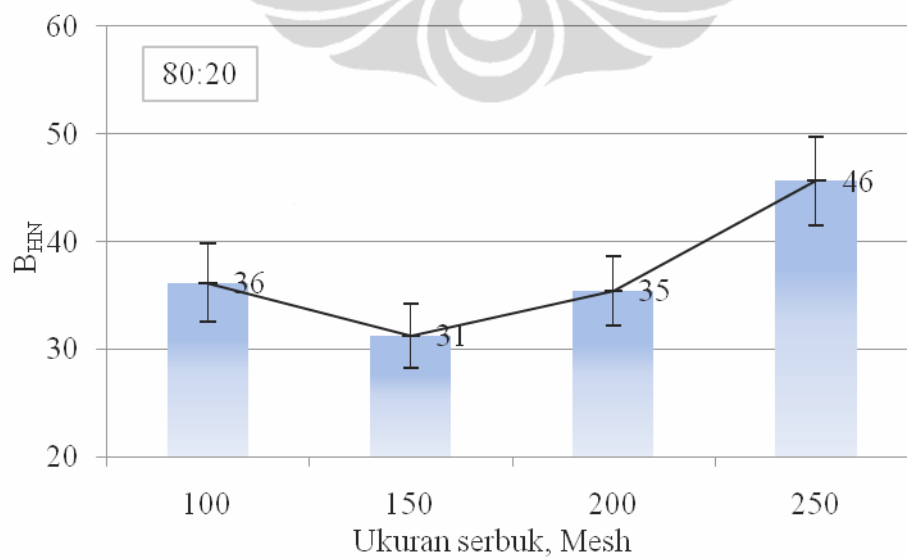
Kecenderungan yang sama juga terjadi pada rasio komposisi BB:ABK 70:30. Semakin besar ukuran mesh atau semakin kecil ukuran serbuk, nilai kekerasan komposit karbon semakin meningkat, hal tersebut ditunjukkan Gambar 4. 18. Untuk komposisi BB:ABK 70:30, nilai kekerasan pada mesh 100 adalah 37  $B_{HN}$ , dan nilai kekerasan cenderung meningkat menjadi 47  $B_{HN}$  pada mesh 250. Secara garis besar menunjukkan peningkatan nilai kekerasan, ketika ukuran

serbuk semakin mengecil.



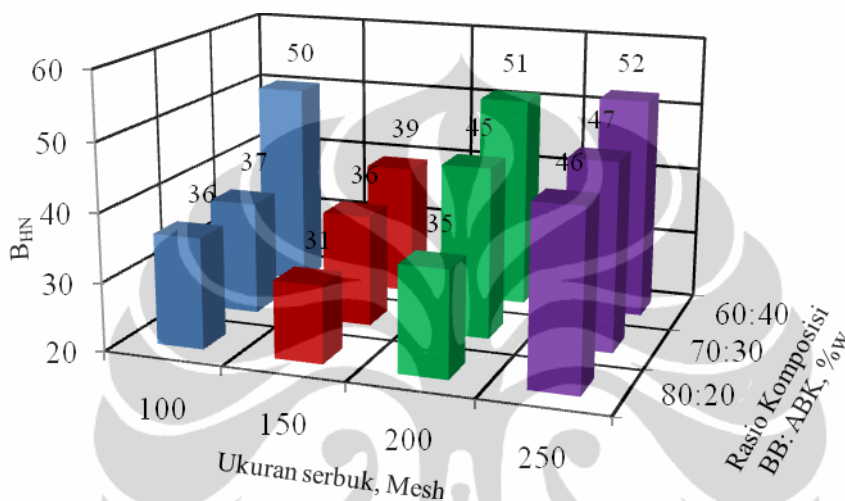
Gambar 4. 18. Peningkatan nilai kekerasan akibat pembesaran mesh, rasio 70:30.

Untuk komposisi BB:ABK 80:20, nilai kekerasan pada mesh 100 adalah 36 B<sub>HN</sub>, dan nilai kekerasan cenderung meningkat menjadi 46 B<sub>HN</sub> pada mesh 250, seperti ditunjukkan dalam Gambar 4. 19, yang juga menunjukkan kecenderungan semakin besar ukuran mesh atau semakin kecil ukuran serbuk, nilai kekerasan komposit karbon semakin meningkat. Secara garis besar menunjukkan peningkatan nilai kekerasan, ketika ukuran serbuk semakin mengecil.



Gambar 4. 19. Peningkatan nilai kekerasan akibat pembesaran mesh, rasio 80:20.

Secara keseluruhan, nilai kekerasan komposit dalam hubungannya dengan rasio komposisi dan ukuran serbuk ditunjukkan pada Gambar 4. 20. Gambar tersebut menunjukkan nilai kekerasan tertinggi dihasilkan oleh komposit dengan komposisi BB:ABK 60:40 pada ukuran serbuk mesh 250, dengan nilai  $B_{HN}$  52. Sementara nilai kekerasan terendah ditunjukkan oleh komposit dengan rasio komposisi BB:ABK 80:20 pada ukuran serbuk mesh 150 dengan nilai  $B_{HN}$  31.



Gambar 4. 20. Perbandingan Grafik hubungan ukuran mesh serbuk vs  $B_{HN}$  vs rasio komposisi

Hal ini menunjukkan bahwa persentase kandungan berat karbon cangkang kelapa menjadi penyebab tingginya nilai kekerasan, berkebalikan dengan persentase kandungan berat karbon batubara, terbukti persentase berat karbon batubara tidak menyebabkan naiknya nilai kekerasan komposit.

Penyebab penurunan kekerasan dan sifat mekanik lainnya dalam komposit karbon-karbon berbasis *coal tar pitch* adalah pengembangan matriks *pitch* karena pembentukan retakan internal atau rongga-rongga yang tidak keluar di permukaan. Sifat mekanik dari komposit karbon tidak hanya tergantung pada bahan penguat dan matriks, tetapi juga pada karakteristik ikatan antarmuka antara serbuk dan matriks. Interaksi antara komponen tersebut berpengaruh langsung pada kekuatan mekanik untuk sistem komposit *pitch* / karbon [10]. Sifat mekanik, termasuk sifat kekerasan, dari komposit karbon-karbon berbasis *pitch* yang dikarbonisasi tidak hanya dipengaruhi oleh derajat karbonisasi ataupun grafitisasi,

tetapi juga oleh densitas volume dan kekuatan asal dari sampel. Semakin rendah derajat karbonisasi, semakin tinggi densitas volume dan semakin tinggi kekuatan mekanik bahan mentah dapat memperbaiki sifat mekanik, termasuk tingkat kekerasan komposit karbon-karbon berbasis pitch [17].

Sifat mekanik termasuk kekerasan yang efektif dari komposit karbon-karbon dipengaruhi oleh tiga kondisi, ikatan yang sempurna antara matriks dan serbuk karbon, peretakan (pelepasan ikatan) pada ikatan antarmuka (*interface*) matriks dan serbuk karbon, dan keberadaan rongga matriks yang mendorong pelepasan ikatan antarmuka [48].

Nilai kekuatan mekanik termasuk kekerasan diperkirakan karena selama pirolisis terjadi banyak penyusutan volume dan kehilangan berat komposit yang menyebabkan pembangkitan pusat-pusat konsentrasi tegangan, yang menjadi inisiator retakan yang memperlambat kekuatan mekanik termasuk kekerasan [47].

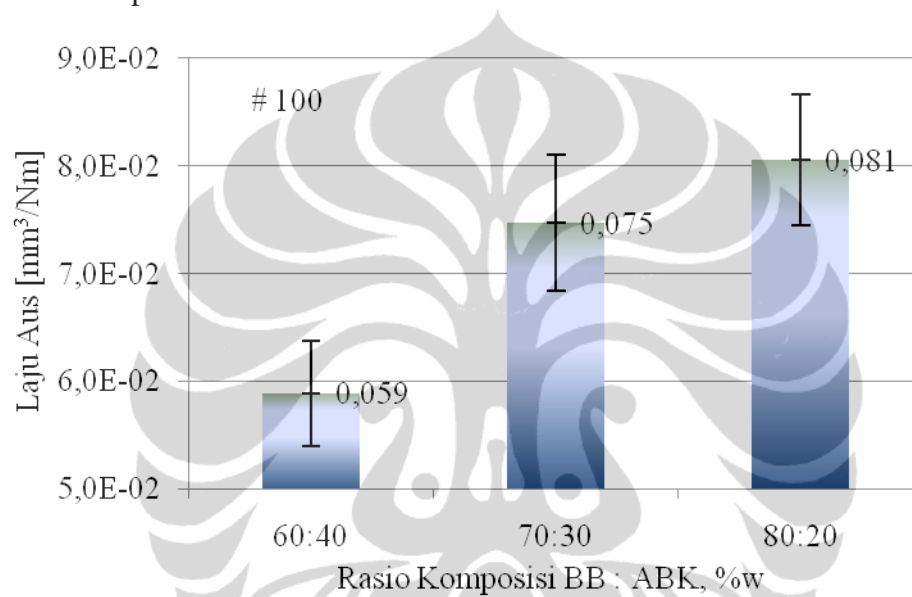
Unjuk kerja sifat mekanik termasuk kekerasan komposit karbon-karbon tergantung tidak hanya pada sifat serbuk penguat dan matriks, tetapi juga pada ukuran serbuk dan sifat ikatan antarmuka dari matriks dan serbuk. Keadaan *interphase* ukuran serbuk dan matriks membuktikan bahwa ukuran yang semakin kecil memainkan peranan dominan dalam adesi ikatan antarmuka dari serbuk karbon terhadap matriks pitch, karena di sini membentuk permukaan serbuk yang semakin luas untuk direkati oleh matriks. Hal ini dibuktikan dengan penelitian ini yang menunjukkan bahwa komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk mesh 250 mempunyai nilai kekerasan yang paling tinggi dibandingkan komposit dengan ukuran serbuk lainnya. Sekelompok serbuk yang berfungsi penguat dan matriks pitch dapat saling berinteraksi, yang meningkatkan adesi yang kuat antara serbuk dan matriks. Peningkatan adesi ikatan antarmuka berhubungan kuat terhadap struktur permukaan [49].

#### **4. 2. 3. 3. Analisis hubungan sifat laju aus terhadap rasio komposisi.**

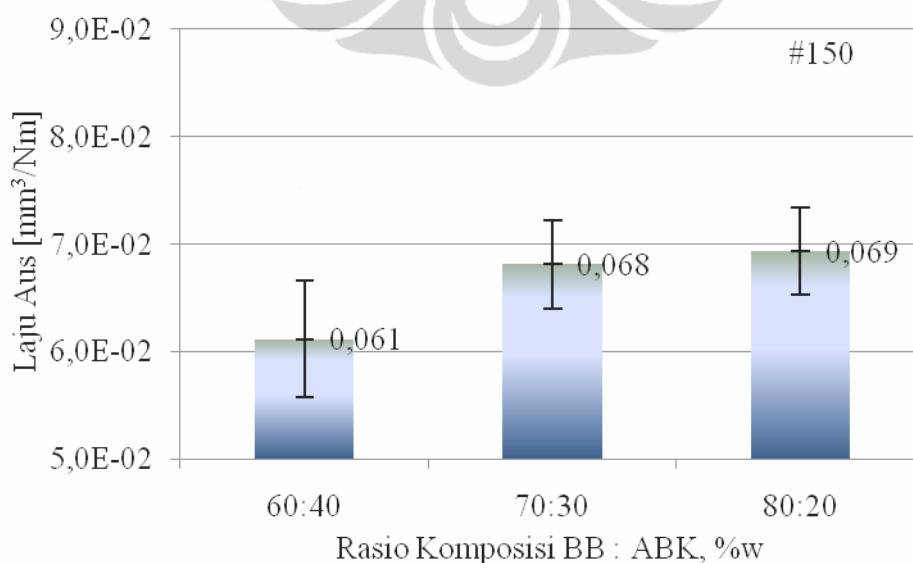
Hasil pengujian laju aus untuk mesh 100 dengan variasi persentase kandungan BB: ABK dari 60:40; 70:30 dan 80:20 ditunjukkan dalam Gambar 4. 21. Nilai laju aus tertinggi 0,081 mm<sup>3</sup>/Nm yang dihasilkan oleh rasio komposisi BB:ABK 80:20. Laju aus terendah 0,059 mm<sup>3</sup>/Nm dihasilkan oleh komposit

dengan rasio komposisi 60:40. Komposit jenis ini menunjukkan ketahanan aus yang tinggi, sesuai nilai kekerasan yang telah dijelaskan.

Grafik menunjukkan laju aus yang semakin meningkat ketika rasio komposisi menunjukkan kandungan karbon batubara yang semakin tinggi. Hal ini menunjukkan komposit karbon-karbon semakin lunak. Hasil pengujian laju aus untuk mesh 150 dengan variasi persentase kandungan BB: ABK dari 60:40; 70:30 dan 80:20 menunjukkan nilai laju aus tertinggi 0,069 mm<sup>3</sup>/Nm yang dihasilkan oleh rasio komposisi BB:ABK= 80:20.

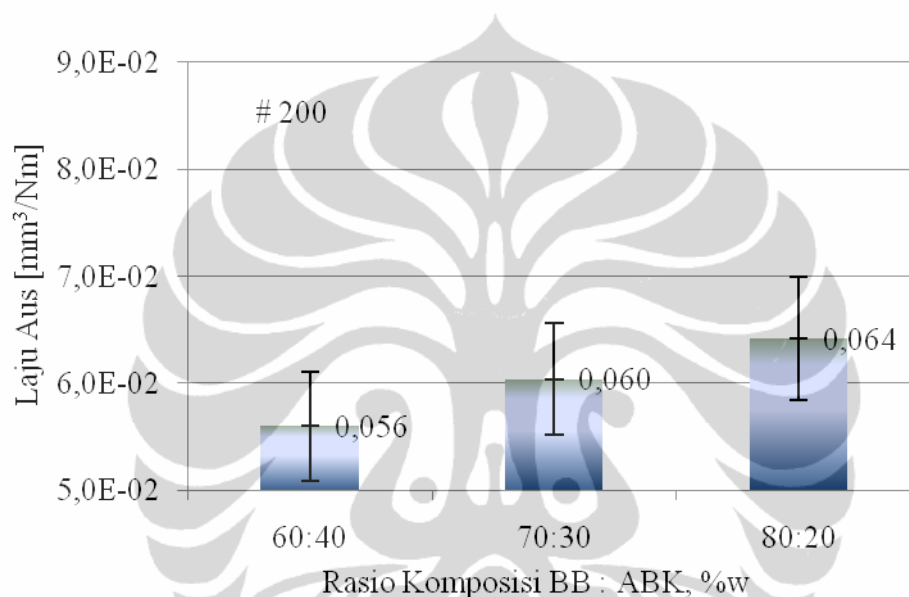


Gambar 4. 21. Grafik hubungan rasio komposisi VS laju aus, mesh 100.



Gambar 4. 22. Grafik hubungan rasio komposisi VS laju aus, mesh 150.

Nilai laju aus terendah 0,061 mm<sup>3</sup>/Nm yang dihasilkan rasio komposisi 60:40, komposit jenis ini menunjukkan ketahanan aus yang tinggi, sesuai nilai kekerasan yang telah dijelaskan. Grafik menunjukkan laju aus yang semakin meningkat ketika rasio komposisi menunjukkan kandungan karbon batubara yang semakin tinggi. Hal ini menunjukkan komposit karbon-karbon semakin lunak, seperti dijelaskan dalam uji kekerasan komposit seperti ditunjukkan dalam Gambar 4. 22.

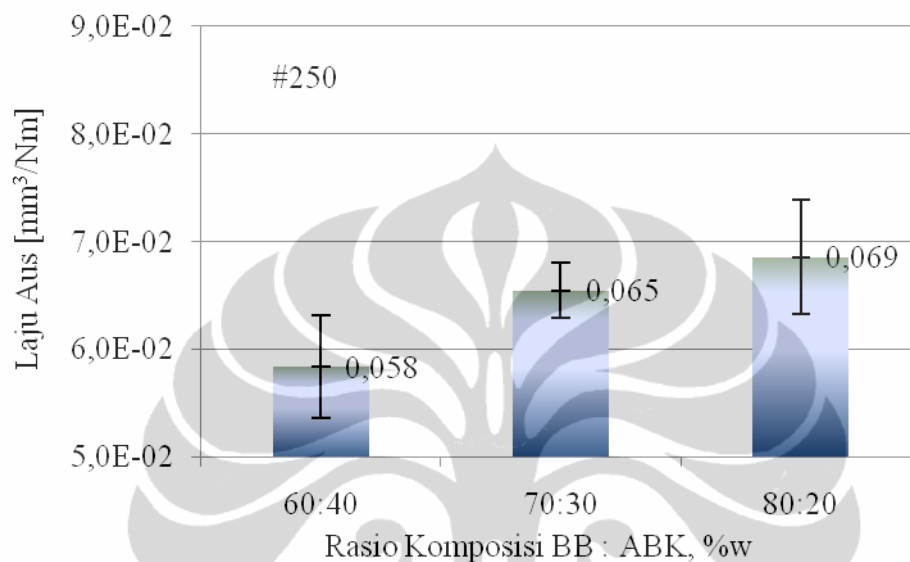


Gambar 4. 23. Grafik hubungan rasio komposisi VS laju aus, mesh 200.

Hasil pengujian laju aus untuk mesh 200 dengan variasi persentase kandungan BB: ABK dari 60:40; 70:30 dan 80:20 menunjukkan nilai laju aus tertinggi 0,064 mm<sup>3</sup>/Nm yang dihasilkan oleh komposisi BB:ABK 80:20. Komposit dengan rasio komposisi 60:40 menghasilkan laju aus terendah 0,056 mm<sup>3</sup>/Nm, hal ini menunjukkan komposit ini lebih keras daripada komposit dengan rasio komposisi 70:30 dan 80:20, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 23.

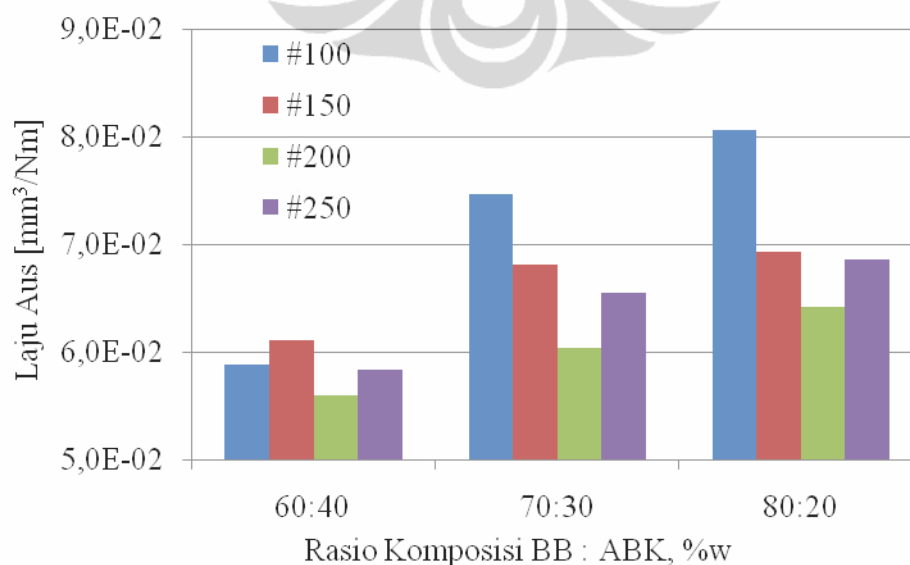
Hasil pengujian laju aus komposit dari mesh 250 dengan variasi persentase kandungan BB: ABK dari 60:40; 70:30 dan 80:20 menunjukkan nilai laju aus tertinggi 0,069 mm<sup>3</sup>/Nm yang dihasilkan oleh komposisi % berat BB:ABK 80:20, komposit ini lebih lunak dibandingkan komposit dengan rasio komposisi 70:30 dan 60:40 yang menghasilkan nilai laju lebih rendah, yaitu 0,065 dan 0,058 mm<sup>3</sup>/Nm, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4. 24.

Kecenderungan peningkatan laju aus karena rasio persentase komposisi BB:ABK berlaku untuk semua jenis ukuran serbuk dari komposit karbon-karbon. Laju aus cenderung meningkat pada komposisi yang semakin banyak kandungan serbuk batubaranya, hal ini menunjukkan bahwa komposit karbon-karbon ini semakin lunak.



Gambar 4. 24. Grafik hubungan rasio komposisi VS laju aus, mesh 250.

Laju aus semakin rendah ketika persentase kandungan karbon cangkang kelapa semakin meningkat, artinya komposit semakin keras, seperti ditunjukkan dalam Gambar 4. 25.

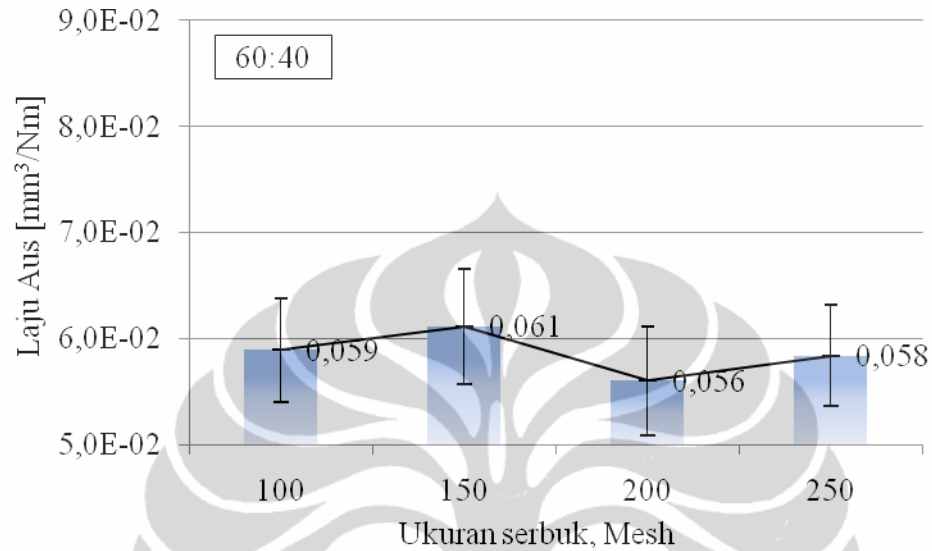


Gambar 4. 25. Perbandingan Grafik hubungan rasio komposisi VS laju aus, mesh 100; 150; 200; 250



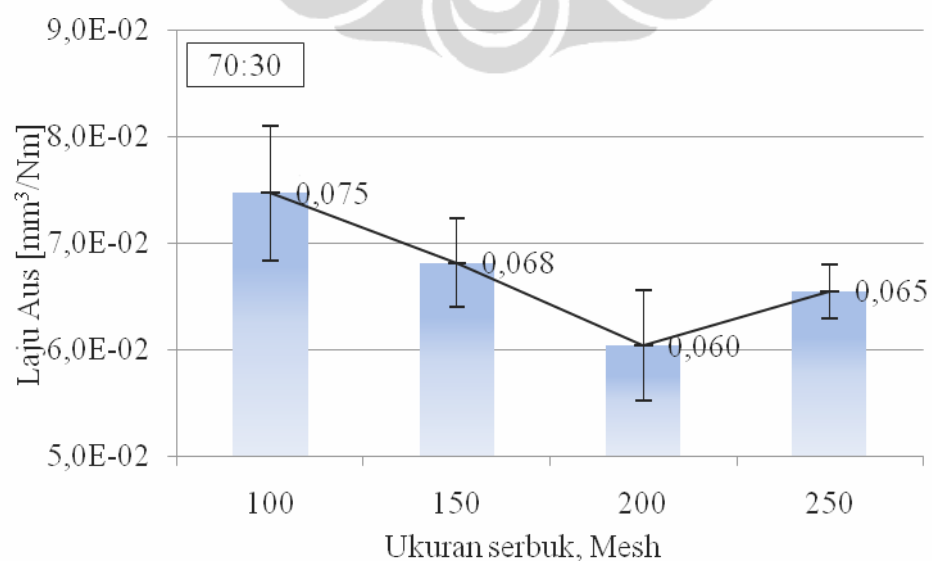
#### 4. 2. 3.4. Analisis hubungan laju aus terhadap ukuran serbuk

Laju aus komposit karbon-karbon untuk semua rasio komposisi cenderung menurun ketika ukuran serbuk dalam komposit semakin mengecil atau ukuran mesh semakin meningkat, dapat dilihat pada Gambar 4. 26.



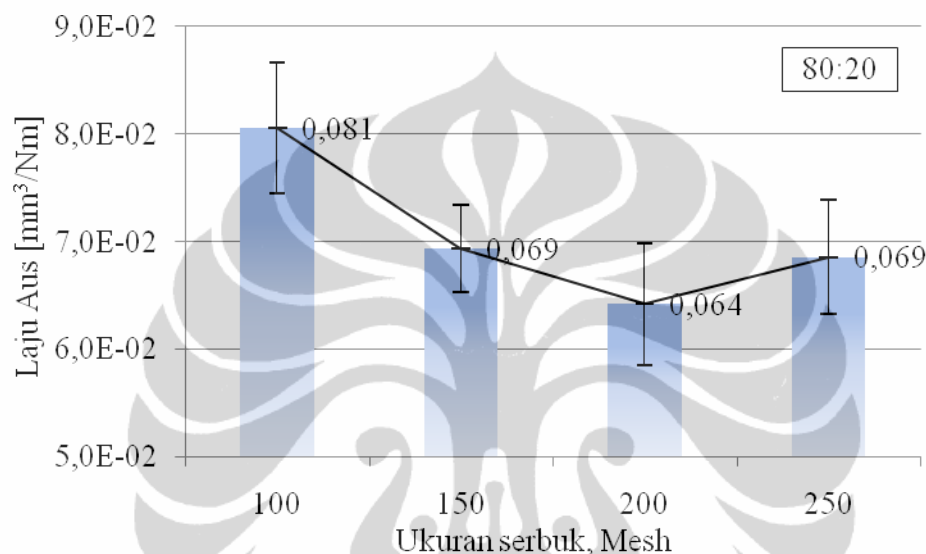
Gambar 4. 26. Penurunan nilai laju aus akibat pembesaran mesh, rasio 60:40.

Nilai laju aus pada mesh 100 adalah 0,059 mm<sup>3</sup>/Nm, sementara nilai laju aus pada mesh 250 adalah 0,058 mm<sup>3</sup>/Nm. Secara garis besar nilai laju aus komposit cenderung menurun ketika ukuran serbuk dalam komposit semakin kecil. Hal ini menunjukkan komposit karbon-karbon semakin keras.



Gambar 4. 27. Penurunan nilai laju aus akibat pembesaran mesh, rasio 70:30.

Penurunan nilai laju aus komposit akibat pembesaran ukuran mesh atau pengecilan ukuran serbuk dalam komposit untuk komposisi BB:ABK 70:30 dapat dilihat pada Gambar 4. 27. Nilai laju aus pada mesh 100 adalah  $0,075 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ , sementara nilai laju aus pada mesh 250 adalah  $0,065 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ . Secara garis besar nilai laju aus komposit cenderung menurun ketika ukuran serbuk dalam komposit semakin kecil.

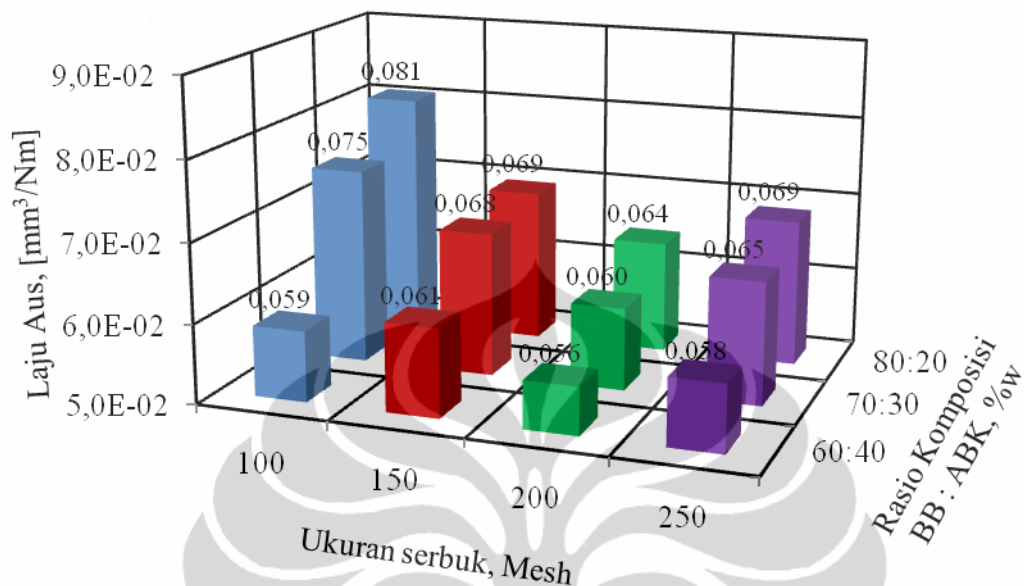


Gambar 4. 28. Penurunan nilai laju aus akibat pembesaran mesh, rasio 80:20.

Penurunan nilai laju aus komposit akibat pembesaran ukuran mesh atau pengecilan ukuran serbuk dalam komposit untuk komposisi BB:ABK 80:20 ditunjukkan Gambar 4. 28. Nilai laju aus pada mesh 100 adalah  $0,081 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ , sementara nilai laju aus pada mesh 250 adalah  $0,069 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ . Secara garis besar nilai laju aus komposit cenderung menurun ketika ukuran serbuk dalam komposit semakin kecil.

Hubungan laju aus komposit karbon-karbon terhadap variasi rasio komposisi dan terhadap variasi ukuran serbuk ditunjukkan pada Gambar 4. 29. Nilai laju aus tertinggi ditunjukkan oleh komposit dengan rasio komposisi 80:20 pada ukuran serbuk mesh 100, yaitu dengan nilai  $0,081 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ . Sementara laju aus paling rendah adalah  $0,056 \text{ mm}^3/\text{Nm}$  yang dihasilkan oleh komposit dengan rasio komposisi 60:40 pada ukuran serbuk mesh 200. Fakta ini menunjukkan bahwa kandungan karbon cangkang kelapa dapat menghambat penurunan laju

aus, artinya kandungan karbon cangkang kelapa dapat meningkatkan nilai kekerasan komposit karbon-karbon.



Gambar 4. 29. Perbandingan Grafik hubungan ukuran mesh serbuk vs laju aus vs rasio komposisi

Sifat gesekan dari material ditentukan terutama oleh jenis karbon yang digunakan [4]. Ketahanan aus menunjukkan korelasi yang baik dengan sifat mekanik lainnya [29], misalnya kekerasan. Kekerasan karbon cangkang kelapa sangat membantu ketahanan aus dari komposit karbon-karbon dalam penelitian ini. Terbukti bahwa komposit karbon-karbon dengan kandungan karbon cangkang kelapa yang tinggi menghasilkan laju aus yang rendah.

Sifat tribologi komposit karbon-karbon dipengaruhi oleh faktor kelembaban pada kerja ausan, struktur mikro, proses fabrikasi, yang semuanya mempengaruhi unjuk kerja ketahanan aus komposit. Struktur mikro yang dipengaruhi oleh proses fabrikasi akan mempengaruhi unjuk kerja komposit karbon-karbon, termasuk sifat mekanik [33]. Proses fabrikasi dalam penelitian ini juga menunjukkan nilai laju aus yang rendah (0,07 mm<sup>3</sup>/Nm) pada komposit karbon-karbon dari bahan serbuk karbon batubara yang diproses tekan panas pada temperatur 350°C, hal ini ditunjukkan pada Gambar 4.11.

Matriks yang melingkupi serbuk karbon mengubah sifat gesek, sifat

mekanik dan sifat termal. Karena perubahan struktur mikro dari matriks karbon (*pitch*), yang secara kuat tergantung pada proses densifikasi dan perlakuan panas (karbonisasi) sehingga dapat mempengaruhi unjuk kerja gesekan. Specimen serbuk yang terkelupas, sebagai akibat mekanisme pembajakan oleh serbuk karbon yang relatif keras, dan kerutannya menjadi penyebab utama meningkatnya laju aus. Laju aus dipengaruhi secara kuat oleh oksidasi, temperatur yang semakin tinggi menjadi cukup untuk menyebabkan lapisan gesekan berkembang yang mempercepat aus oleh oksidasi. Runtuhan serbuk karbon yang keras dipertimbangkan menjadi penyebab aus abrasif melalui pemecahan lapisan karbon lunak pada permukaan yang bergesekan. Laju aus ditentukan oleh besarnya nilai kecepatan tekanan dan beban energi kinetik pada permukaan gesekan [55].

Selama operasi pengujian gesekan penelitian ini diperkirakan pecahan karbon menyebar di permukaan kontak gesekan. Serbuk ausan tinggal di antara permukaan gesekan tersebut dan di dalam kekasaran permukaan atau rongga, atau porositas permukaan [43], selanjutnya runtuhan serbuk ausan tersebut ikut memperbesar proses abrasi gesekan.

Jenis komposit, parameter aus (beban, kecepatan luncuran atau gesekan) lingkungan (temperatur, kelembaban) dan kondisi permukaan gesekan komposit mempengaruhi sifat aus dan gesekan dari komposit karbon-karbon [50].

Secara umum dipercaya bahwa perilaku gesekan tinggi dari bahan karbon selama pembentukan debu disebabkan oleh interaksi antara ikatan kovalen tak jenuh atom karbon. Hal ini menyebabkan adsorpsi oksigen pada suhu tinggi yang dapat mengurangi interaksi antara ikatan kovalen dari atom karbon dengan membentuk berbagai jenis ikatan oksigen kompleks pada permukaan karbon-karbon. Keberadaan kekasaran yang tinggi, runtuhan ausan lepas yang disebabkan oleh adanya zat aditif pengisi antara serbuk, menyebabkan pelepasan ikatan antarmuka dari matriks, dan retakan dari komposit. Hal ini dijelaskan sebagai oksidasi rongga dari padatan karbon di bawah permukaan gesekan [50].

Sifat ikatan antarmuka serbuk / matriks sangat tergantung pada sifat permukaan (topologi dan kimia permukaan) dari serbuk penguat. Salah satu prasyarat adhesi yang baik antara serbuk dan matriks adalah bahwa energi permukaan serbuk karbon harus lebih tinggi atau sama dengan energi permukaan

matriks [51].

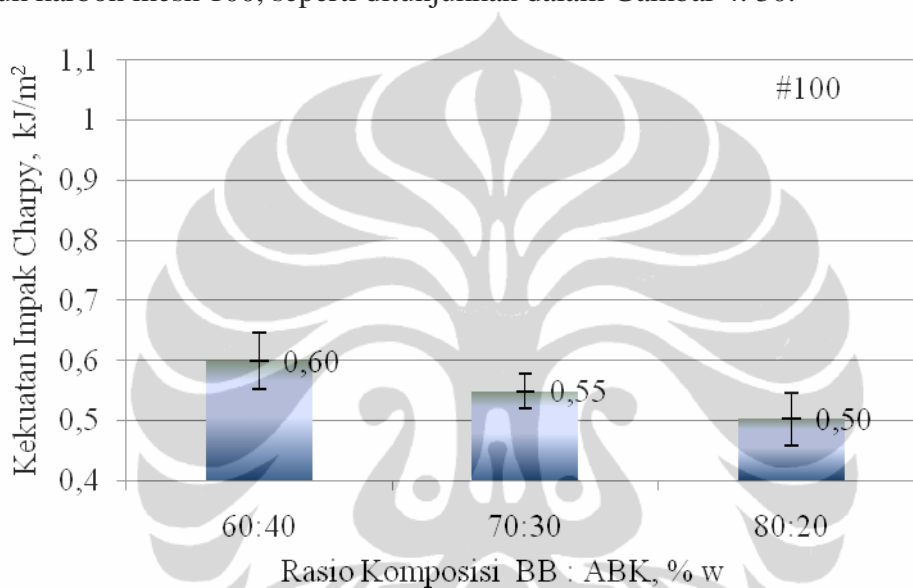
Sifat mekanik yang diinginkan dapat dicapai dengan mengendalikan struktur mikro matriks karbon dan / atau dengan mengontrol ikatan matriks serbuk melalui pilihan yang tepat dari serbuk karbon dan perlakuan permukaan serbuk. Ikatan antarmuka antara serbuk dan matriks juga mempengaruhi sifat mekanik komposit karbon-karbon. Ikatan kimia yang kuat pada antarmuka tidak dapat menyediakan mekanisme pelepasan, sebuah adhesi antarmuka yang lemah mengakibatkan retak [52], dalam penelitian ini dapat dibuktikan pada analisis struktur mikro pengujian SEM pada sub bab 4. 4.

Selama karbonisasi dan grafitisasi, kekuatan ikatan antarmuka yang lemah, yang dikombinasikan dengan tegangan penyusutan, menyebabkan matriks terkelupas dari serbuk. Ikatan antarmuka yang lemah menyebabkan penyusutan antara serbuk dan matriks selama pirolisis. Pada gilirannya, penyusutan menyebabkan pembentukan retak. Retak mikro dalam matriks menjadi pusat konsentrasi tegangan dan propagasi. Ketika retakan matriks disebarkan ke permukaan serbuk, retakan tidak berhenti pada permukaan serbuk tapi terus menjalar keseluruhan komposit, menyebabkan kegagalan komposit [52]. Ikatan antarmuka yang lemah dalam penelitian ini diperkirakan dialami oleh komposit karbon-karbon dengan kandungan serbuk karbon batubara yang tinggi, yang ternyata menghasilkan laju aus yang tinggi atau menghasilkan kekerasan yang rendah, hal ini juga ditunjukkan pada foto mikro uji SEM dalam sub bab 4. 4.

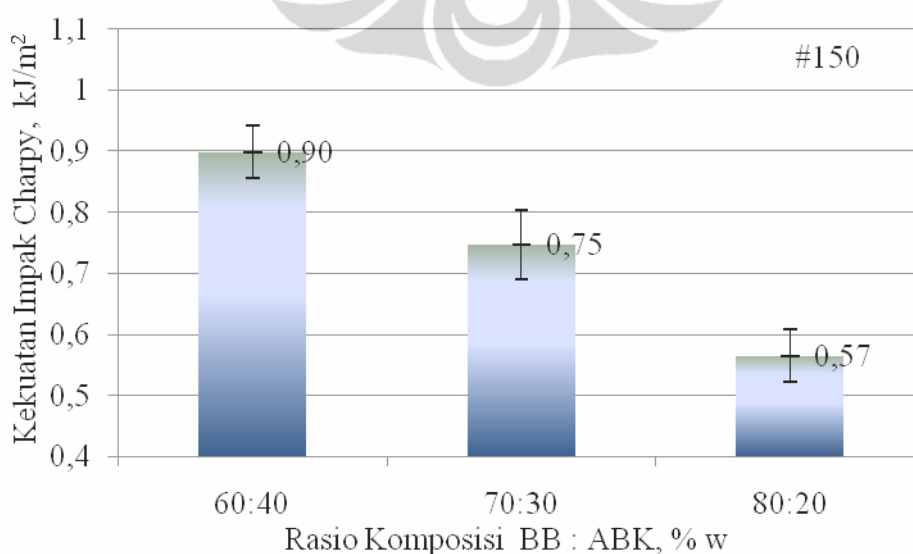
Sebagai perbandingan, komposit karbon-karbon unjuk kerja tinggi menunjukkan koefisien gesek yang rendah dalam arah serat 0,3 – 0,5 dan 0,5 – 0,8 untuk arah tegak lurus serat. Laju aus cenderung menunjukkan hal yang sama 0,05 – 0,1 mm untuk arah sejajar serat dan 0,1 – 0,3 mm untuk arah tegak lurus serat [3]. Nilai laju aus dari komposit dengan empat jenis karbon ditentukan berdasarkan kehilangan berat selama pengujian aus dan hasilnya berkisar dari 6,5 s/d 15,1 mg/min [4]. Komposit dari empat jenis pitch dan 4 jenis karbon untuk komposit karbon yang diuji sebagai sepatu rem karbon, menghasilkan laju aus  $2,50E-09$  s/d  $2,00E-08$  ( $0,0000000025$  s/d  $0,00000002$ ) g/mN, [10].

#### 4. 2. 3. 5. Analisis hubungan kekuatan impact terhadap rasio komposisi.

Kandungan serbuk karbon batu batubara memperlemah kekuatan impact *Charpy* komposit karbon-karbon. Semakin tinggi persentase kandungan serbuk karbon batubara semakin rendah kekuatan impact *Charpy* komposit karbon-karbon. Nilai kekuatan impact *Charpy* maksimum 0,60 kJ/m<sup>2</sup> terjadi pada rasio komposisi 60:40. Kekuatan impact *Charpy* minimum 0,50 kJ/m<sup>2</sup> terjadi pada rasio komposisi 80:20. Fakta ini terjadi pada komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk karbon mesh 100, seperti ditunjukkan dalam Gambar 4. 30.



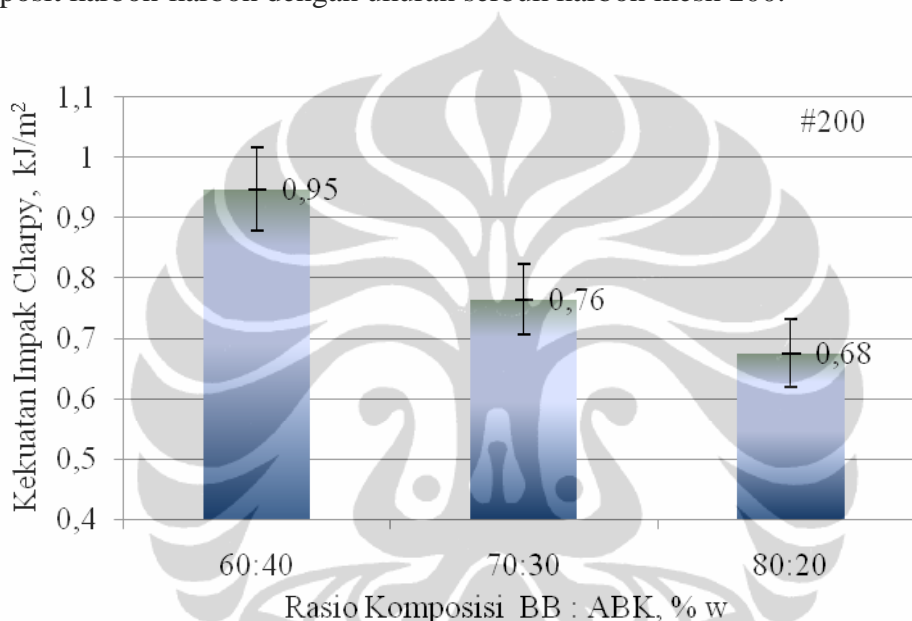
Gambar 4. 30. Grafik hubungan rasio komposisi vs kekuatan impact, mesh 100.



Gambar 4. 31. Grafik hubungan rasio komposisi vs kekuatan impact, mesh 150.

Nilai kekuatan impact maksimum  $0,90 \text{ kJ/m}^2$  terjadi pada rasio komposisi 60:40. Kekuatan impact *Charpy* minimum  $0,57 \text{ kJ/m}^2$  terjadi pada rasio komposisi 80:20. Fakta ini terjadi pada komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk karbon mesh 150, hal ini ditunjukkan dalam Gambar 4. 31.

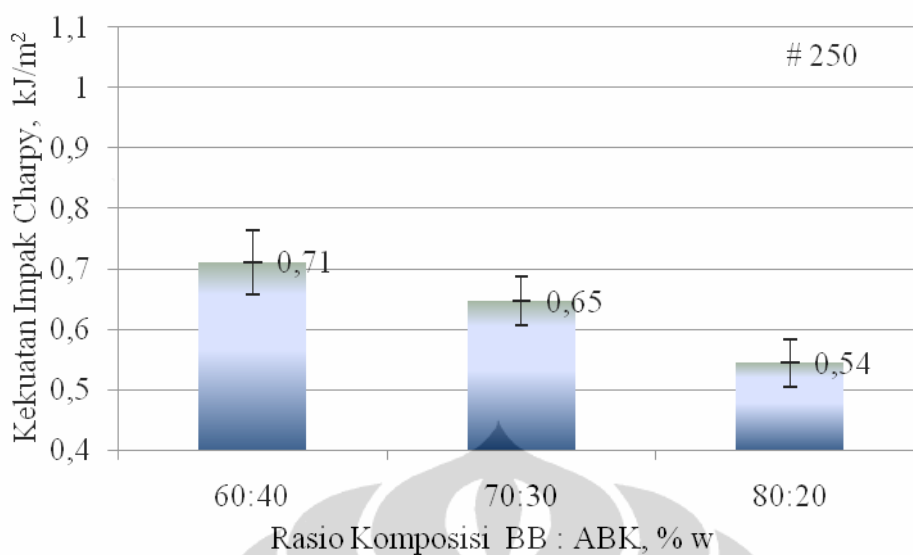
Kekuatan impact *Charpy* maksimum yang ditunjukkan Gambar 4. 32 adalah  $0,95 \text{ kJ/m}^2$  pada rasio komposisi 60:40 dan kekuatan impact *Charpy* minimum adalah  $0,68 \text{ kJ/m}^2$  pada rasio komposisi 80:20. Fakta ini terjadi pada komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk karbon mesh 200.



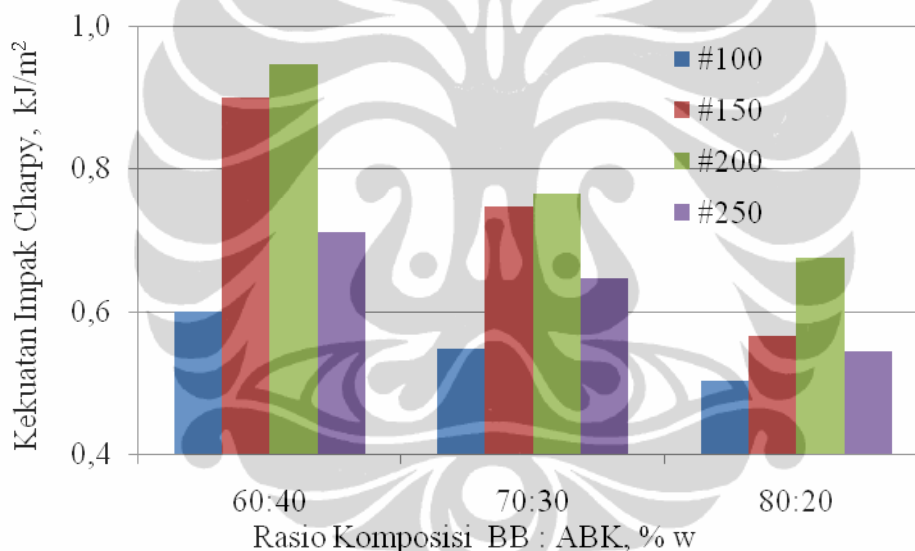
Gambar 4. 32. Grafik hubungan ratio komposisi vs kekuatan impact, mesh 200.

Nilai kekuatan impact *Charpy* maksimum  $0,71 \text{ kJ/m}^2$  pada rasio komposisi 60:40 dan nilai minimum  $0,54 \text{ kJ/m}^2$  pada rasio komposisi 80:20. Fakta ini dihasilkan oleh komposit dengan ukuran serbuk mesh 250, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 33.

Perubahan rasio komposisi komposit karbon-karbon dari 60:40 ke 70:30 dan selanjutnya ke 80:20 cenderung menurunkan kekuatan impact *Charpy* dari komposit tersebut untuk semua jenis ukuran serbuk karbon komposit, seperti ditunjukkan dalam Gambar 4. 34. Fakta ini menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase kandungan karbon batubara semakin menurunkan kekuatan impact *Charpy* dari komposit karbon-karbon yang diteliti.



Gambar 4. 33. Grafik hubungan rasio komposisi vs kekuatan impak, mesh 250.



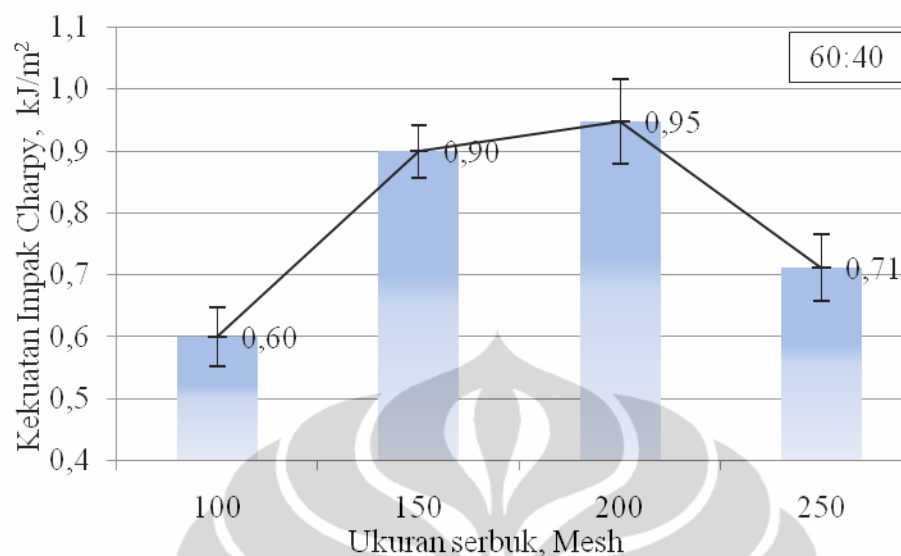
Gambar 4. 34. Perbandingan Grafik hubungan Rasio komposisi BB:ABK VS kekuatan impak, mesh 100; 150; 200; 250

#### 4. 2. 3. 6. Analisis hubungan kekuatan impak terhadap ukuran serbuk.

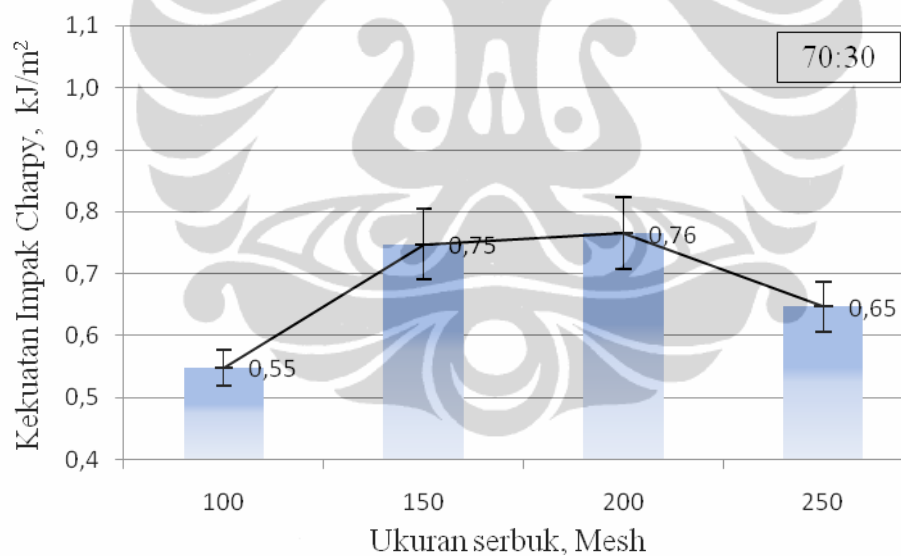
Grafik hubungan ukuran serbuk karbon komposit terhadap kekuatan impak *Charpy* untuk komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 60:40 ditunjukkan pada Gambar 4. 35 untuk semua jenis ukuran serbuk yang diteliti. Ukuran serbuk karbon mesh 100 menunjukkan kekuatan impak *Charpy* 0,60 kJ/m<sup>2</sup>, sementara semakin tinggi mesh serbuk menunjukkan nilai kekuatan impak *Charpy* semakin tinggi, meskipun tidak linier tetapi secara garis besar menunjukkan kecenderungan yang meningkat. Pada ukuran serbuk mesh 250 nilai kekuatan



impak *Charpy* menunjukkan  $0,71 \text{ kJ/m}^2$ .

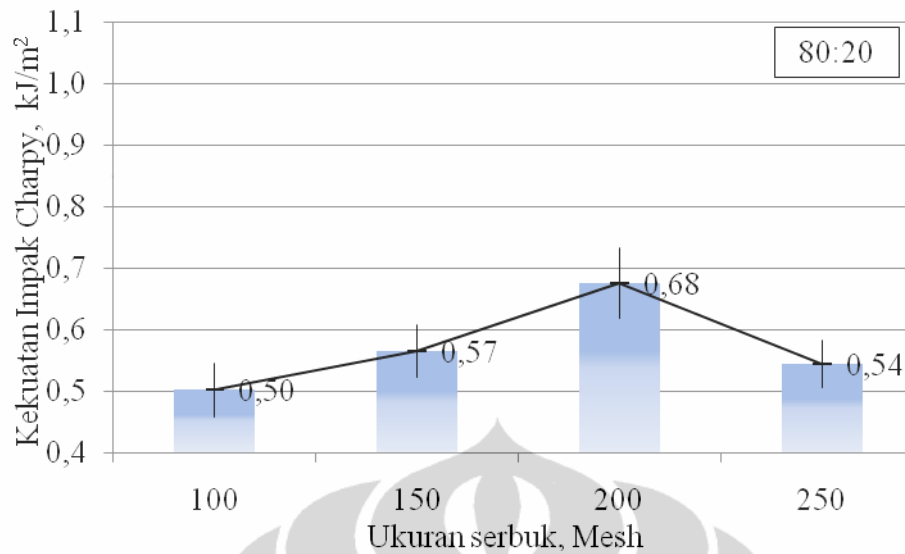


Gambar 4. 35. Grafik hubungan ukuran serbuk vs kekuatan impak, rasio 60:40.



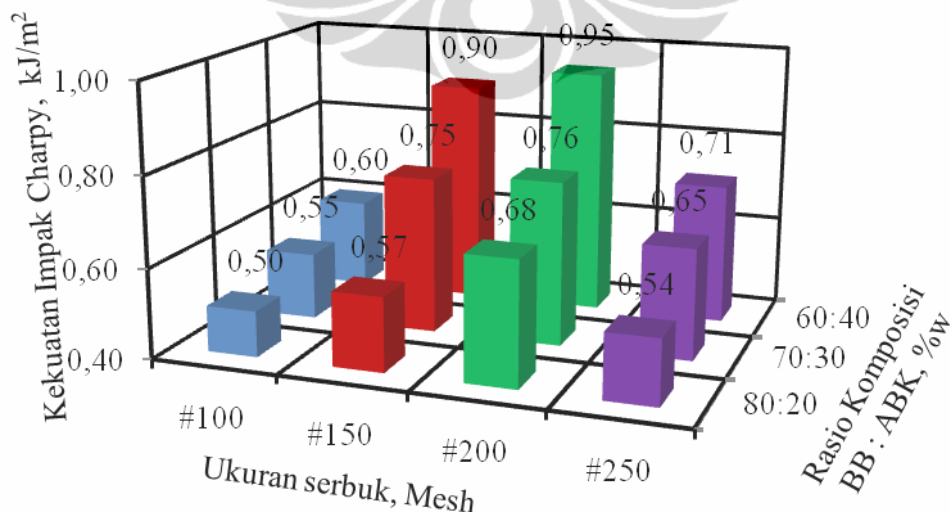
Gambar 4. 36. Grafik hubungan ukuran serbuk vs kekuatan impak, rasio 70:30.

Ukuran serbuk karbon mesh 100 menghasilkan kekuatan impak *Charpy*  $0,55 \text{ kJ/m}^2$  dan ukuran serbuk karbon mesh 250 menghasilkan kekuatan impak *Charpy*  $0,65 \text{ kJ/m}^2$ , seperti ditunjukkan dalam Gambar 4. 36. Fakta ini dapat dilihat bahwa secara garis besar menunjukkan kecenderungan kekuatan impak yang meningkat ketika ukuran serbuk karbon semakin kecil, untuk komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 70:30.



Gambar 4. 37. Grafik hubungan ukuran serbuk vs kekuatan impak, rasio 80:20.

Grafik hubungan ukuran serbuk karbon komposit terhadap kekuatan impak *Charpy* untuk komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 80:20 untuk semua jenis ukuran serbuk yang diteliti ditunjukkan Gambar 4. 37. Ukuran serbuk karbon mesh 100 menunjukkan kekuatan impak *Charpy* 0,50 kJ/m<sup>2</sup>, ukuran serbuk mesh 250 menunjukkan nilai kekuatan impak *Charpy* 0,54 kJ/m<sup>2</sup>. Meskipun tidak linier tetapi secara garis besar menunjukkan kecenderungan kekuatan impak yang meningkat ketika ukuran serbuk karbon semakin mengecil.



Gambar 4. 38. Perbandingan Grafik hubungan ukuran mesh serbuk vs kekuatan impak vs rasio komposisi

Secara keseluruhan, nilai kekuatan impak *Charpy* komposit karbon-karbon untuk tiap rasio komposisi dan untuk tiap ukuran mesh serbuk karbon ditunjukkan pada Gambar 4. 38. Nilai kekuatan impak *Charpy* tertinggi dihasilkan oleh komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 60:40 pada ukuran serbuk karbon mesh 200, yaitu  $0,95 \text{ kJ/m}^2$ . Nilai kekuatan impak *Charpy* terendah dihasilkan oleh komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 80:20 pada ukuran serbuk karbon mesh 100, yaitu  $0,50 \text{ kJ/m}^2$ .

Selama pirolisis karbonisasi terjadi penyusutan matriks dan selanjutnya membentuk retakan mikro [33], dan retakan mikro membangkitkan pusat-pusat konsentrasi tegangan, yang menjadi inisiator retakan, sehingga membawa komposit karbon-karbon bersifat rapuh [47].

Efek dari penyusutan matriks, bersama dengan ketidakcocokan ekspansi termal dan ikatan antarmuka, membentuk struktur komposit dan karenanya menentukan sifat komposit [56]. Kekuatan serbuk yang buruk dalam komposit berbasis pitch pada awalnya disebabkan kerusakan serbuk selama karbonisasi. Kekuatan serbuk karbon yang buruk dalam penelitian ini dialami oleh komposit karbon-karbon dengan kandungan serbuk karbon batubara yang tinggi. Hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa persentase kandungan serbuk karbon batubara yang tinggi menghasilkan kekerasan komposit yang rendah, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.20.

Sifat kimia prekursor matriks organik, yang sangat mempengaruhi grafitisasi karbon matriks, diperkirakan mempengaruhi struktur dan sifat daerah *interphase* ataupun antarmuka (*interface*) [56].

Ikatan antarmuka memainkan peran yang sangat penting dalam sifat mekanik dan retak komposit karbon-karbon. Melemahnya ikatan antarmuka serbuk / matriks setelah grafitisasi juga menyebabkan translasi kekuatan serbuk yang jelek. Kemampuan pengalihan tegangan berkurang dari matriks karena grafitisasi matriks dan degradasi sifat serbuk juga bisa berkontribusi terhadap hilangnya kekuatan. Dalam komposit yang digrafitisasi, sifat matrik grafitik menjadi penting bagi perilaku retak. Ini bisa menjadi efek dari penurunan progresif kemampuan pengalihan tegangan ketika temperatur perlakuan panas meningkat [53].

Karbon siap mengoksidasi pada temperatur lebih dari 400°C. Hal ini umumnya disepakati bahwa sifat fisik dari serbuk mempengaruhi reaktivitas dari komposit. Reaksi kimia menimbulkan rongga, dan penyusutan yang mengikutinya dari matriks dapat menghasilkan tegangan sisa dan retak. Ikatan antarmuka antara serbuk karbon penguat dan matriks karbon pirolitik ditentukan oleh fraksi volume serbuk karbon dalam komposit, dan antarmuka juga merupakan kontributor dominan terhadap sifat mekanik dari komposit. Hal ini berlaku umum bahwa sifat mekanik ikatan antarmuka komposit sangat bergantung pada derajat adhesi antarmuka antara serbuk dan matriks [54].

Selama kerusakan impact pada komposit karbon-karbon dengan impact, zona kerusakan tersebut bekerja sebagai daerah lemah dan memperbesar tegangan lokal karena retak matriks, pelepasan ikatan antarmuka dari serbuk, dan penglupasan serbuk [54].

Energi impact komposit adalah sifat mekanik utama untuk mengevaluasi tingkat ketangguhan bahan komposit. Ketika bahan komposit diimpact, energi benturan diserap ke dalam bahan dan mempengaruhi sifat mekanik sisa. Peningkatan sifat impact sama dengan yang ada pada sifat mekanik ikatan antarmuka dari komposit, yang dapat meningkatkan sifat mekanik seluruh komposit karbon-karbon [54]. Komposit karbon-karbon dalam penelitian ini menghasilkan kekuatan impact tertinggi 0,95 kJ/m<sup>2</sup>, dihasilkan oleh komposit dengan kandungan serbuk karbon cangkang kelapa yang tinggi dan kekuatan impact terendah adalah 0,50 kJ/m<sup>2</sup>, dihasilkan oleh komposit dengan kandungan serbuk karbon batubara yang tinggi. Hal ini diperkirakan bahwa sifat mekanik ikatan antarmuka serbuk karbon batubara/*pitch* lebih lemah dibandingkan sifat mekanik ikatan antarmuka serbuk karbon cangkang kelapa/*pitch*.

#### **4. 3. Karakterisasi sifat fisik**

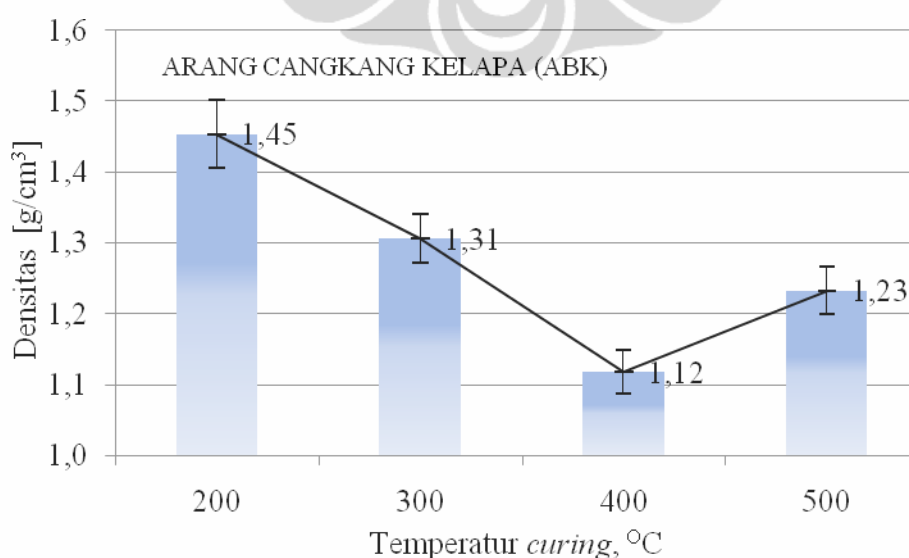
Karakterisasi sifat fisik komposit karbon-karbon dilakukan dalam bentuk pengujian densitas, pengujian porositas, pengujian konduktivitas elektrik. Sifat fisik densitas dan porositas dilakukan terhadap semua tahap penelitian. Sifat konduktivitas elektrik dilakukan terhadap penelitian tahap tiga.

#### 4. 3. 1. Karakterisasi sifat fisik penelitian pendahuluan

Penelitian pendahuluan memanfaatkan karbon hasil karbonisasi limbah cangkang kelapa, limbah batubara, semikokas yang dipanaskan ulang pada  $1000^{\circ}\text{C}$  dan grafit produksi fabrikasi sebagai serbuk karbon penguat dalam material rekayasa komposit karbon-karbon dengan matriks karbon dari *coal tar pitch*. Target penelitian ini adalah meneliti sifat mekanik dan fisik dari material rekayasa komposit karbon-karbon berbasis limbah organik, dengan bahan penguat serbuk karbon dalam matriks *coal tar pitch* yang dipadatkan secara dingin dan dikarbonisasi melalui proses *curing* vakum sehingga menghasilkan bahan komposit karbon-karbon.

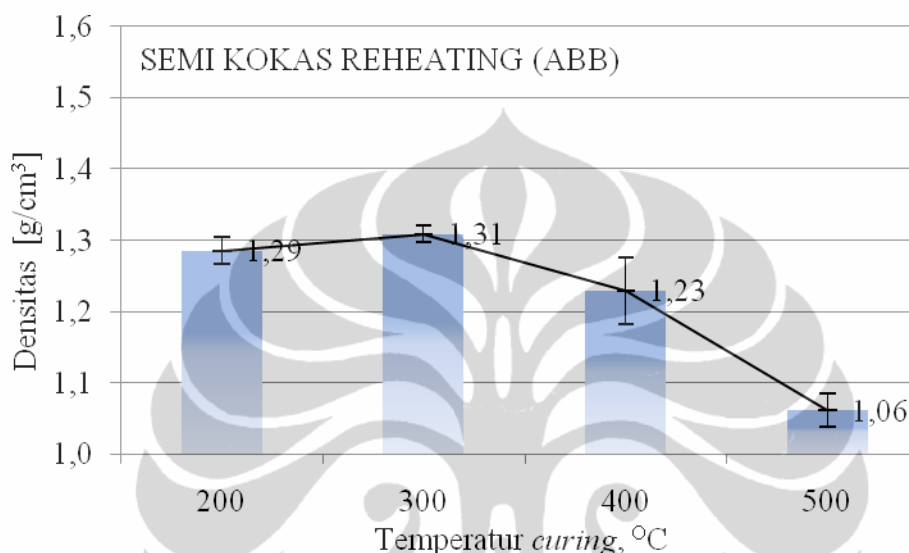
##### 4. 3. 1. 1. Analisis hubungan densitas terhadap temperatur *curing*.

Hasil pengujian densitas komposit karbon-karbon dengan bahan penguat dari arang cangkang kelapa menunjukkan kecenderungan bahwa semakin tinggi temperatur *curing* semakin menurunkan densitas komposit, artinya disini komposit semakin ringan dengan jumlah pori yang semakin banyak, terutama pada daerah temperatur *curing* antara 400 sampai  $500^{\circ}\text{C}$ . Hal ini ditunjukkan pada Gambar 4. 39. Pada jenis komposit ini nilai tertinggi densitas adalah  $1,45 \text{ g/cm}^3$ , dihasilkan oleh proses *curing*  $200^{\circ}\text{C}$ , dan densitas terendah dihasilkan oleh proses *curing*  $400^{\circ}\text{C}$ , yaitu  $1,12 \text{ g/cm}^3$ .



Gambar 4. 39. Grafik hubungan temperatur *curing* VS densitas, komposit bahan arang cangkang kelapa atau ABK

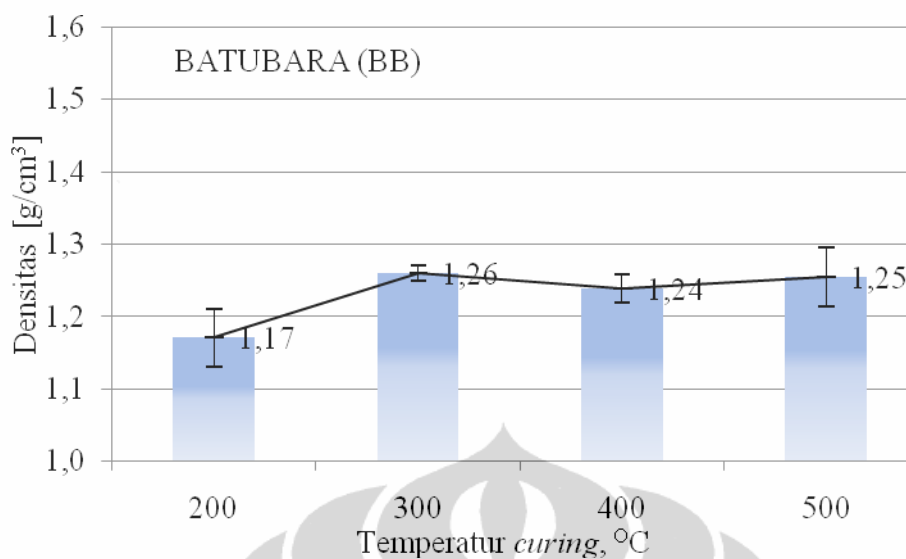
Hubungan temperatur *curing* terhadap densitas komposit dengan penguat dari bahan ABB 1000 ditunjukkan pada Gambar 4. 40. Densitas cenderung menurun ketika temperatur *curing* ditingkatkan. Nilai densitas tertinggi dihasilkan oleh proses *curing* 300°C, yaitu 1,31 g/cm<sup>3</sup>. Nilai densitas terendah adalah 1,06 g/cm<sup>3</sup>, dihasilkan oleh proses *curing* 500°C.



Gambar 4. 40. Grafik hubungan temperatur *curing* VS densitas, komposit bahan semikokas *reheating* atau ABB 1000

Hubungan antara temperatur *curing* terhadap densitas dari komposit dengan penguat BB menunjukkan densitas meningkat pada daerah temperatur *curing* dari 200 sampai sekitar 300°C, tetapi secara keseluruhan terjadi peningkatan densitas, sampai pada temperatur 500°C, pada kondisi ini juga terjadi penurunan porositas.

Nilai densitas tertinggi 1,25 g/cm<sup>3</sup> dan terendah 1,17 g/cm<sup>3</sup>. Pada tingkat temperatur antara 200 sampai sekitar 500°C densitas meningkat maka porositas menurun, artinya bahan makin berat sekaligus juga padat, tidak banyak pori-pori di dalam komposit, Gambar 4. 41 menunjukkan hal tersebut. Secara umum peningkatan porositas dan sekaligus penurunan densitas dipengaruhi oleh proses pemadatan ketika membuat sampel pra bentuk, proses pemanasan ketika proses *curing*, distribusi ukuran serbuk yang tidak homogen, proses pencampuran yang kurang merata.



Gambar 4. 41. Grafik hubungan temperatur *curing* VS densitas, komposit bahan serbuk batubara atau BB

Penyebab penurunan kekerasan dan sifat mekanik lainnya dalam komposit karbon-karbon berbasis *coal tar pitch* adalah pengembangan matriks *pitch* karena pembentukan retakan internal atau rongga-rongga yang tidak nampak keluar di permukaan [10]. Pengembangan ini akan membentuk rongga-rongga yang menurunkan densitas komposit, sehingga berpengaruh terhadap sifat mekanik dan sifat fisik komposit karbon-karbon.

Penurunan densitas disebabkan oleh pelepasan uap yang terjebak selama proses karbonisasi pirolisis dan laju endapan yang rendah pada temperatur karbonisasi tersebut [33].

Selama pirolisis komposit berbasis *pitch*, tegangan signifikan akan dibangkitkan karena evolusi yang berlebihan dari hidrokarbon dari komposit (utamanya dari matriks *pitch*), yang menyebabkan penyusutan volume yang besar dan kehilangan berat komposit [47].

Ko [52] menyatakan terdapat dua faktor yang mempengaruhi densitas komposit karbon-karbon selama pirolisis, adalah pembentukan rongga pori, dan densifikasi kimia yang disebabkan oleh perubahan struktur kimia dari matriks dan serbuk. Pada tingkat awal perlakuan panas komposit, karena kondensasi struktur polimer, gas yang meningkat menciptakan banyak rongga pori dalam komposit. Oleh karena itu, selama pirolisis, matriks *pitch* menyusut menjauhi permukaan serbuk, yang menyebabkan pembentukan rongga pori.

Pembentukan rongga adalah akibat karbonisasi matrik *pitch*, demikian Tzeng [53]. Derajat pelemahan ikatan antarmuka dalam serbuk/matrik tergantung tidak hanya pada temperatur grafitisasi tetapi juga pada kondisi ikatan antarmuka dalam komposit karbon-karbon asal. Pelemahan ikatan antarmuka setelah grafitisasi menyebabkan penghantaran kekuatan serbuk yang jelek.

Park [54] menyatakan karbon mulai teroksidasi pada temperatur lebih dari 400°C. Secara umum disetujui bahwa sifat fisik dari serbuk mempengaruhi reaktivitas dari komposit. Reaksi kimia meningkatkan rongga, dan bersamaan penyusutan matriks dapat menimbulkan retakan dan tegangan sisa. Penyusutan dan kehilangan berat selama pirolisis tergantung pada karbonisasi. Peningkatan densitas komposit, menurunkan gesekan internal. Densitas komposit berkaitan langsung terhadap porositasnya. Rongga pori dalam komposit karbon-karbon memainkan peran penting dalam kapasitas peredaman.

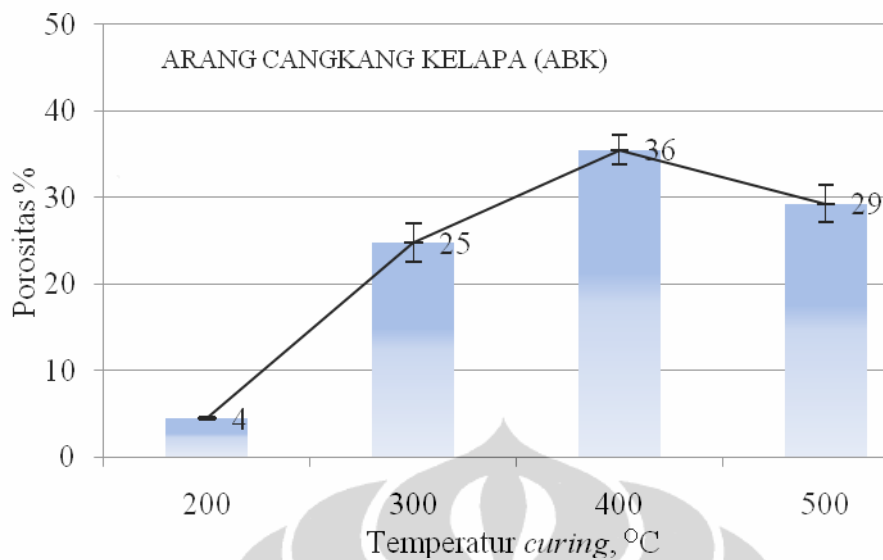
Densitas komposit karbon-karbon dalam penelitian ini diperkirakan juga disebabkan oleh pelepasan uap yang terjebak selama proses karbonisasi pirolisis dan laju endapan yang rendah pada temperatur karbonisasi tersebut. Karena evolusi yang berlebihan dari hidrokarbon dari komposit (utamanya dari matriks *pitch*), yang menyebabkan penyusutan volume yang besar dan kehilangan berat komposit. Densitas komposit karbon-karbon dari bahan serbuk karbon cangkang kelapa pada temperatur curing 200°C lebih tinggi dari komposit dari bahan serbuk karbon batubara dan semikokas, hal ini kemungkinan komposit serbuk karbon batubara dan semikokas mengalami penguapan yang lebih tinggi dari daripada komposit karbon cangkang kelapa.

#### **4. 3. 1. 2. Analisis hubungan sifat porositas terhadap temperatur *curing*.**

Komposit karbon-karbon dengan penguat arang cangkang kelapa menghasilkan persentase porositas yang cenderung tinggi ketika proses perlakuan *curing* pada temperatur 400°C, yaitu 36%.

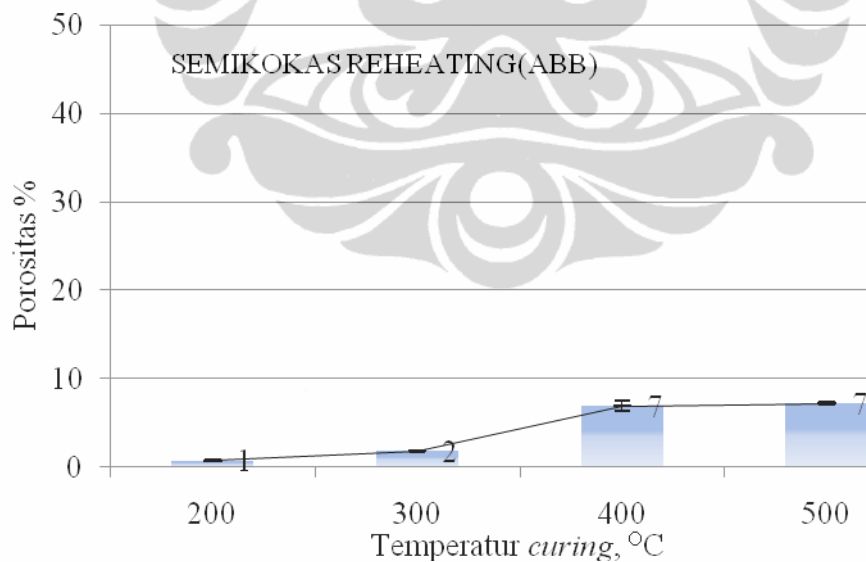
Meskipun grafik menunjukkan kecenderungan menurun ketika temperatur pada 500°C, tetapi secara garis besar menunjukkan kecenderungan persentase porositas yang meningkat, artinya jumlah pori-pori dalam komposit semakin banyak, ketika temperatur *curing* ditingkatkan, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 42.





Gambar 4. 42. Grafik hubungan temperatur *curing* VS % porositas, komposit bahan arang cangkang kelapa atau ABK

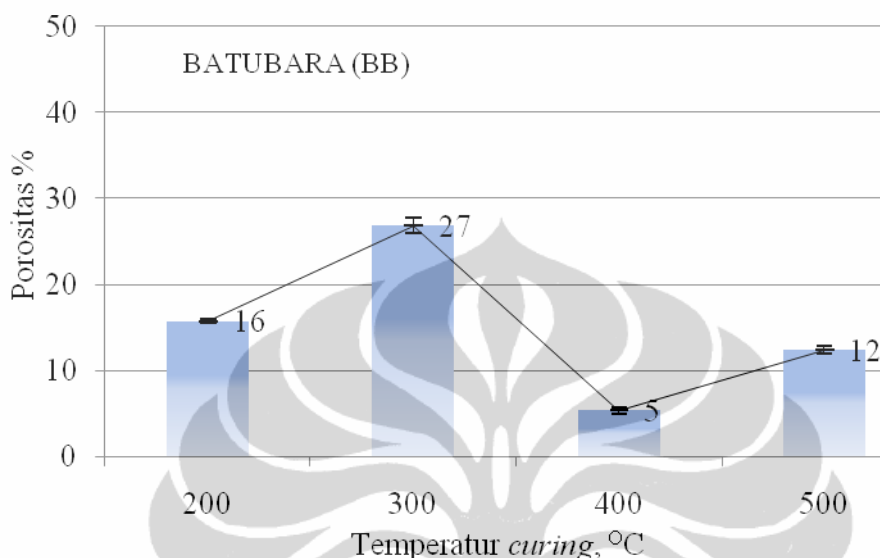
Pengujian porositas komposit karbon-karbon dengan bahan penguat dari arang semikokas *reheating* ABB 1000 menghasilkan kecenderungan peningkatan persentase porositas ketika temperatur *curing* ditingkatkan.



Gambar 4. 43. Grafik hubungan temperatur *curing* VS % porositas, komposit bahan semikokas *reheating* atau ABB 1000.

Nilai porositas tertinggi dihasilkan proses *curing* 500°C, yaitu 7%, sementara itu nilai porositas paling rendah 1% dihasilkan oleh komposit dengan proses *curing* pada temperatur 200°C, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 43.

Porositas yang terjadi pada komposit karbon-karbon umumnya disebabkan oleh menguapnya cairan hidrokarbon yang terkandung dalam komposit ketika proses *curing*, sehingga membentuk rongga-rongga pori dalam komposit.



Gambar 4. 44. Grafik hubungan temperatur *curing* VS % porositas, komposit bahan serbuk batubara atau BB

Hasil uji porositas komposit karbon-karbon dengan bahan penguat dari serbuk batubara atau BB ditunjukkan pada Gambar 4. 44. Semakin tinggi temperatur proses *curing* akan menurunkan persentase porositas, dalam hal ini jumlah pori-pori yang terkandung dalam komposit semakin sedikit. Porositas tertinggi dihasilkan oleh proses *curing* 300°C, 27% dan terendah 5% yang dihasilkan oleh proses *curing* 400°C, dengan kondisi ini artinya komposit tersebut semakin padat. Secara umum, ketika temperatur proses *curing* ditingkatkan akan menurunkan persentase porositas dari komposit yang artinya semakin sedikit jumlah pori atau rongga dalam komposit tersebut. Pori dalam komposit ini terutama terbentuk pada matriks perekat dan melonggarkan ikatan serbuk, sehingga hal ini memicu retakan dalam struktur komposit, yang selanjutnya memperlemah kekuatan komposit. Porositas memicu pelemahan sifat mekanik, baik kuat tekan maupun angka kekerasan dari komposit karbon-karbon.

Porositas komposit berkaitan langsung terhadap densitas yang dihasilkan. Proses pembentukan rongga-rongga porositas juga diakibatkan oleh proses densifikasi dari komposit yang bersangkutan.

Selama karbonisasi senyawa gas *pitch* terlepas [4] dan membentuk rongga pori. Ketika tekanan pencetakan semakin tinggi dan porositas semakin rendah, dan senyawa gas akan menemukan jalan keuarnya sendiri, yang menghasilkan tegangan dan pemuaian dalam material komposit.

Kim [9] menyatakan terdapat beberapa penyebab pembentukan rongga seperti jebakan udara, *moisture* yang terserap dan pertumbuhan rongga pada tekanan rendah. Ketika komposit diproses curing, produk gas dapat terjebak sebagai rongga, dan sehingga meningkatkan porositas.

Dalam proses densifikasi akan mempengaruhi sifat fisik (seperti densitas, porositas dan berat) dan sifat mekanik misalnya kekuatan ikatan antarmuka dan sifat aus [33].

Dhami [47] menyatakan, selama proses densifikasi, tegangan akan terbentuk dalam komposit karena evolusi hidrokarbon baik dari matriks ataupun dari serbuk karbon, yang menyebabkan susutan volume dan kehilangan berat dan selanjutnya bisa terjadi pembentukan rongga-rongga porositas.

Rongga pori terletak pada posisi antarmuka antara rangkaian serbuk dan matriks. Rongga-rongga tersebut kemungkinan muncul dari jebakan gas selama pencetakan dan evolusi gas selama karbonisasi. Dalam rangkaian serbuk, penyusutan matriks cenderung menarik serbuk untuk saling mendekat. Jika gerakan serbuk ini tertahan misalnya oleh faktor geometrik, selanjutnya bisa terjadi retakan matriks, sehingga meningkatkan morfologi yang berbeda dari jaringan rongga-rongga [56].

Ikatan yang kuat antara serbuk dan matriks dapat mencegah pembentukan rongga terbuka, dan penyusutan matriks pada perekatan serbuk dapat dicegah selama pirolisis. Ikatan yang kuat antara serbuk dan matriks dapat menghalangi pembentukan retakan dan rongga pori. Oleh karena itu, penyusutan matrik menjauhi permukaan serbuk menyebabkan pembentukan rongga pori [52].

Berdasarkan fenomena yang dijelaskan, pembentukan rongga pori dalam penelitian ini diperkirakan terbentuk oleh sebab yang sama seperti misalnya karena evolusi hidrokarbon baik dari matriks ataupun dari serbuk karbon, yang menyebabkan susutan volume dan kehilangan berat dan selanjutnya bisa terjadi pembentukan rongga-rongga porositas. Juga porositas yang dihasilkan dalam

penelitian ini menunjukkan ikatan antarmuka yang lemah dari komposit karbon-karbon.

#### **4. 3. 2. Karakterisasi sifat fisik penelitian tahap dua**

Penelitian ini adalah tentang komposit karbon-karbon berbasis bahan karbon-karbon serbuk batubara dengan ukuran  $\geq 80$  mesh dalam matriks *coal tar pitch* melalui proses tekan panas dengan pemanasan temperatur bervariasi dari 300; 330; 350°C yang mempunyai sifat mekanik tahan aus.

##### **4. 3. 2. 1. Analisis hubungan densitas terhadap temperatur tekan panas.**

Ketika temperatur proses tekan panas ditingkatkan mengakibatkan densitas komposit karbon-karbon juga meningkat, hal ini menunjukkan bahwa komposit karbon-karbon semakin padat. Nilai densitas tertinggi diperoleh ketika komposit karbon-karbon tersebut diproses tekan panas pada temperatur 350°C, sehingga densitas mencapai 1,454 g/cm<sup>3</sup>, seperti ditunjukkan oleh Gambar 4. 45.

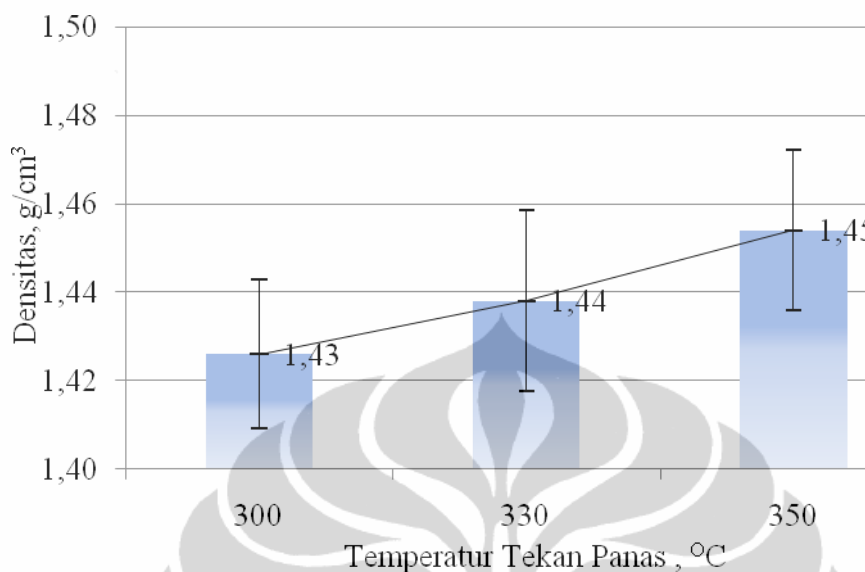
Penurunan densitas disebabkan oleh pelepasan uap yang terjebak selama proses karbonisasi pirolisis dan laju endapan yang rendah pada temperatur karbonisasi tersebut [33].

Selama pirolisis komposit berbasis *pitch*, tegangan signifikan akan dibangkitkan karena evolusi yang berlebihan dari hidrokarbon dari komposit (utamanya dari matriks *pitch*), yang menyebabkan penyusutan volume yang besar dan kehilangan berat komposit [47].

Ko [52] menyatakan terdapat dua faktor yang mempengaruhi densitas komposit karbon-karbon selama pirolisis, adalah pembentukan rongga pori, dan densifikasi kimia yang disebabkan oleh perubahan struktur kimia dari matriks dan serbuk. Pada tingkat awal perlakuan panas komposit, karena kondensasi struktur polimer, gas yang meningkat menciptakan banyak rongga pori dalam komposit. Oleh karena itu, selama pirolisis, menyusut menjauhi permukaan serbuk, yang menyebabkan pembentukan rongga pori.

Pembentukan rongga adalah akibat karbonisasi matrik *pitch*, demikian Tzeng [53]. Derajat pelemahan ikatan antarmuka dalam serbuk/matrik tergantung tidak hanya pada temperatur grafitisasi tetapi juga pada kondisi ikatan antarmuka

dalam komposit karbon-karbon asal. Pelemahan ikatan antarmuka setelah grafitisasi menyebabkan penghantaran kekuatan serbuk yang jelek.



Gambar 4. 45. Grafik hubungan temperatur tekan panas VS densitas

Park [54] menyatakan karbon mulai teroksidasi pada temperatur lebih dari 400°C. Secara umum disetujui bahwa sifat fisik dari serbuk mempengaruhi reaktivitas dari komposit. Reaksi kimia meningkatkan rongga, dan bersamaan penyusutan matriks dapat menimbulkan retakan dan tegangan sisa. Penyusutan dan kehilangan berat selama pirolisis tergantung pada karbonisasi. Peningkatan densitas komposit, menurunkan gesekan internal. Densitas komposit berkaitan langsung terhadap porositasnya.

Densitas komposit karbon-karbon dalam penelitian ini diperkirakan juga disebabkan oleh pelepasan uap yang terjebak selama proses karbonisasi pirolisis dan laju endapan yang rendah pada temperatur karbonisasi tersebut. Karena evolusi yang berlebihan dari hidrokarbon dari komposit (utamanya dari matriks pitch), yang menyebabkan penyusutan volume yang besar dan kehilangan berat komposit.

Proses pencetakan dengan tekan panas dalam penelitian ini yang ternyata semakin dapat meningkatkan densitas komposit, hal ini diperkirakan oleh karena pada saat pencetakan dengan panas tinggi tersebut menyebabkan evolusi gas hidrokarbon mengendapkan kandungan karbon di dalam rongga yang terbentuk sehingga meningkatkan kepadatan komposit karbon-karbon tersebut [33].

Sebagai perbandingan, Blanco [4], dengan material komposit yang diperoleh dari pitch, kokas pengecoran dan antrasit yang diperlakukan panas, menunjukkan nilai densitas sebesar  $1,43 - 1,57 \text{ g/cm}^3$ .

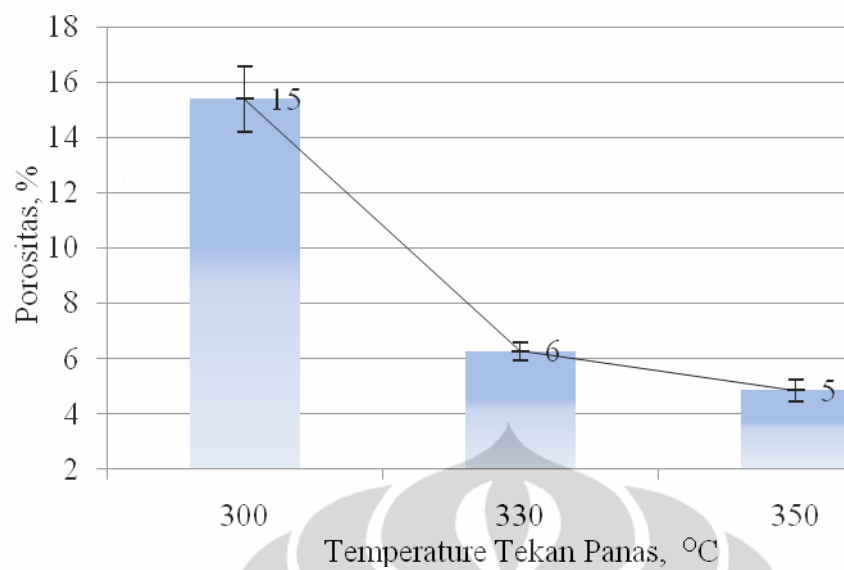
Komposit karbon-karbon yang dibuat dari resin *thermosetting* sebagai matriks prekursor menghasilkan densitas  $1,55 - 1,75 \text{ g/cm}^3$  dan porositas mikro yang terdistribusi dengan baik, sebaliknya yang dibuat dengan *pitch* sebagai matriks prekursor, setelah densifikasi menampilkan densitas  $1,8 - 2,0 \text{ g/cm}^3$  dengan beberapa *mesopores* [3]. Komposit karbon dari jenis serat karbon berbasis *polyacrylnitrile* dari lembaran *non-woven* menghasilkan densitas akhir  $1,73 - 1,75 \text{ g/cm}^3$ , [6]. Komposit karbon dari empat jenis *pitch* dan 4 jenis karbon diuji sebagai sepatu rem karbon, menghasilkan densitas  $2,9 - 3,6 \text{ g/cm}^3$ , [10]. Komposit karbon berbasis *pitch* yang diperkuat kokas butiran menghasilkan densitas antara  $1,7 - 1,9 \text{ g/cm}^3$ , [17]. Komposit karbon-karbon berlapis 2,5D menghasilkan densitas antara  $1,61 - 1,75 \text{ g/cm}^3$ , [5]. Komposit *coal tar pitch* dengan penguat serat Panex yang dikarbonisasi  $1000^\circ\text{C}$  menghasilkan densitas  $1,3 - 1,4 \text{ g/cm}^3$ , [47].

#### 4. 3. 2. 2. Analisis hubungan porositas terhadap temperatur tekan panas

Persentase porositas komposit karbon-karbon semakin menurun ketika temperatur proses tekan panas ditingkatkan. Hal ini menunjukkan bahwa komposit karbon-karbon tersebut semakin padat, artinya jumlah rongga semakin sedikit. Nilai porositas tertinggi dihasilkan oleh komposit karbon-karbon dengan proses tekan panas  $300^\circ\text{C}$ , yaitu 15%. Nilai terendah dihasilkan oleh komposit karbon-karbon pada proses tekan panas  $350^\circ\text{C}$ , yaitu 5%, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 46.

Porositas komposit berkaitan langsung terhadap densitas yang dihasilkan. Proses pembentukan rongga-rongga porositas juga diakibatkan oleh proses densifikasi dari komposit yang bersangkutan.

Selama karbonisasi senyawa gas *pitch* terlepas dan membentuk rongga pori. Ketika tekanan pencetakan semakin tinggi dan porositas semakin rendah, dan senyawa gas akan menemukan jalan keuarnya sendiri, yang menghasilkan tegangan dan pemuaiian dalam material komposit [4].



Gambar 4. 46. Grafik hubungan temperatur tekan panas VS porositas

Kim menyatakan terdapat beberapa penyebab pembentukan rongga seperti jebakan udara, moisture yang terserap dan pertumbuhan rongga pada tekanan rendah. Ketika komposit diproses curing, produk gas dapat terjebak sebagai rongga [9], dan sehingga meningkatkan porositas.

Dalam proses densifikasi akan mempengaruhi sifat fisik (seperti densitas, porositas dan berat) dan sifat mekanik misalnya kekuatan ikatan antarmuka dan sifat aus [33].

Dhami [47] menyatakan, selama proses densifikasi, tegangan akan terbentuk dalam komposit karena evolusi hidrokarbon baik dari matriks ataupun dari serbuk karbon, yang menyebabkan susutan volume dan kehilangan berat dan selanjutnya bisa terjadi pembentukan rongga-rongga porositas.

Rongga pori terletak pada posisi antarmuka antara rangkaian serbuk dan matriks. Rongga-rongga tersebut kemungkinan muncul dari jebakan gas selama pencetakan dan evolusi gas selama karbonisasi. Dalam rangkaian serbuk, penyusutan matriks cenderung menarik serbuk untuk saling mendekat. Jika gerakan serbuk ini tertahan misalnya oleh faktor geometrik, selanjutnya bisa terjadi retakan matriks, sehingga meningkatkan morfologi yang berbeda dari jaringan rongga-rongga [56].

Ikatan yang kuat antara serbuk dan matriks dapat mencegah pembentukan rongga terbuka, dan penyusutan matriks pada perekatan serbuk dapat dicegah

selama pirolisis [52]. Ikatan yang kuat antara serbuk dan matriks dapat menghalangi pembentukan retakan dan rongga pori. Oleh karena itu, penyusutan matrik menjauhi permukaan serbuk menyebabkan pembentukan rongga pori [52].

Berdasarkan fenomena yang dijelaskan, pembentukan rongga pori dalam penelitian ini diperkirakan terbentuk oleh sebab yang sama seperti misalnya karena evolusi hidrokarbon baik dari matriks *pitch* ataupun dari serbuk karbon, yang menyebabkan susutan volume dan kehilangan berat dan selanjutnya bisa terjadi pembentukan rongga-rongga porositas. Juga porositas yang dihasilkan dalam penelitian ini menunjukkan ikatan antarmuka yang lemah dari komposit karbon-karbon.

Material komposit yang diperoleh dari *pitch*, kokas *foundry* dan antrasit yang diperlakukan panas, menunjukkan nilai porositas *green pellet* yang diperoleh dari tekanan pencetakan yang berbeda sebesar 1,2 – 14,9%. Setelah *green pellet* mengalami karbonisasi menghasilkan porositas yang meningkat yaitu 20% - 50%, [4].

#### **4. 3. 3. Karakterisasi sifat fisik penelitian tahap tiga**

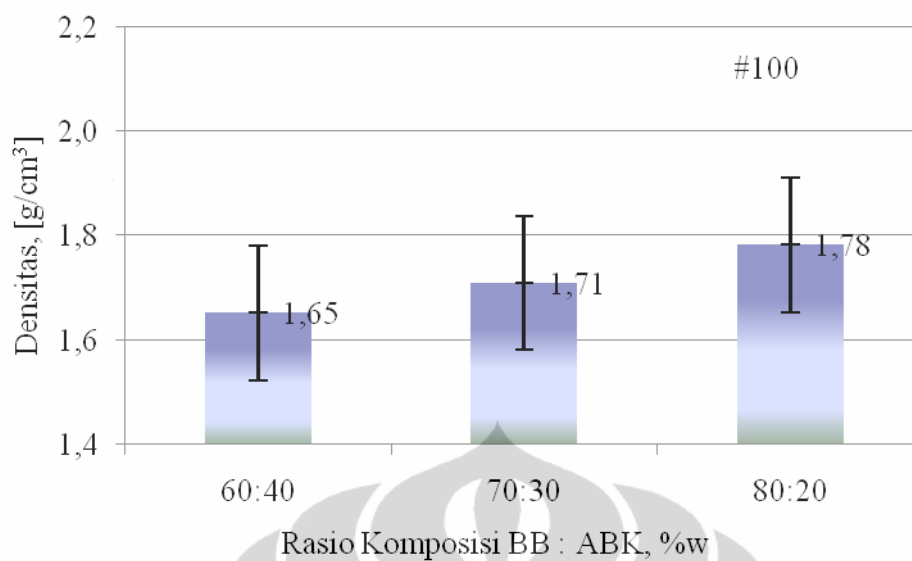
Penelitian tahap tiga adalah pembuatan komposit berbasis bahan karbon dari serbuk limbah batubara dan serbuk karbon limbah cangkang kelapa sebagai bahan penguat dalam matriks *coal tar pitch*, yang ditinjau dari sudut variasi ukuran karbon serbuk penguat dan rasio komposisi serbuk karbon batubara dan karbon cangkang kelapa.

##### **4. 3. 3. 1. Analisis hubungan densitas terhadap rasio komposisi.**

Pengujian densitas mengukur berat komposit pada satuan volume, konsepnya menentukan tingkat kepadatan komposit karbon-karbon. Semakin tinggi persentase kandungan karbon batubara semakin tinggi densitas komposit karbon-karbon.

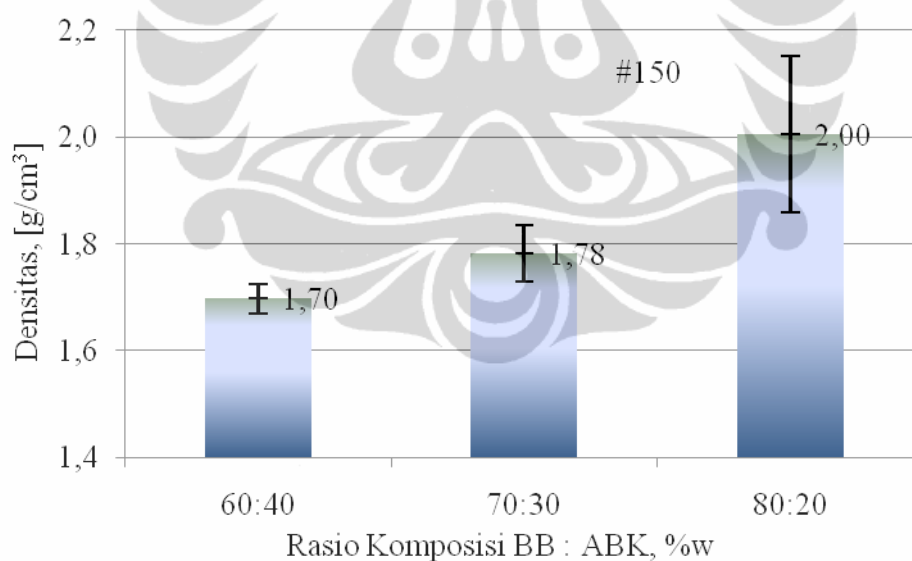
Komposit karbon-karbon dari bahan dengan ukuran serbuk mesh 100 menghasilkan densitas tertinggi 1,78 g/cm<sup>3</sup> pada rasio komposisi BB:ABK 80:20. Nilai terendah adalah 1,65 g/cm<sup>3</sup>, dihasilkan oleh komposit dengan rasio komposisi 60:40 seperti ditunjukkan Gambar 4. 47.





Gambar 4. 47. Grafik hubungan rasio komposisi VS densitas, mesh 100.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa komposit karbon-karbon dengan kandungan karbon cangkang kelapa yang semakin besar membuat komposit semakin ringan.

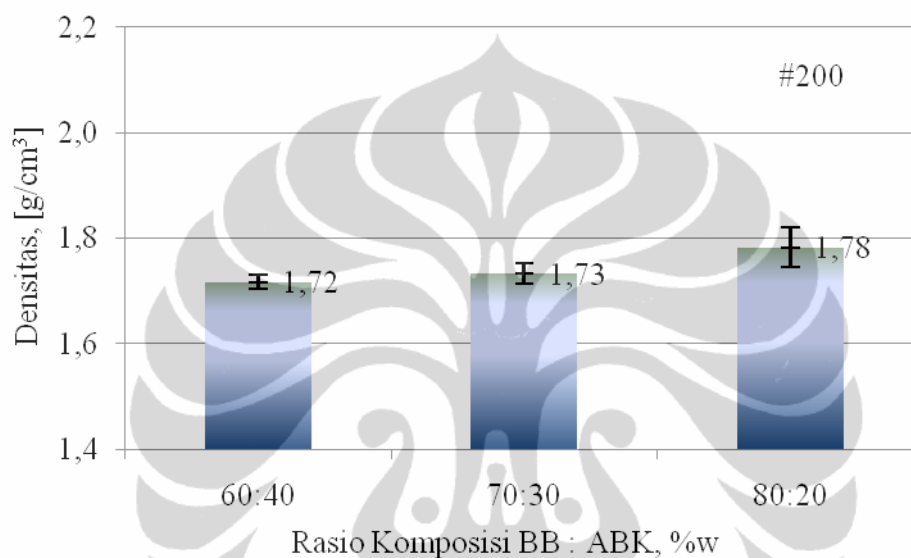


Gambar 4. 48. Grafik hubungan rasio komposisi VS densitas, mesh 150.

Grafik hubungan rasio komposisi terhadap densitas komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk mesh 150 dapat dilihat pada Gambar 4. 48. Komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk ini menghasilkan densitas tertinggi 2 g/cm<sup>3</sup> pada rasio komposisi 80:20. Nilai densitas terendah adalah 1,70

$\text{g/cm}^3$  ditunjukkan oleh komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 60:40. Hal ini juga menunjukkan bahwa semakin besar persentase kandungan karbon batubara semakin meningkatkan nilai densitas komposit.

Komposit karbon-karbon yang dibuat dari bahan karbon dengan ukuran serbuk mesh 200 menghasilkan densitas tertinggi  $1,78 \text{ g/cm}^3$  pada rasio komposisi 80:20. Densitas dengan nilai  $1,72 \text{ g/cm}^3$  dihasilkan oleh rasio komposisi 60:40. Seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 49.

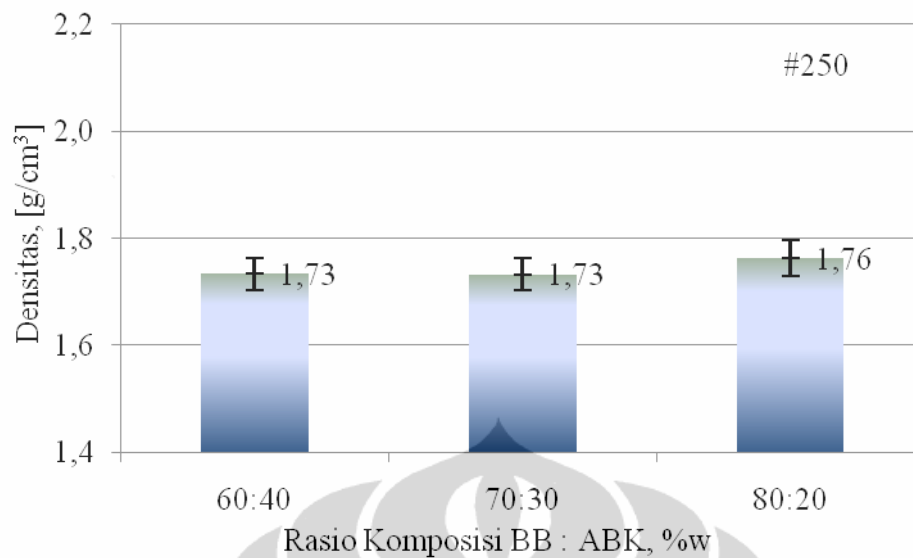


Gambar 4. 49. Grafik hubungan rasio komposisi VS densitas, mesh 200.

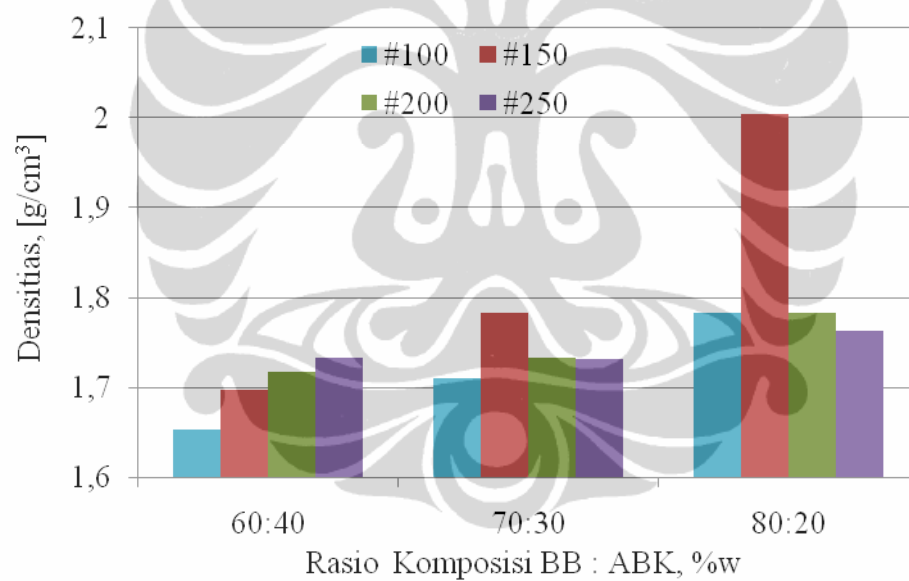
Komposit karbon-karbon yang dibuat dari bahan karbon dengan ukuran serbuk mesh 250 menghasilkan densitas tertinggi  $1,76 \text{ g/cm}^3$  pada rasio komposisi 80:20. Densitas dengan nilai  $1,73 \text{ g/cm}^3$  dihasilkan oleh rasio komposisi 60:40 dan rasio komposisi 70:30 seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 50. Angka-angka tersebut sama karena pembulatan. Peningkatan nilai densitas karena persentase kandungan karbon batubara yang semakin besar juga didukung oleh hasil pengujian densitas terhadap masing-masing bahan karbon.

Perubahan rasio komposisi BB:ABK terbukti mengubah densitas komposit, rasio komposisi dengan kandungan karbon batubara yang semakin banyak terbukti meningkatkan densitas komposit. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 4. 51.

Densitas karbon batubara  $1,633 \text{ g/cm}^3$ , lebih besar dari pada densitas karbon cangkang kelapa  $1,3794 \text{ g/cm}^3$  seperti ditunjukkan pada Tabel 4. 4.



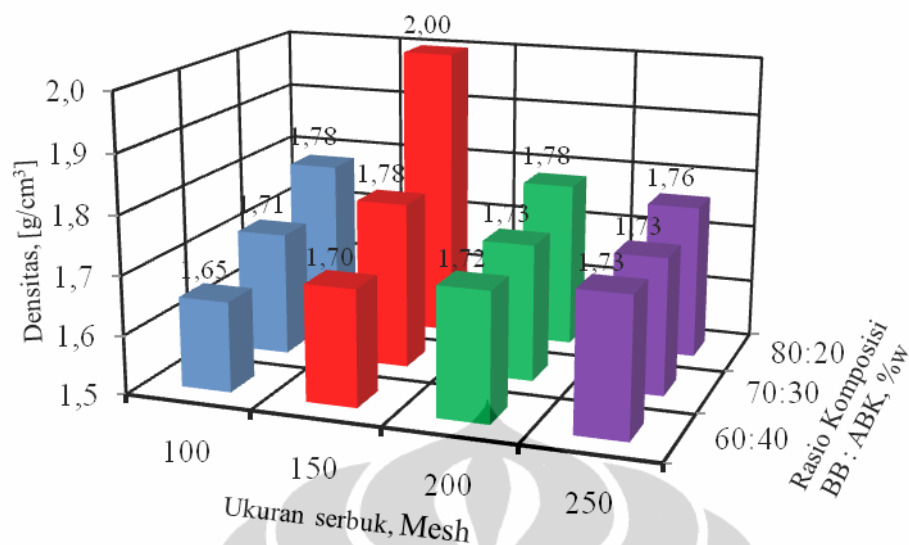
Gambar 4. 50. Grafik hubungan rasio komposisi VS densitas, mesh 250.



Gambar 4. 51. Perbandingan grafik hubungan rasio komposisi VS densitas, mesh 100; 150; 200; 250

Hal ini yang menyebabkan ketika persentase kandungan karbon batubara meningkat maka akan meningkatkan nilai densitas dari komposit karbon-karbon tersebut.

Densitas komposit karbon-karbon dalam hubungannya dengan ukuran mesh serbuk dan dalam hubungannya dengan rasio komposisi BB:ABK secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 4. 52.



Gambar 4. 52. Perbandingan Grafik hubungan ukuran mesh serbuk vs densitas vs rasio komposisi

Densitas komposit karbon-karbon tertinggi dihasilkan oleh rasio komposisi 80:20 pada ukuran serbuk mesh 150, yaitu  $2 \text{ g/cm}^3$ . Komposit karbon-karbon ini mengandung 80% berat karbon batubara, sehingga menghasilkan densitas yang lebih tinggi dibandingkan komposit dengan rasio komposisi 70:30 dan 60:40. Komposit karbon-karbon paling ringan ditunjukkan oleh rasio komposisi 60:40 pada ukuran serbuk mesh mesh 100, yaitu  $1,65 \text{ g/cm}^3$ . Komposit karbon-karbon tersebut mengandung 40% berat karbon cangkang kelapa, sehingga menghasilkan densitas yang rendah dibandingkan komposit dengan rasio komposisi 80:20 dan 70:30.

Penyebab penurunan kekerasan dan sifat mekanik lainnya dalam komposit karbon-karbon berbasis *coal tar pitch* adalah pengembangan matriks *pitch* karena pembentukan retakan internal atau rongga-rongga yang tidak nampak keluar di permukaan [10]. Pengembangan ini akan membentuk rongga-rongga yang menurunkan densitas komposit, sehingga berpengaruh terhadap sifat mekanik dan sifat fisik komposit karbon-karbon.

Penurunan densitas disebabkan oleh pelepasan uap yang terjebak selama proses karbonisasi pirolisis dan laju endapan yang rendah pada temperatur karbonisasi tersebut [33].

Selama pirolisis komposit *pitch*, tegangan signifikan akan dibangkitkan

karena evolusi yang berlebihan dari hidrokarbon dari komposit (utamanya dari matriks *pitch*), yang menyebabkan penyusutan volume yang besar dan kehilangan berat komposit [47].

Ko [52] menyatakan terdapat dua faktor yang mempengaruhi densitas komposit karbon-karbon selama pirolisis, adalah pembentukan rongga pori, dan densifikasi kimia yang disebabkan oleh perubahan struktur kimia dari matriks dan serbuk. Pada tingkat awal perlakuan panas komposit, karena kondensasi struktur polimer, gas yang meningkat menciptakan banyak rongga pori dalam komposit. Oleh karena itu, selama pirolisis, menyusut menjauhi permukaan serbuk, yang menyebabkan pembentukan rongga pori.

Pembentukan rongga adalah akibat karbonisasi matriks *pitch*, demikian Tzeng [53]. Derajat pelemahan ikatan antarmuka dalam serbuk/matrik tergantung tidak hanya pada temperatur grafitisasi tetapi juga pada kondisi ikatan antarmuka dalam komposit karbon-karbon asal. Pelemahan ikatan antarmuka setelah grafitisasi menyebabkan penghantaran kekuatan serbuk yang jelek.

Park [54] menyatakan karbon mulai teroksidasi pada temperatur lebih dari 400°C. Secara umum disetujui bahwa sifat fisik dari serbuk mempengaruhi reaktivitas dari komposit. Reaksi kimia meningkatkan rongga, dan bersamaan penyusutan matriks dapat menimbulkan retakan dan tegangan sisa. Penyusutan dan kehilangan berat selama pirolisis tergantung pada karbonisasi. Dengan peningkatan densitas komposit, gesekan internal menurun. Densitas komposit berkaitan langsung terhadap porositasnya.

Densitas komposit karbon-karbon dalam penelitian ini diperkirakan juga disebabkan oleh pelepasan uap yang terjebak selama proses karbonisasi pirolisis dan laju endapan yang rendah pada temperatur karbonisasi tersebut. Karena evolusi yang berlebihan dari hidrokarbon dari komposit (utamanya dari matriks *pitch*), yang menyebabkan penyusutan volume yang besar dan kehilangan berat komposit.

Densitas komposit karbon-karbon dengan kandungan serbuk karbon cangkang kelapa lebih tinggi menghasilkan densitas yang lebih rendah dibandingkan terhadap komposit dengan kandungan serbuk karbon batubara, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 52. Hal ini lebih disebabkan oleh densitas

bahan asal, di mana karbon cangkang kelapa mempunyai densitas yang lebih kecil daripada densitas serbuk karbon batubara.

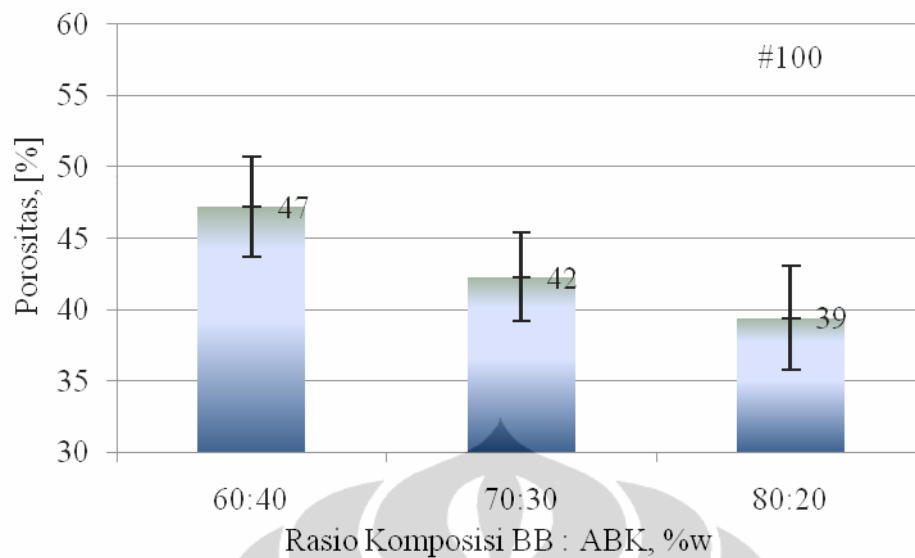
Sebagai perbandingan, komposit karbon-karbon unjuk kerja tinggi yang dibuat dari resin *thermosetting* sebagai matriks *precursor* lolos densitas rendah 1,55 – 1,75 g/cm<sup>3</sup> dan porositas mikro yang terdistribusi dengan baik, sebaliknya yang dibuat dengan *pitch* sebagai matriks *precursor*, setelah densifikasi menampilkan densitas 1,6–1,98 g/cm<sup>3</sup> dengan beberapa *mesopores* [3]. Material komposit yang dibuat dari *pitch*, kokas *foundry* dan antrasit yang diperlakukan panas, menunjukkan nilai densitas sebesar 1,43 – 1,57 g/cm<sup>3</sup>, [4]. Komposit karbon-karbon berlapis 2,5 arah menghasilkan densitas antara 1,61 – 1,75 g/cm<sup>3</sup>, [5]. Sampel yang dibuat dari tipe serat karbon berbasis *polyacrylnitrile* dari lembaran *non-woven* menghasilkan densitas akhir 1.73–1.75 g/cm<sup>3</sup>, [6]. Komposit karbon dari empat jenis *pitch* (*coal tar pitch* perendam komersial, *air-blown pitch* dan dua *coal tar pitch* yang diperlakukan panas) dan empat jenis karbon (*graphite*, *anthracite*, *green petroleum coke* dan *foundry coke*) menghasilkan densitas 0,87 - 1,8 g/cm<sup>3</sup>, [10]. Komposit karbon berbasis *pitch* yang diperkuat kokas butiran menghasilkan densitas antara 1,7 – 1,9 g/cm<sup>3</sup>, [17]. Komposit *coal tar pitch* dengan penguat serat Panex yang dikarbonisasi 1000°C menghasilkan densitas 1,3 – 1,4 g/cm<sup>3</sup>, [47].

#### 4. 3. 3. 2. Analisis hubungan porositas terhadap rasio komposisi.

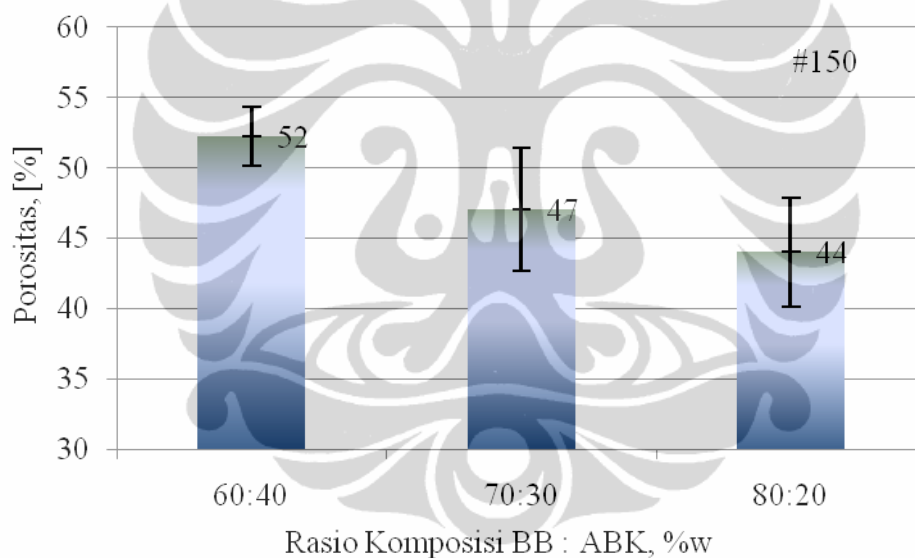
Pengujian ini untuk mengetahui persentase kandungan pori-pori komposit karbon-karbon. Konsepnya semakin banyak persentase pori dalam komposit akan semakin memperlemah komposit tersebut, karena pori atau rongga potensial memicu retakan, yang melemahkan ikatan serbuk.

Nilai persentase porositas tertinggi 47% dihasilkan oleh rasio komposisi BB:ABK 60:40, dan nilai terendah ditunjukkan oleh rasio komposisi 80:20, yaitu 39%, untuk komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk mesh 100. Seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 53.

Komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk mesh 150 menghasilkan persentase porositas tertinggi 52% pada rasio komposisi 60:40 dan terendah 44% pada rasio komposisi 80:20. Gambar 4. 54 menunjukkan fakta tersebut.



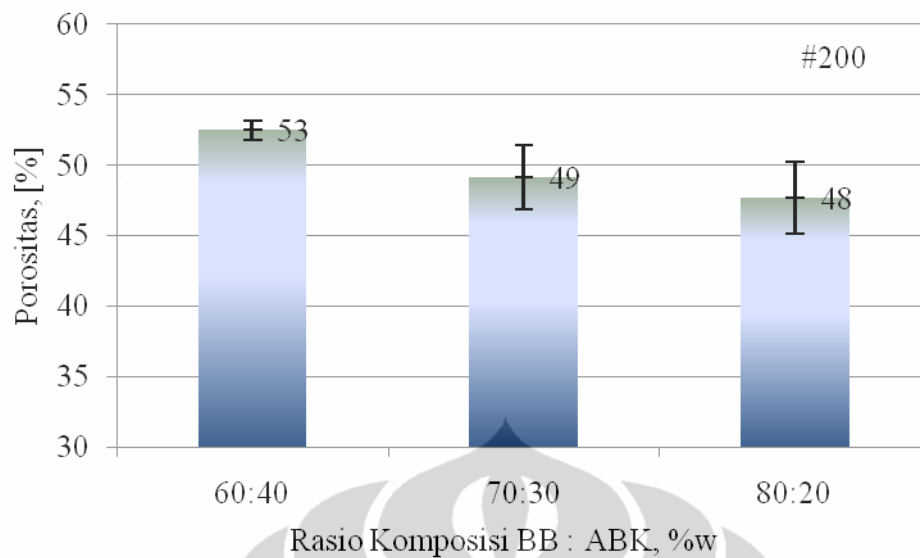
Gambar 4. 53. Grafik hubungan rasio komposisi VS porositas, mesh 100.



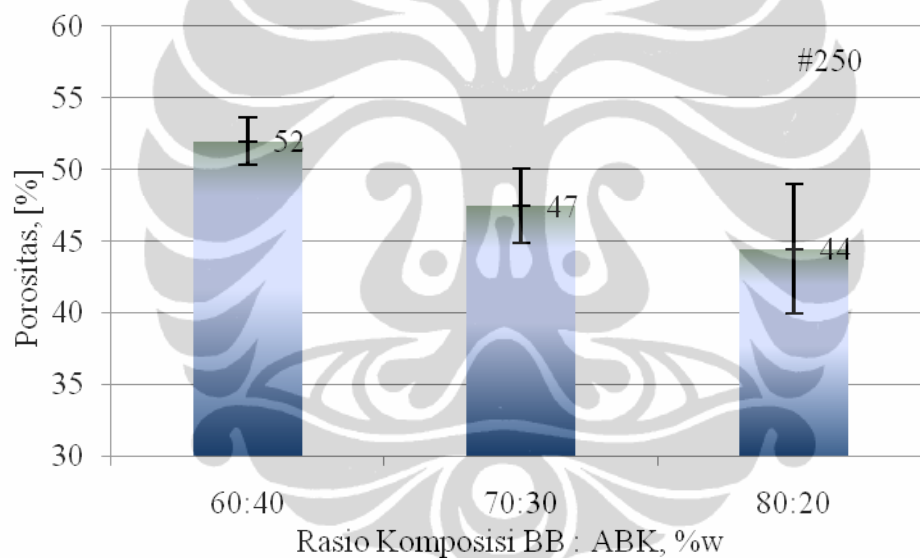
Gambar 4. 54. Grafik hubungan ratio komposisi VS porositas, mesh 150.

Grafik persentase porositas dari komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk mesh 200 ditunjukkan pada Gambar 4. 55. Nilai persentase porositas tertinggi dari komposit ini adalah 53% yang ditunjukkan oleh rasio komposisi BB:ABK=60:40, nilai terendah dihasilkan oleh rasio komposisi 80:20, yaitu 48%.

Grafik persentase porositas komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk mesh 250 dapat dilihat pada Gambar 4. 56. Nilai persentase porositas tertinggi dari komposit ini adalah 52% yang dihasilkan oleh rasio komposisi BB:ABK 60:40, nilai terendah dihasilkan oleh rasio komposisi 80:20, yaitu 44%.



Gambar 4. 55. Grafik hubungan ratio komposisi VS porositas, mesh 200.



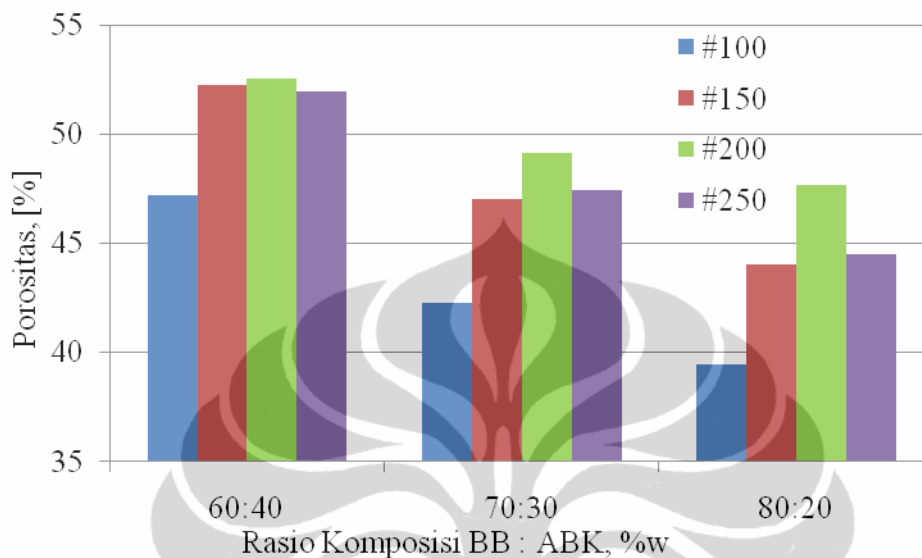
Gambar 4. 56. Grafik hubungan ratio komposisi VS porositas, mesh 250.

Semakin tinggi persentase kandungan karbon batubara semakin menurunkan persentase porositas komposit karbon-karbon, hal ini terjadi untuk semua jenis ukuran serbuk dan karena densitas yang meningkat maka porositas hasil perhitungan menurun seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 57.

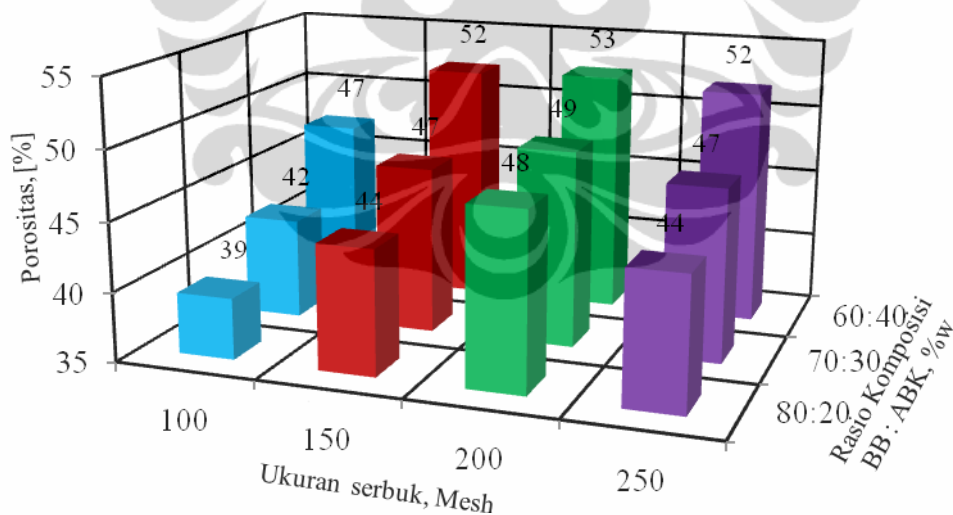
Secara keseluruhan, nilai persentase porositas komposit karbon-karbon dipengaruhi oleh rasio komposisi BB:ABK dan dipengaruhi ukuran serbuk karbon yang digunakan dalam membuat komposit karbon-karbon tersebut. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 4. 58. Gambar ini menunjukkan nilai tertinggi



persentase porositas 53%, pada ukuran serbuk mesh 200 dan rasio komposisi 60:40, dan nilai persentase porositas terendah 39% ditunjukkan oleh komposit dengan rasio komposisi 80:20 pada ukuran serbuk mesh 100.



Gambar 4. 57. Perbandingan Grafik hubungan ratio komposisi VS porositas, mesh 100; 150; 200; 250



Gambar 4. 58. Perbandingan Grafik hubungan ukuran mesh serbuk vs porositas vs rasio komposisi

Porositas komposit berkaitan langsung terhadap densitas yang dihasilkan. Proses pembentukan rongga-rongga porositas juga diakibatkan oleh proses densifikasi dari komposit yang bersangkutan.

Selama karbonisasi senyawa gas pitch terlepas dan membentuk rongga pori. Ketika tekanan pencetakan semakin tinggi dan porositas semakin rendah, dan senyawa gas akan menemukan jalan keluarnya sendiri, yang menghasilkan tegangan dan pemuaian dalam material komposit [4].

Kim [9] menyatakan terdapat beberapa penyebab pembentukan rongga seperti jebakan udara, moisture yang terserap dan pertumbuhan rongga pada tekanan rendah. Ketika komposit diproses curing, produk gas dapat terjebak sebagai rongga, dan sehingga meningkatkan porositas.

Dalam proses densifikasi akan mempengaruhi sifat fisik (seperti densitas, porositas dan berat) dan sifat mekanik misalnya kekuatan ikatan antarmuka dan sifat aus. Porositas terbuka akan berkurang ketika temperatur ditingkatkan, hal ini menyiratkan bahwa laju reaksi tinggi pada temperatur yang tinggi merintangai saluran masuk rongga terbuka, sehingga mengakibatkan penutupan rongga dari specimen [33].

Dhami [47] menyatakan, selama proses densifikasi, tegangan akan terbentuk dalam komposit karena evolusi hidrokarbon baik dari matriks ataupun dari serbuk karbon, yang menyebabkan susutan volume dan kehilangan berat dan selanjutnya bisa terjadi pembentukan rongga-rongga porositas.

Rongga pori terletak pada posisi antarmuka antara rangkaian serbuk dan matriks. Rongga-rongga tersebut kemungkinan muncul dari jebakan gas selama pencetakan dan evolusi gas selama karbonisasi. Dalam rangkaian serbuk, penyusutan matriks cenderung menarik serbuk untuk saling mendekat. Jika gerakan serbuk ini tertahan misalnya oleh faktor geometrik, selanjutnya bisa terjadi retakan matriks, sehingga meningkatkan morfologi yang berbeda dari jaringan rongga-rongga [56].

Ikatan yang kuat antara serbuk dan matriks dapat mencegah pembentukan rongga terbuka, dan penyusutan matriks pada perekatan terhadap serbuk dapat dicegah selama pirolisis. Ikatan yang kuat antara serbuk dan matriks dapat menghalangi pembentukan retakan dan rongga pori. Oleh karena itu, penyusutan matrik menjauhi permukaan serbuk menyebabkan pembentukan rongga pori [52].

Berdasarkan fenomena yang dijelaskan, pembentukan rongga pori dalam penelitian diperkirakan terbentuk oleh sebab yang sama seperti misalnya karena

evolusi hidrokarbon baik dari matriks ataupun dari serbuk karbon, yang menyebabkan susutan volume dan kehilangan berat dan selanjutnya bisa terjadi pembentukan rongga-rongga porositas. Juga porositas yang dihasilkan dalam penelitian ini menunjukkan ikatan antarmuka yang lemah dari komposit karbon-karbon.

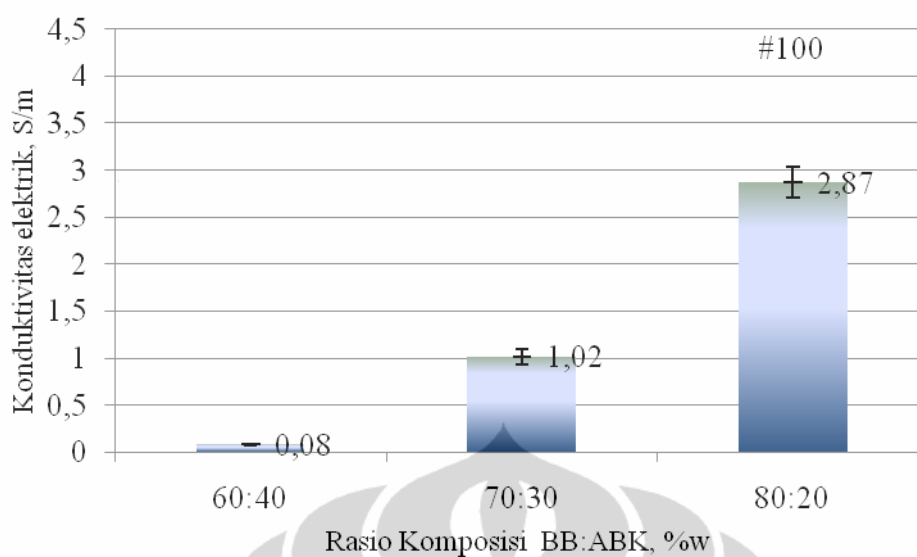
Porositas tertinggi dalam penelitian ini dihasilkan oleh komposit karbon-karbon dengan kandungan serbuk karbon cangkang kelapa yang tinggi, misalnya pada rasio komposisi 60:40 (ABK:BB) menghasilkan porositas 47 – 53%, hal ini kemungkinan disebabkan pembentukan rongga seperti jebakan udara, moisture yang terserap dan pertumbuhan rongga pada tekanan rendah. Ketika komposit diproses curing, produk gas dapat terjebak akan menjadi rongga dan sehingga meningkatkan porositas. Seperti diungkapkan oleh Kim [9].

Sebagai perbandingan, Blanco dengan material kompositnya yang diperoleh dari *pitch*, kokas *foundry* dan antrasit yang diperlakukan panas, menunjukkan nilai porositas *green pellet* yang diperoleh dari tekanan pencetakan yang berbeda sebesar 1,2 – 14,9%. Setelah *green pellet* mengalami karbonisasi menghasilkan porositas yang meningkat yaitu 20% - 50%, [4].

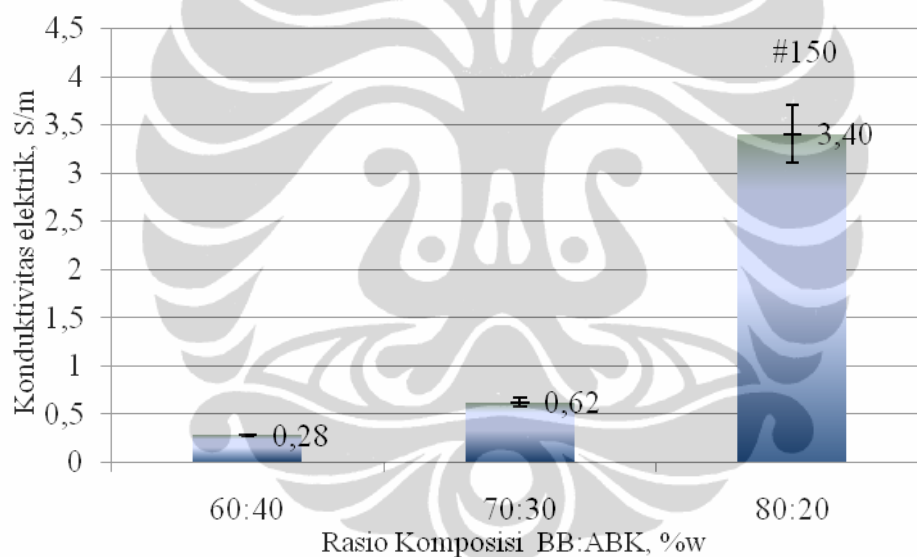
#### **4. 3. 3. 3. Analisis hubungan sifat konduktivitas elektrik terhadap rasio komposisi.**

Hasil pengukuran dan penghitungan konduktivitas elektrik komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk mesh 100 menunjukkan nilai konduktivitas tertinggi 2,87 S/m yang dihasilkan oleh komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 80:20. Nilai terendah adalah 0,08 S/m dihasilkan oleh komposit dengan rasio komposisi 60:40, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 59.

Grafik hasil pengukuran dan penghitungan konduktivitas elektrik komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk mesh 150 ditunjukkan Gambar 4. 60. Nilai konduktivitas tertinggi adalah 3,40 S/m yang ditunjukkan oleh rasio komposisi 80:20. Nilai terendah adalah 0,28 S/m yang ditunjukkan oleh rasio komposisi 60:40.



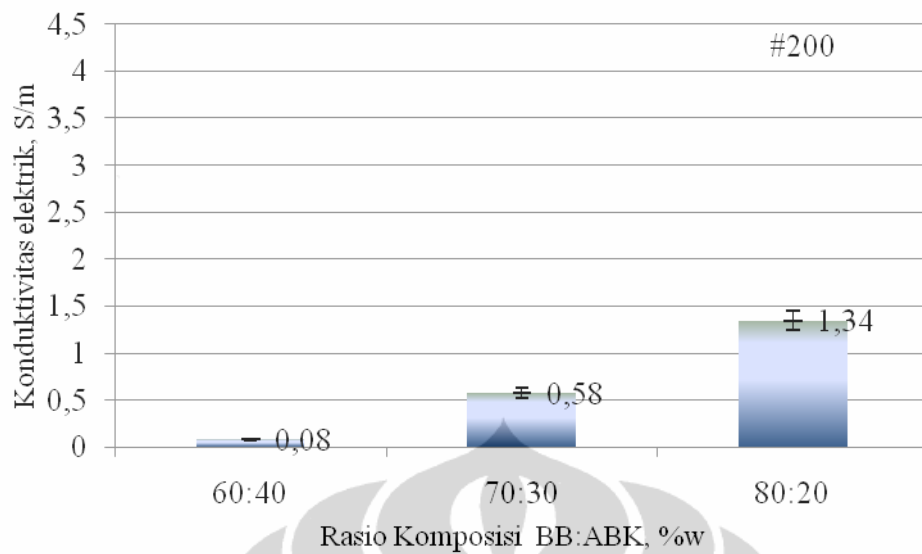
Gambar 4. 59. Grafik hubungan rasio komposisi VS konduktivitas, mesh 100.



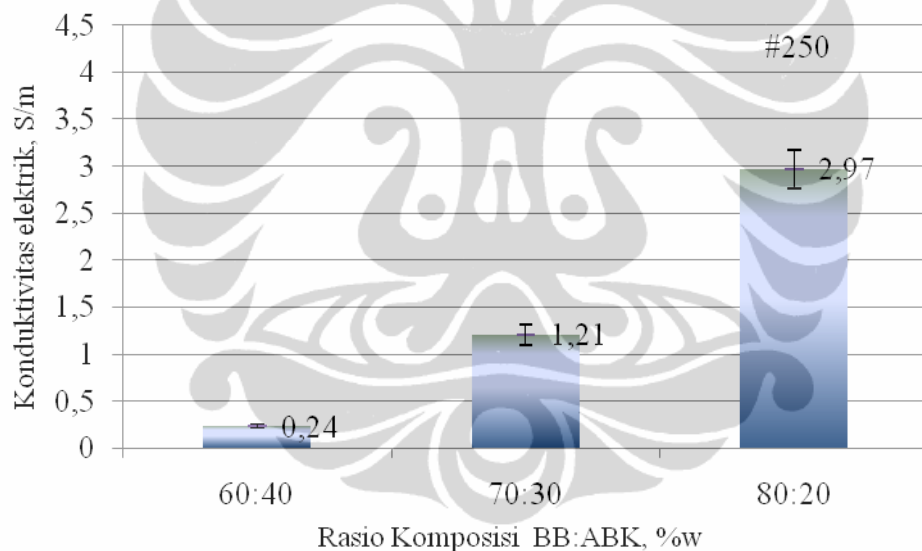
Gambar 4. 60. Grafik hubungan rasio komposisi VS konduktivitas, mesh 150.

Komposit karbon-karbon dari bahan dengan ukuran serbuk mesh 200 menghasilkan konduktivitas elektrik tertinggi 1,34 S/m yang dihasilkan oleh rasio komposisi 80:20. Nilai terendah 0,08 S/m, dihasilkan oleh rasio komposisi 60:40. Seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 61.

Nilai konduktivitas elektrik tertinggi dihasilkan oleh komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk mesh 250 adalah 2,97 S/m yang ditunjukkan oleh rasio komposisi 80:20 dan nilai terendah adalah 0,24 S/m yang ditunjukkan oleh rasio komposisi 60:40, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 62.

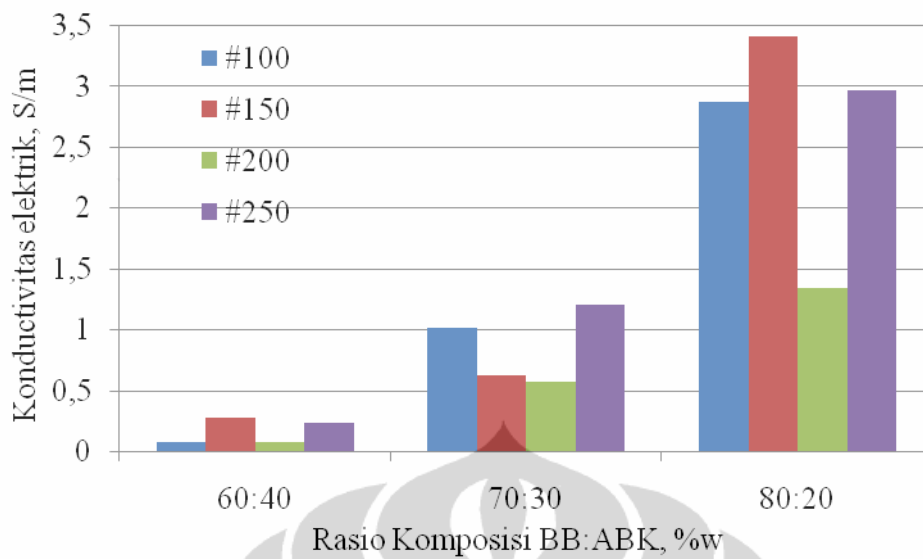


Gambar 4. 61. Grafik hubungan rasio komposisi VS konduktivitas, mesh 200.



Gambar 4. 62. Grafik hubungan rasio komposisi VS konduktivitas, mesh 250.

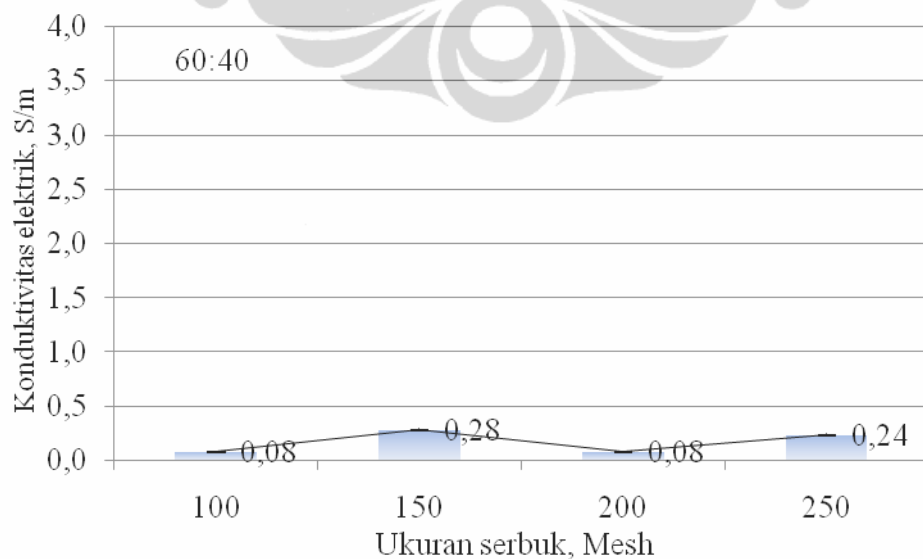
Perubahan rasio persentase komposisi BB:ABK berpengaruh terhadap besaran konduktivitas elektrik dari komposit karbon-karbon. Semakin tinggi persentase kandungan karbon serbuk batubara dalam komposit ternyata meningkatkan konduktivitas elektrik dari komposit karbon-karbon tersebut. Hal ini terjadi terhadap semua jenis ukuran serbuk komposit yang diteliti seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 63.



Gambar 4. 63. Perbandingan Grafik hubungan rasio komposisi VS konduktivitas, mesh100; 150; 200; 250

#### 4. 3. 3. 4. Analisis hubungan sifat konduktivitas elektrik terhadap ukuran serbuk.

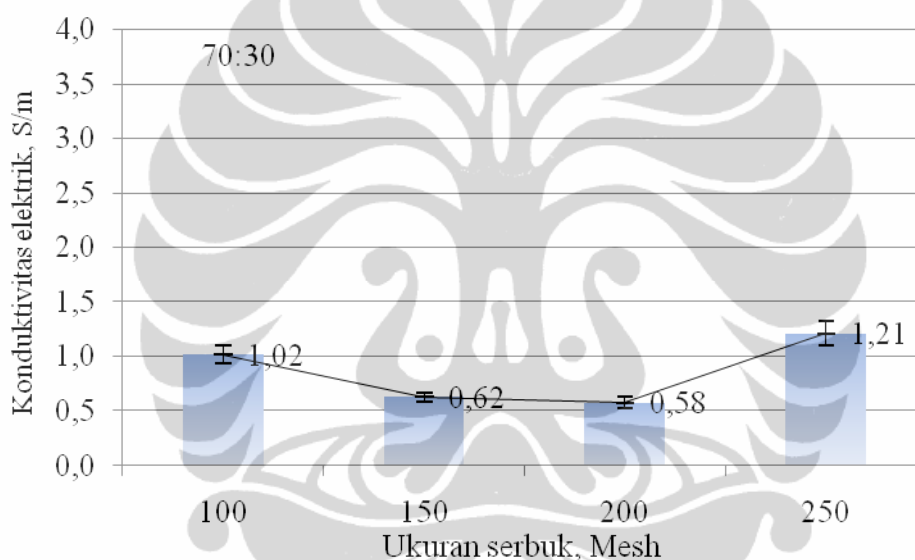
Perubahan ukuran serbuk berpengaruh terhadap nilai konduktivitas elektrik dari komposit karbon-karbon. Untuk rasio komposisi tertentu, semakin kecil ukuran serbuk atau semakin besar standar mesh serbuk semakin meningkatkan nilai konduktivitas elektrik.



Gambar 4. 64. Perubahan nilai konduktivitas elektrik akibat pembesaran mesh, rasio 60:40.

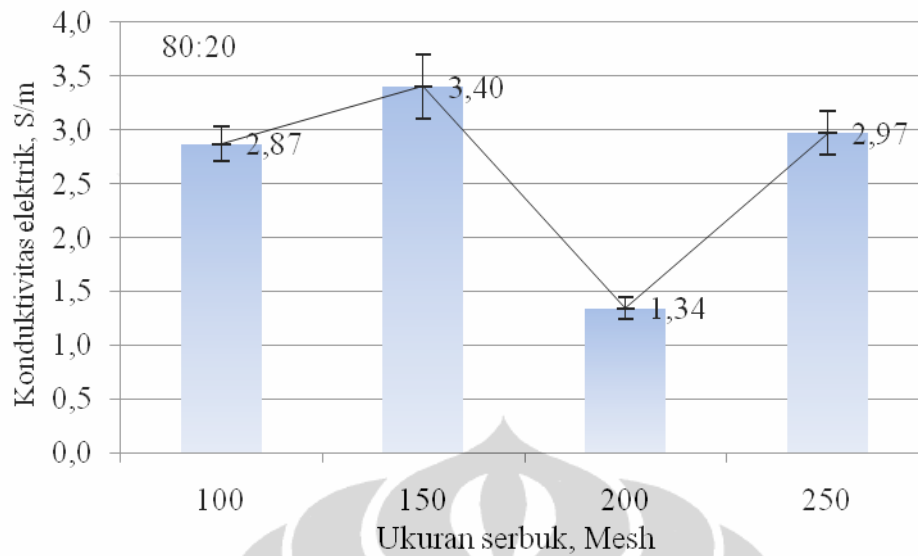
Peningkatan nilai konduktivitas elektrik karena ukuran serbuk yang semakin kecil atau mesh standar yang semakin besar, untuk rasio komposisi BB:ABK 60:40 ditunjukkan pada Gambar 4. 64. Ukuran mesh serbuk 100 menghasilkan konduktivitas elektrik 0,08 S/m, sementara ukuran mesh serbuk 250 menghasilkan konduktivitas elektrik 0,24 S/m.

Peningkatan nilai konduktivitas elektrik karena ukuran mesh serbuk yang semakin besar, untuk rasio komposisi BB:ABK 70:30 ditunjukkan Gambar 4. 65. Ukuran mesh 100 menghasilkan konduktivitas elektrik 1,02 S/m, sementara pada ukuran mesh 250 menghasilkan konduktivitas elektrik 1,21 S/m.

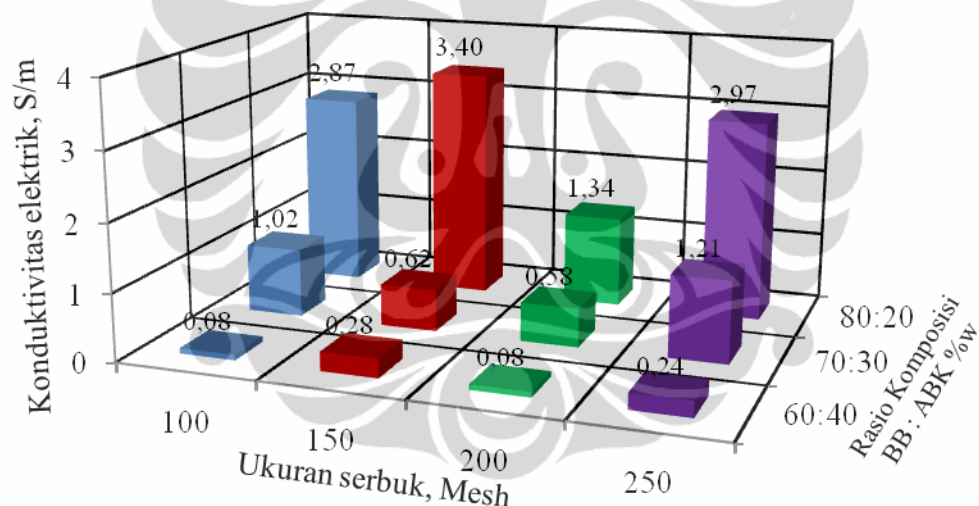


Gambar 4. 65. Perubahan nilai konduktivitas elektrik akibat pembesaran mesh, rasio 70:30.

Sementara rasio komposisi 80:20 menunjukkan semakin kecil ukuran serbuk justru menurunkan nilai konduktivitas elektrik. Penurunan nilai konduktivitas elektrik karena pembesaran ukuran mesh serbuk, untuk rasio komposisi BB:ABK 80:20 ditunjukkan pada Gambar 4. 66. Ukuran serbuk mesh 100 dalam komposit karbon-karbon menghasilkan konduktivitas elektrik 2,78 S/m, pada ukuran mesh 150 menunjukkan konduktivitas elektrik 3,4 S/m, meningkat tajam, kemudian pada mesh 200 menghasilkan konduktivitas elektrik 1,34 S/m, menurun tajam, dan pada mesh 250 meningkat lagi menjadi 2,97 S/m.



Gambar 4. 66. Perubahan nilai konduktivitas elektrik akibat pembesaran mesh, rasio 80:20.



Gambar 4. 67. Perbandingan Grafik hubungan ukuran mesh serbuk vs konduktivitas vs rasio komposisi

Nilai konduktivitas elektrik komposit karbon-karbon secara keseluruhan berkaitan dengan rasio komposisi BB:ABK dan ukuran serbuk dalam komposit tersebut. Nilai konduktivitas tertinggi adalah 3,40 S/m yang ditunjukkan oleh komposit dengan ukuran serbuk mesh 150 dan rasio komposisi 80:20, sementara nilai terendah adalah 0,08 S/m yang ditunjukkan oleh komposit dengan ukuran serbuk mesh 100 dan 200 dan rasio komposisi 60:40 seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 67.



Karbon telah menampilkan konduktivitas elektrik yang baik, material berbasis karbon seperti grafit, serat karbon sebagian besar telah digunakan sebagai fasa konduktif dalam material komposit [40].

Sifat penting dalam komposit konduktif secara elektrik adalah konduktivitas elektrik, yang bergantung terutama pada fraksi volume serbuk, dan kandungan minimum dari serbuk karbon, yang serbuk karbon tersebut membentuk jaringan kerja yang bersambung, yang menentukan komposit karbon menjadi konduktif secara elektrik. Faktor-faktor penentu adalah: konduktivitas dari serbuk, fraksi volume dan karakteristik serbuk, seperti: ukuran, bentuk, luas permukaan, distribusi dan orientasi dari serbuk pengisi. Konduktivitas elektrik ditentukan pada kemungkinan kontak antar serbuk di dalam matriks polimer [21]. Ketika serbuk konduktif terisolasi dalam polimer isolasi, konduktivitas komposit berubah hanya sedikit. Ketika serbuk konduktif saling mendekat, elektron dapat menembus celah tipis ( $<10$  nm) antara serbuk [25]. Ketika serat konduktif yang tidak simetris digunakan, hal ini bisa diharapkan bahwa ambang batas fraksi volume dan konduktivitas komposit akan dicapai dalam segala arah. Metode fabrikasi dan kondisi pembuatan komposit memainkan peranan penting dalam konduktivitas karena ia mempengaruhi penyebaran, orientasi dan jarak antar serbuk di dalam matriks polimer [21].

Adesif konduktif secara elektrik menunjukkan dua fungsi utama, perekat konduktif membentuk sambungan-sambungan dengan kekuatan yang cukup sehingga perekat tersebut dapat merekatkan dua permukaan, dan interkoneksi elektrik terbentuk antara dua permukaan yang terikat. Karbon hitam, serat karbon, *carbon nanotube*, demikian juga grafit, banyak digunakan sebagai penguat matriks polimer karena sifat elektrik dan termalnya yang baik. Komposit konduktif dapat digunakan untuk menggantikan metal ketika sifat ringannya, ketangguhannya dan ketahannya terhadap korosi menjadi syarat [21] [25].

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

pemanasan, oksidasi permukaan rekatan dan serbuk pengisi, dan debragasi oleh ultra violet atau gas-gas korosif [25].

Konduktivitas elektrik penelitian ini menunjukkan perbedaan yang signifikan. Komposit karbon-karbon dengan kandungan serbuk karbon cangkang kelapa yang semakin tinggi menghasilkan konduktivitas elektrik yang semakin rendah. Sebaliknya komposit karbon-karbon dengan kandungan serbuk karbon batubara semakin tinggi menghasilkan konduktivitas elektrik yang semakin tinggi. Hal ini bisa terjadi karena komposit dengan bahan serbuk karbon batubara mempunyai densitas yang lebih tinggi dibandingkan komposit dengan kandungan serbuk cangkang kelapa. Densitas tinggi menunjukkan hasil sebaran dan orientasi serbuk yang baik dan porositas yang rendah menunjukkan jumlah rongga yang memutus hubungan antar serbuk menjadi semakin sedikit, sehingga hal ini memungkinkan aliran konduktivitas elektrik yang semakin baik.

Sebagai perbandingan, Kalaitzidou melalui komposit polypropylene yang diperkuat karbon menghasilkan konduktivitas elektrik  $1.E-12$  atau  $0,000000000001$  sampai  $1.E-02$  atau  $0,01$  S/cm, [21]. Sementara Tangboriboon [24] dengan komposit serbuk alumina yang disisipkan dalam matriks karet alam menghasilkan konduktivitas elektrik  $6.517 \times 10^{-9}$  sampai  $1.502 \times 10^{-7}(\Omega.m)^{-1}$ . Serat komposit pulp/PANI *polyaniline* dibentuk menjadi lembaran yang konduktif. Nilai konduktivitas yang dihasilkan maksimum dari penelitian ini adalah  $1,9 \times 10^{-2}$  S/cm, [23]. Adhesif berbasis epoxy menghasilkan konduktivitas elektrik  $2,00E-03$  sampai  $1,67E-04$  S/cm, [25]. Pengukuran ketahanan elektrik komposit matriks polimer berserat karbon menghasilkan konduktivitas elektrik dari  $0.001$  sampai  $20 (\Omega \text{ mm})^{-1}$ , [26]. Penelitian konduktivitas elektrik dari serbuk bersifat karbon menghasilkan konduktivitas elektrik dari  $0.1$  sampai  $400$  S/cm. Nilai konduktivitas elektrik dipengaruhi oleh tingkat densitas komposit karbon-karbon [27]. Corb [40] dengan komposit berbasis karbon menghasilkan tahanan elektrik antara  $5,8$  dan  $7,3 \Omega$ , untuk ketebalan komposit  $1 \text{ mm}$  dan luas penghantar  $81 \text{ mm}^2$ .

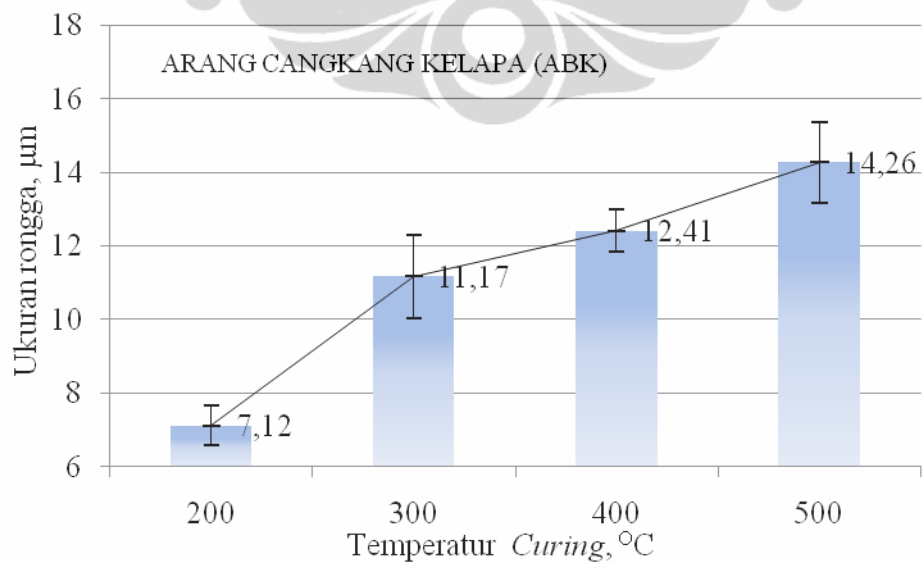
#### 4. 4. Analisis *scanning electron microscopic*

Analisis *scanning electron microscopic* dilakukan terhadap semua tahapan penelitian, untuk melihat struktur mikro, rongga dan ukurannya yang terjadi di dalam komposit.

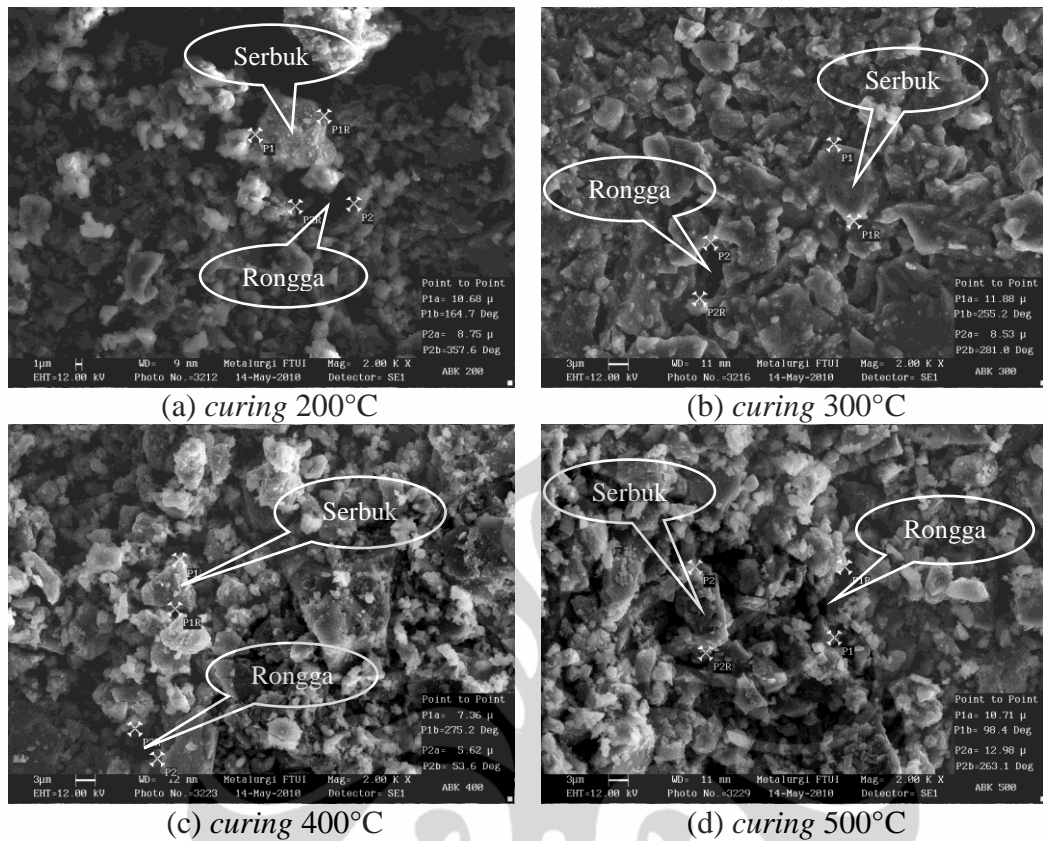
##### 4. 4. 1. Analisis SEM penelitian pendahuluan.

Penelitian pendahuluan memanfaatkan karbon hasil karbonisasi limbah cangkang kelapa, limbah batubara, semikokas yang dipanaskan ulang pada 1000°C dan grafit produksi pabrik sebagai serbuk karbon penguat dalam material rekayasa komposit karbon-karbon dengan matriks karbon dari *coal tar pitch*.

Kecenderungan pembesaran ukuran rongga komposit karbon-karbon dengan bahan penguat ABK ditunjukkan Gambar 4. 68. Pembesaran ukuran rongga dibentuk oleh proses penguapan hidrokarbon ketika proses *curing* pra bentuk komposit. Ukuran rongga dengan nilai rerata adalah dari 7,12 sampai 14,26  $\mu\text{m}$ . Jika dicermati angka tiap titik juga menunjukkan bahwa ukuran rongga-rongga dari komposit tidak seragam. Akibat penguapan hidrokarbon dari matriks perekat *coal tar pitch* dan kemudian juga mengendapnya sisa karbon dari penguapan akan meninggalkan jejak berupa rongga-rongga dalam komposit karbon-karbon.



Gambar 4. 68. Grafik hubungan temperatur *curing* VS ukuran rongga komposit bahan arang cangkang kelapa atau ABK

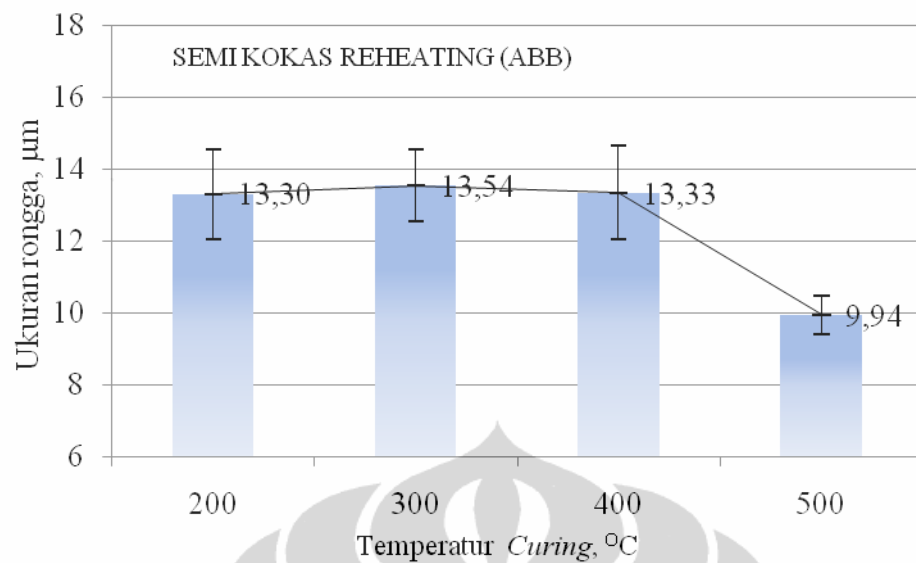


Gambar 4. 69. Topografi hasil uji *scanning electron microscopic* komposit karbon karbon berbahan arang cangkang kelapa atau ABK

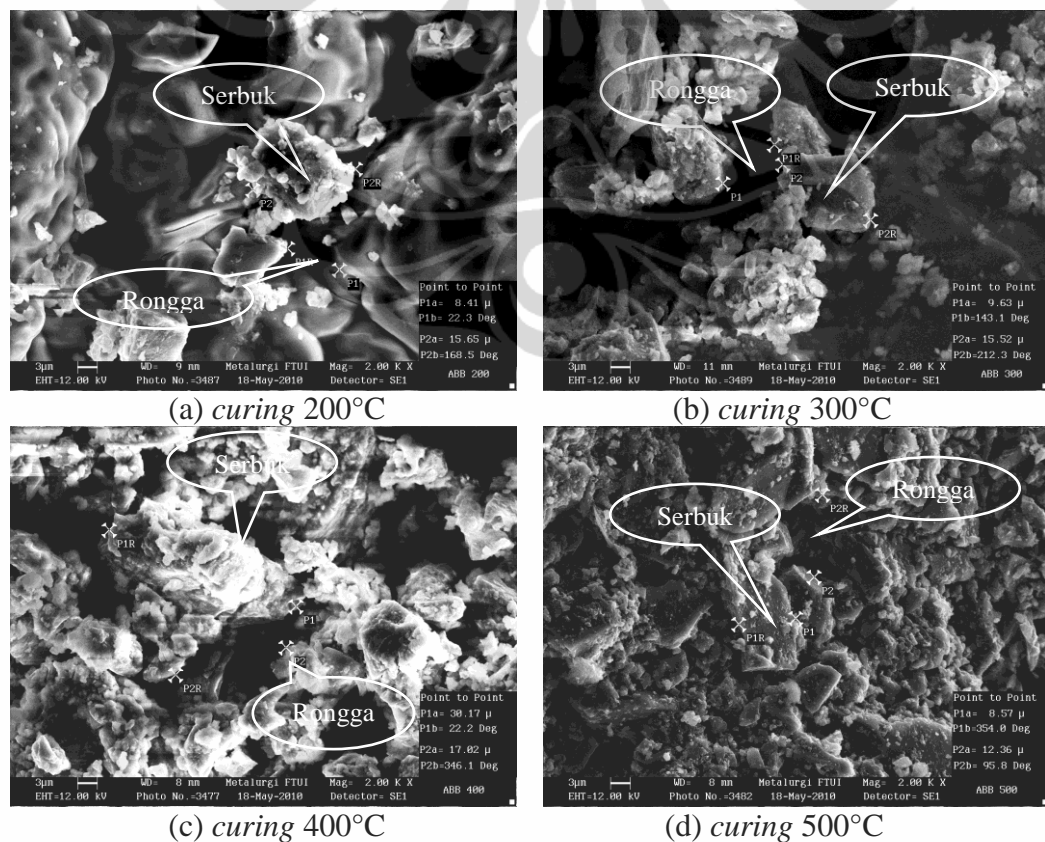
Bentuk topografi struktur mikro dari komposit karbon-karbon dengan bahan arang cangkang kelapa atau ABK ditunjukkan oleh Gambar 4. 69. Foto mikro menunjukkan bentuk serbuk yang tidak beraturan, yang ditandai dengan serbuk kelabu dengan batas pinggir putih adalah serbuk karbon penguat komposit. Sementara rongga-rongga dari komposit ditandai dengan warna hitam gelap dengan batas yang tajam terhadap warna putih yang adalah serbuk penguat.

Ukuran rongga yang nilai reratanya untuk ABB dari 13,30 sampai 9,94  $\mu\text{m}$  ditunjukkan pada Gambar 4. 70. Jika dicermati angka tiap titik juga menunjukkan bahwa ukuran rongga-rongga dari komposit tidak seragam, tetapi bervariasi. Grafik pada gambar ini menunjukkan pembentukan rongga, pada derajat 200 sampai sekitar 350°C ukuran rongga cenderung konstan, selanjutnya menurun secara perlahan.

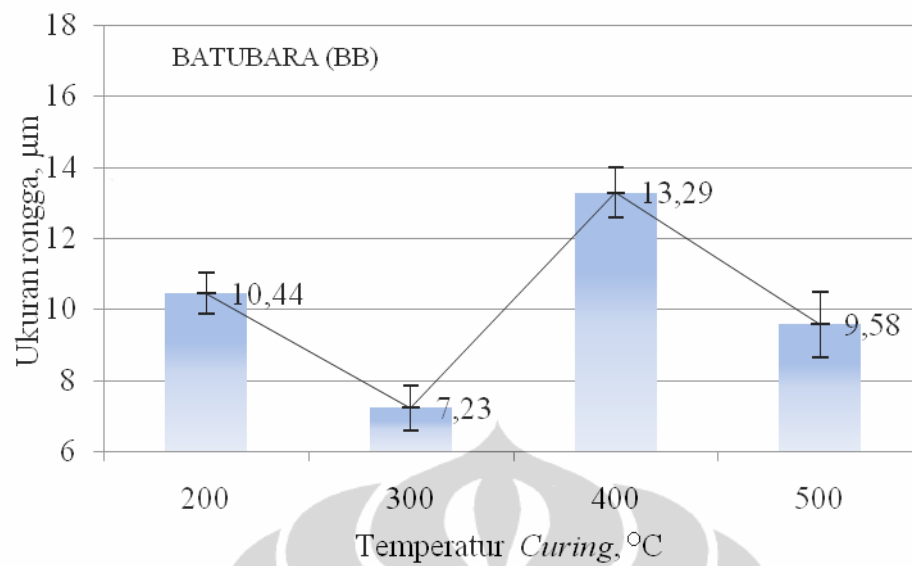
Bentuk topografi struktur mikro dari komposit karbon-karbon dengan bahan arang batubara atau ABB ditunjukkan dalam Gambar 4. 71. Dalam foto mikro menunjukkan bentuk serbuk-serbuk yang tidak beraturan,



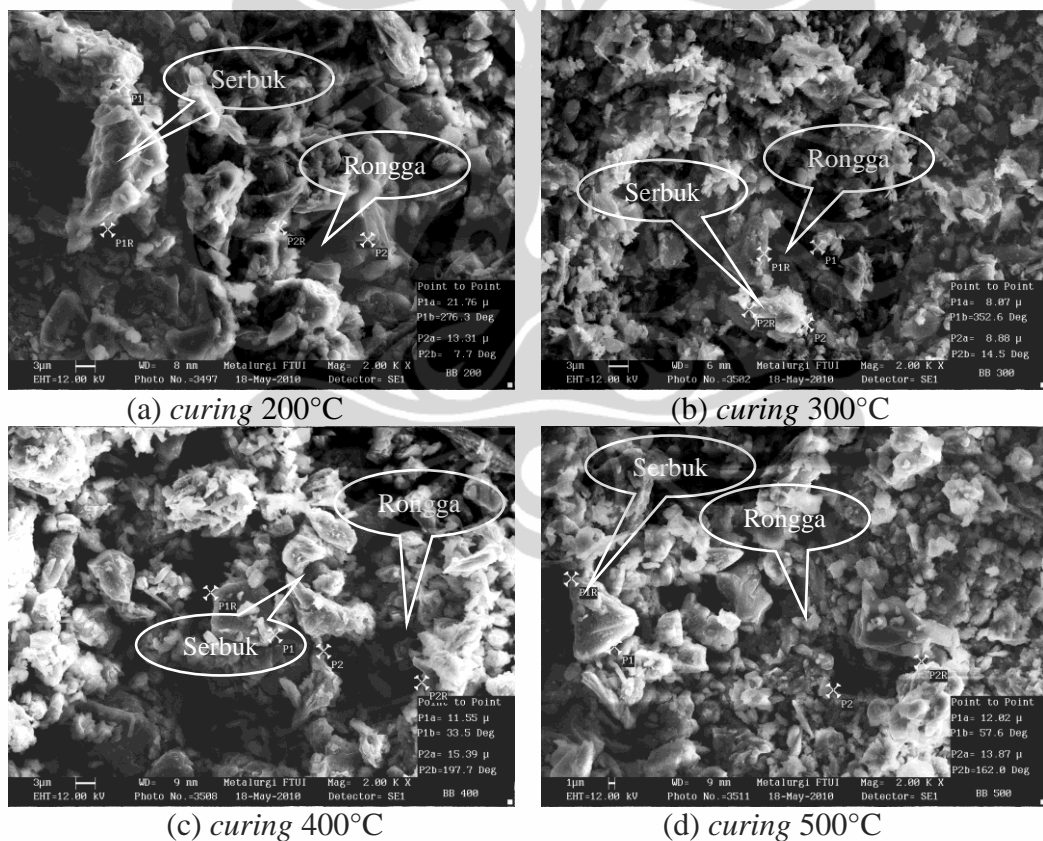
Gambar 4. 70. Grafik hubungan temperatur *curing* VS ukuran rongga, komposit bahan semikokas reheating atau ABB 1000 yang ditandai dengan serbuk kelabu dengan batas pinggiran putih adalah serbuk karbon penguat komposit. Sementara rongga-rongga dari komposit ditandai dengan warna hitam gelap dengan batas yang tajam terhadap warna putih yang adalah serbuk penguat.



Gambar 4. 71. Topografi hasil uji *scanning electron microscopic* komposit karbon-karbon berbahan semikokas reheating atau ABB 1000



Gambar 4. 72. Grafik hubungan temperatur *curing* VS ukuran rongga, komposit bahan serbuk batubara atau BB



Gambar 4. 73. Topografi hasil uji *scanning electron microscopic* komposit karbon-karbon berbahan serbuk batubara atau BB

Grafik kecenderungan pembesaran ukuran rongga pori komposit karbon-karbon dengan bahan penguat serbuk batubara atau BB ditunjukkan pada Gambar 4. 72. Ukuran rongga yang nilai reratanya untuk BB dari 7,23 sampai 13,29  $\mu\text{m}$ .

Jika dicermati angka tiap titik juga menunjukkan bahwa ukuran rongga-rongga dari komposit tidak seragam. Pembesaran ukuran rongga dibentuk oleh proses penguapan hidrokarbon ketika proses *curing* komposit.

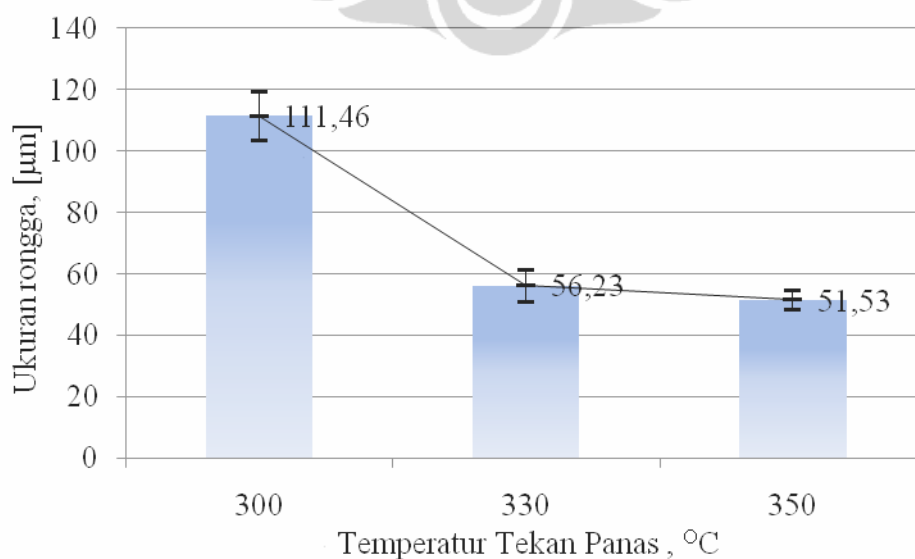
Bentuk topografi struktur mikro dari komposit karbon-karbon dengan bahan serbuk batubara atau BB ditunjukkan oleh Gambar 4. 73.

Foto mikro ini menunjukkan bentuk serbuk yang tidak beraturan, yang ditandai dengan serbuk kelabu dengan batas pinggiran putih adalah serbuk karbon penguat komposit. Sementara rongga-rongga dari komposit ditandai dengan warna hitam gelap dengan batas yang tajam terhadap warna putih yang adalah serbuk penguat.

#### 4. 4. 2. Analisis SEM komposit penelitian tahap dua

Penelitian ini adalah tentang komposit karbon berbasis bahan karbon serbuk dengan ukuran  $\geq 80$  mesh dari limbah serbuk batubara dalam matriks *coal tar pitch* melalui proses tekan panas dengan pemanasan temperatur bervariasi dari 300; 330; 350°C.

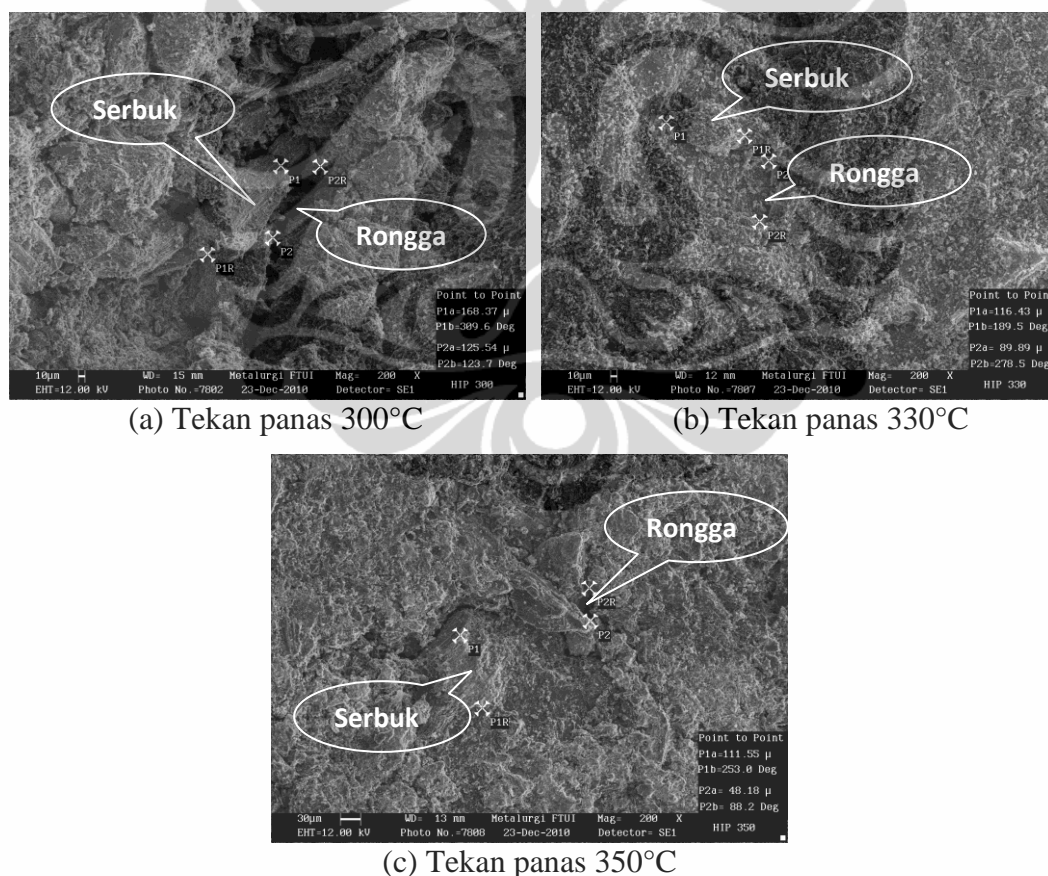
Pengujian *Scanning electron microscopic* dilakukan pengukuran rongga dalam komposit. Rongga dalam komposit adalah pembentuk porositas yang memperlemah kekuatan komposit. Ukuran rongga yang semakin mengecil ketika temperatur proses tekan panas meningkat, hal ini menunjukkan saling keterkaitan antara porositas dan ukuran rongga.



Gambar 4. 74. Grafik hubungan temperatur tekan panas VS ukuran rongga

Ukuran rongga terbesar dihasilkan komposit karbon-karbon dengan temperature proses 300°C, yaitu 111,46 µm, seperti ditunjukkan dalam Gambar 4. 74. Uji *scanning electron microscopic* secara kualitatif cukup memberikan gambaran sebenarnya tentang kondisi ikatan antar serbuk dalam komposit karbon tersebut, meskipun tidak bisa mewakili seluruh volume dari komposit karbon-karbon.

Topografi struktur mikro dari komposit karbon untuk tekan panas 300°C, fitur gelap menunjukkan pori yang dikandung oleh komposit karbon, sedang fitur abu-abu menunjukkan serbuk dari komposit karbon seperti ditunjukkan Gambar 4. 75 a. Topografi struktur mikro dari komposit karbon untuk tekan panas 330°C ditunjukkan oleh Gambar 4. 75 b, fitur gelap menunjukkan rongga yang dikandung oleh komposit karbon, sedang fitur abu-abu menunjukkan serbuk.



Gambar 4. 75. Topografi komposit karbon tekan panas

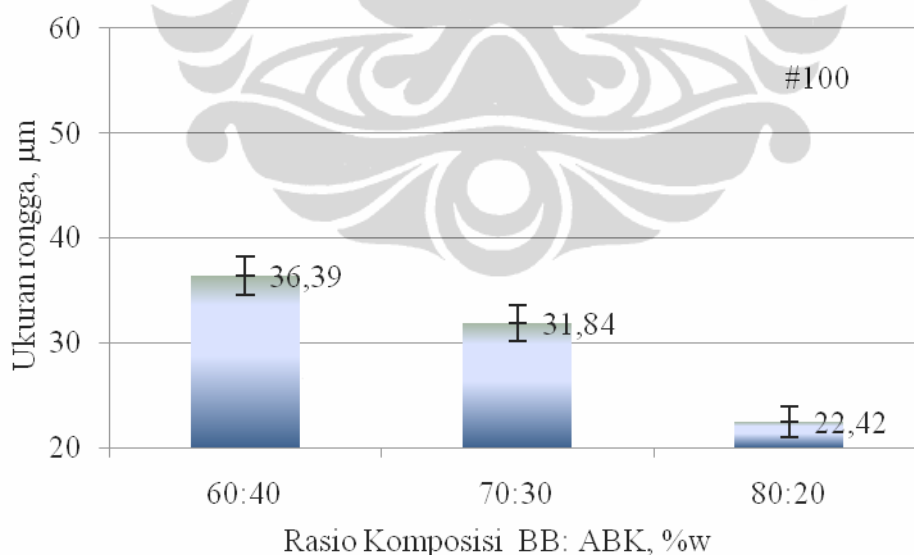


Topografi struktur mikro dari komposit karbon untuk tekan panas 350°C ditunjukkan dalam Gambar 4. 75c, fitur gelap menunjukkan rongga yang dikandung oleh komposit karbon-karbon, sedang fitur abu-abu menunjukkan serbuk dari komposit karbon-karbon.

#### 4. 4. 3. Analisis SEM penelitian tahap tiga.

Penelitian tahap tiga adalah pembuatan komposit berbasis bahan karbon dari serbuk limbah batubara dan serbuk karbon limbah cangkang kelapa sebagai bahan penguat dalam matriks *coal tar pitch*, yang ditinjau dari sudut variasi ukuran karbon serbuk penguat dan rasio komposisi serbuk karbon batubara dan karbon cangkang kelapa.

Uji *Scanning electron microscopic* untuk mengetahui secara visual kualitatif kondisi topografi ikatan antar serbuk oleh matriks dari komposit karbon-karbon. Melalui cara ini dengan perbesaran tertentu dapat diketahui bentuk dan ukuran rongga-rongga yang terjadi dalam komposit. Ukuran rongga yang terdata dalam grafik tidak bisa dikatakan mewakili keseluruhan volume komposit karbon-karbon yang diteliti.

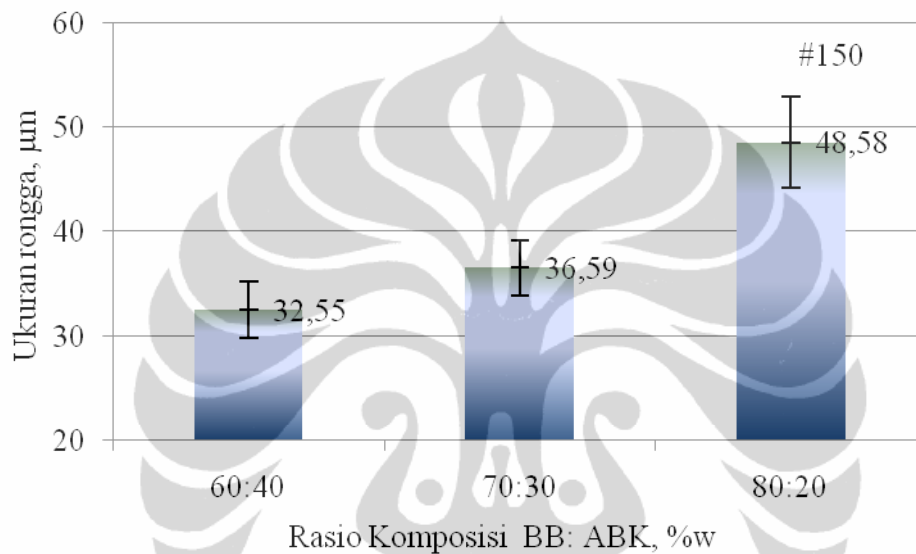


Gambar 4. 76. Grafik hubungan rasio komposisi vs ukuran rongga, mesh 100.

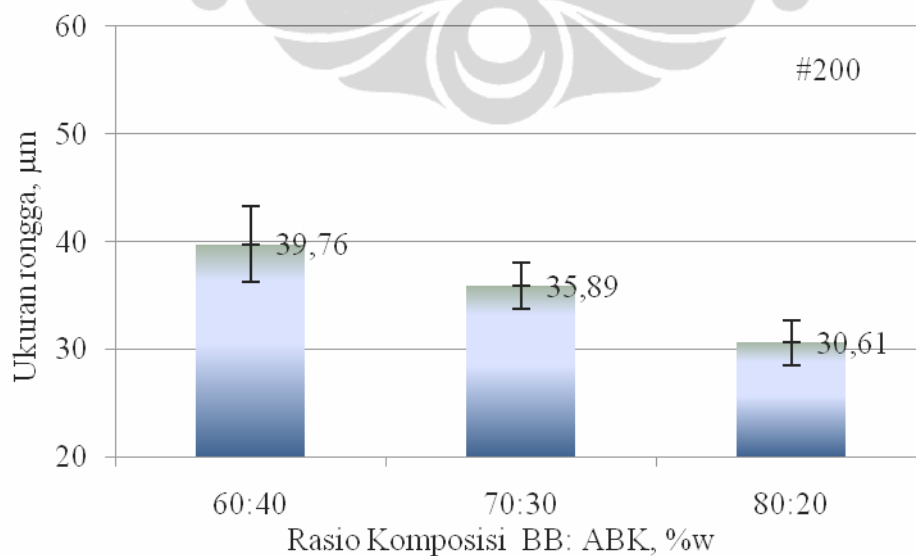
Hubungan rasio komposisi BB:ABK terhadap ukuran rongga yang terbentuk di dalam komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk mesh 100 ditunjukkan Gambar 4. 76. Komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi

60:40 menciptakan rongga terbesar dengan ukuran 36,39  $\mu\text{m}$ . Selanjutnya komposit dengan komposisi 80:20 menciptakan rongga dengan ukuran 22,42  $\mu\text{m}$ .

Komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 60:40 menciptakan rongga terbesar dengan ukuran 32,55  $\mu\text{m}$ . Selanjutnya komposit dengan komposisi 80:20 menciptakan rongga dengan ukuran 48,58  $\mu\text{m}$ , seperti ditunjukkan Gambar 4. 77.



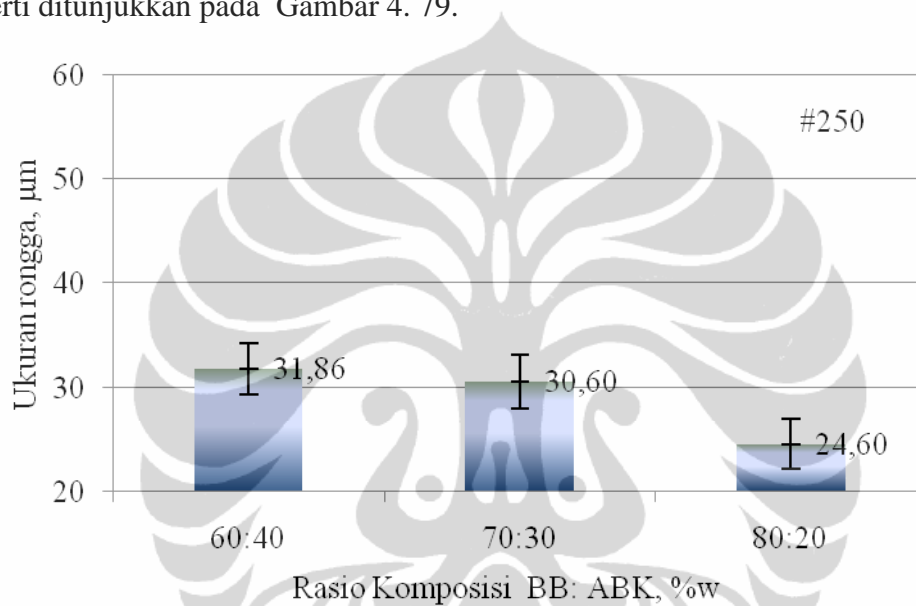
Gambar 4. 77. Grafik hubungan rasio komposisi vs ukuran rongga, mesh 150.



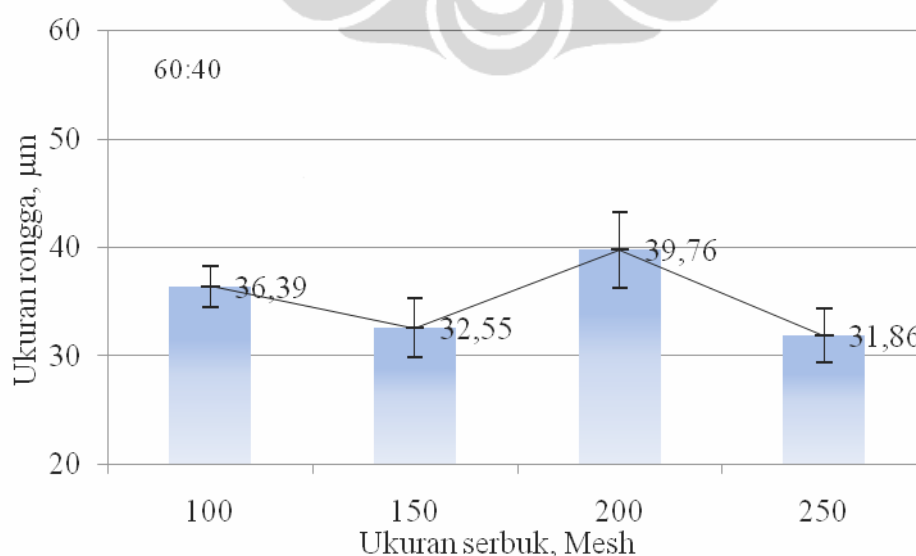
Gambar 4. 78. Grafik hubungan rasio komposisi vs ukuran rongga, mesh 200.

Ukuran rongga maksimum 39,76  $\mu\text{m}$  yang terbentuk oleh komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 60:40 dan ukuran serbuk mesh 200. Nilai rongga terkecil adalah 30,61  $\mu\text{m}$  terbentuk dalam komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 80:20, seperti ditunjukkan oleh Gambar 4. 78.

Komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk mesh 250, pada rasio komposisi 60:40 menciptakan rongga dalam komposit dengan ukuran 31,86  $\mu\text{m}$  dan pada rasio komposisi 80:20 menciptakan rongga dengan ukuran 24,60  $\mu\text{m}$ , seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 79.

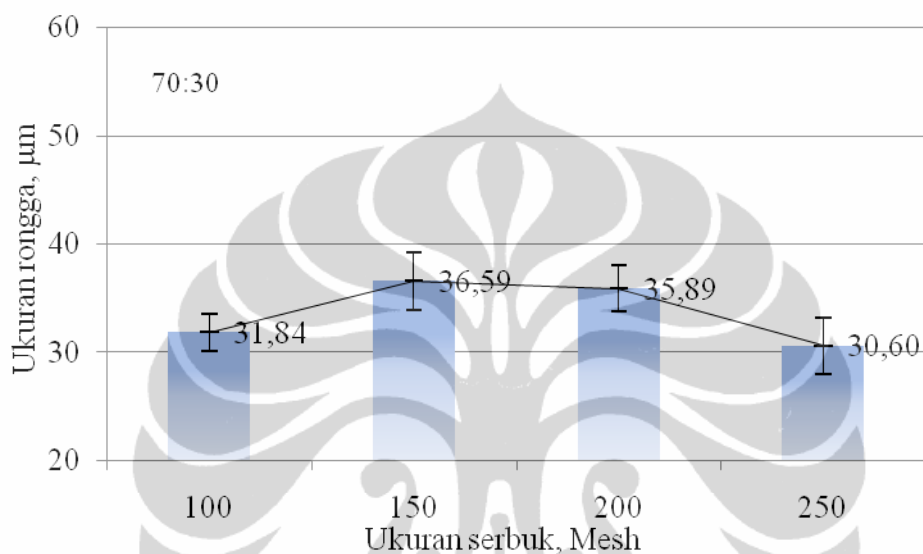


Gambar 4. 79. Grafik hubungan rasio komposisi vs ukuran rongga, mesh 250.



Gambar 4. 80. Grafik hubungan ukuran serbuk vs ukuran rongga, rasio 60:40.

Ukuran serbuk bahan komposit karbon-karbon yang semakin kecil berkontribusi terhadap mengecilnya rongga dalam komposit tersebut. Komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 60:40 dan ukuran serbuk mesh 100 menciptakan rongga dengan ukuran 36,39  $\mu\text{m}$  dan pada ukuran serbuk mesh 250 menciptakan rongga dengan ukuran 31,86  $\mu\text{m}$  seperti ditunjukkan Gambar 4. 80.

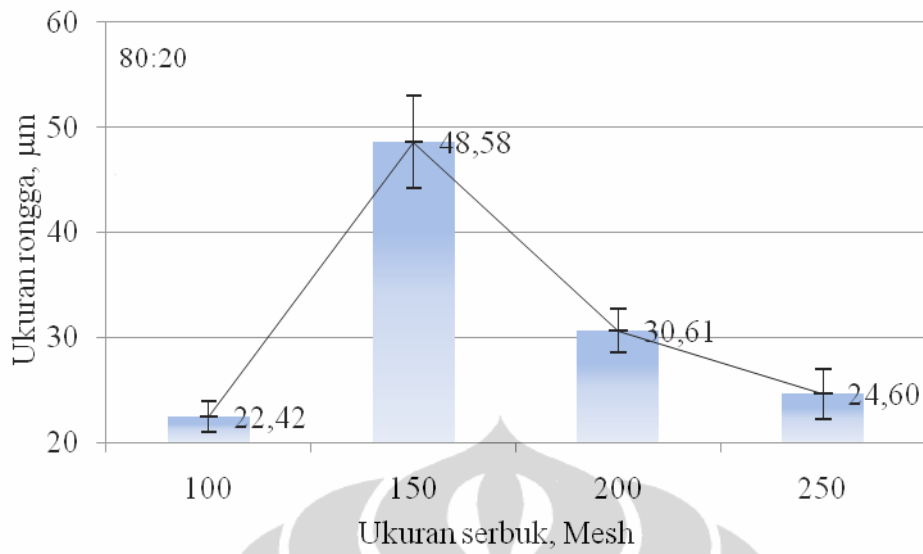


Gambar 4. 81. Grafik hubungan ukuran serbuk vs ukuran rongga, rasio 70:30.

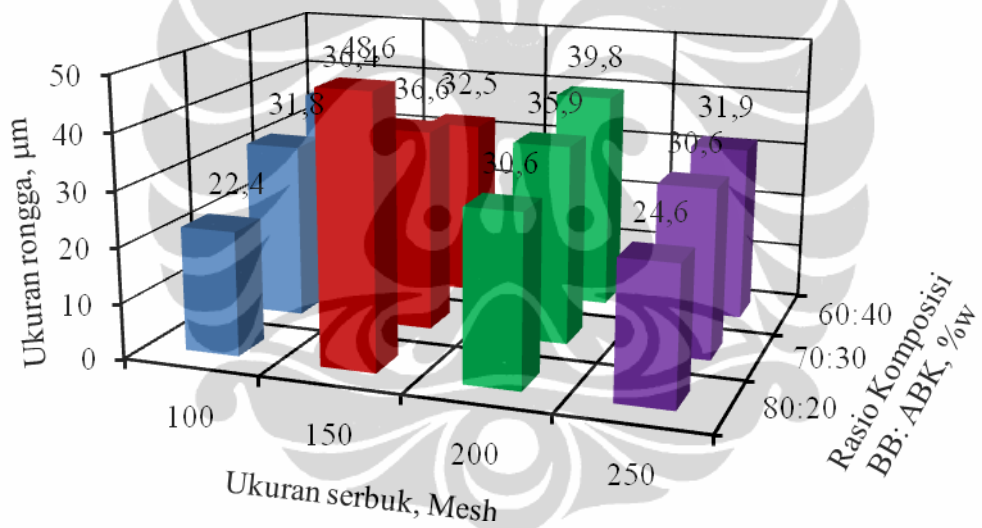
Komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 70:30 mengandung rongga semakin mengecil ketika ukuran serbuk karbon semakin kecil. Ukuran serbuk karbon mesh 100 menciptakan rongga dalam komposit dengan ukuran 31,84  $\mu\text{m}$ , sementara itu pada ukuran serbuk mesh 250 menciptakan rongga dalam komposit dengan ukuran 30,60  $\mu\text{m}$ , hal ini ditunjukkan Gambar 4. 81.

Ukuran rongga 22,42  $\mu\text{m}$  terbentuk dalam komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 80:20 pada ukuran serbuk karbon mesh 100. Sementara itu pada ukuran serbuk karbon mesh 250 komposit tersebut mengandung rongga dengan ukuran 24,60  $\mu\text{m}$ , hal ini ditunjukkan pada Gambar 4. 82.

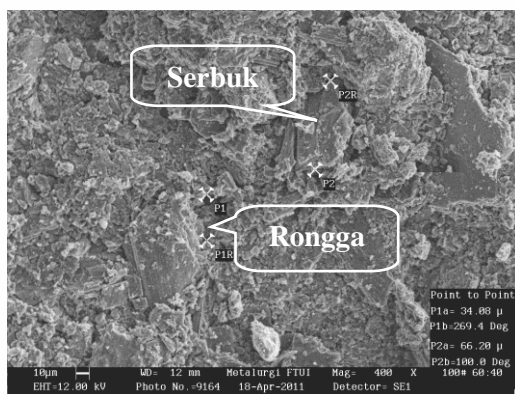
Ukuran rongga paling besar adalah 48,6  $\mu\text{m}$ , rongga ini terbentuk dalam komposit karbon-karbon pada ukuran serbuk mesh 150 dengan rasio komposisi 80:20. Ukuran rongga paling kecil adalah 22,4  $\mu\text{m}$  yang terbentuk dalam komposit karbon-karbon pada ukuran serbuk mesh 100 dengan rasio komposisi 80:20. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 4. 83.



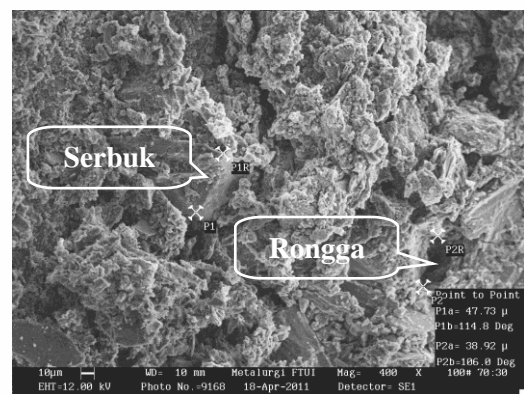
Gambar 4. 82. Grafik hubungan ukuran serbuk vs ukuran rongga, rasio 80:20.



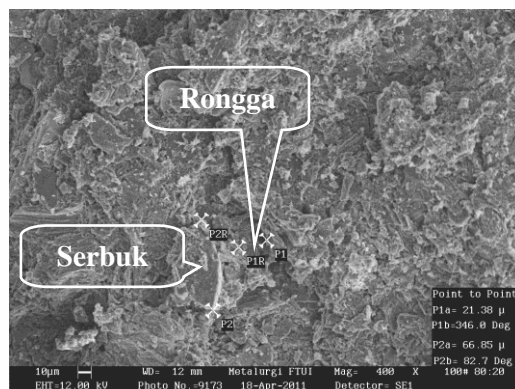
Gambar 4. 83. Perbandingan Grafik hubungan ukuran mesh serbuk vs ukuran rongga vs rasio komposisi



(a) rasio komposisi 60:40



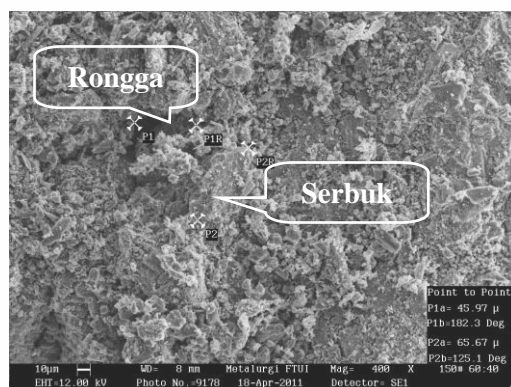
(b) rasio komposisi 70:30



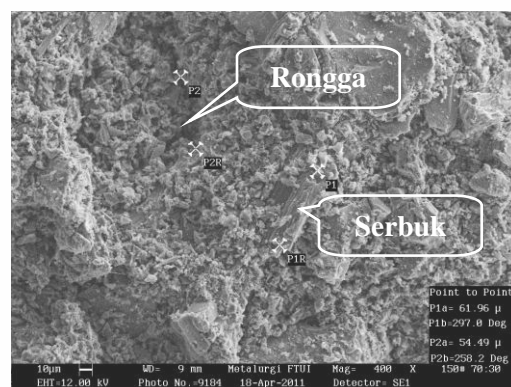
(c) rasio komposisi 80:20

Gambar 4. 84. Topografi komposit karbon-karbon mesh100

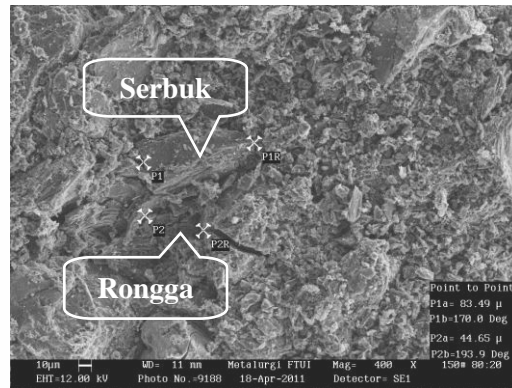
Kondisi nyata ikatan serbuk dengan matriks untuk komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 60:40 dan ukuran serbuk karbon mesh 100 ditunjukkan Gambar 4. 84a, dalam kondisi seperti gambar tersebut tidak dapat dibedakan antara serbuk karbon batubara dan serbuk karbon cangkang kelapa serta matriks *coal tar pitch*. Gambar tersebut juga menunjukkan ukuran rongga 34,08  $\mu\text{m}$ . Kondisi nyata ikatan serbuk dengan matriks untuk komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 70:30 dan ukuran serbuk karbon mesh 100 ditunjukkan Gambar 4. 84b, dari gambar tersebut tidak dapat dibedakan antara serbuk karbon batubara dan serbuk karbon cangkang kelapa serta matriks *coal tar pitch*. Gambar tersebut menunjukkan ukuran rongga 38,92  $\mu\text{m}$ . Kondisi nyata ikatan serbuk dengan matriks untuk komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 80:20 dan ukuran serbuk karbon mesh 100 ditunjukkan Gambar 4. 84c. Gambar tersebut menunjukkan ukuran rongga 21,38  $\mu\text{m}$ . Topografi dari gambar ini tidak dapat membedakan serbuk karbon batubara dan serbuk karbon cangkang kelapa, juga tidak dapat menunjukkan karbon matriks *coal tar pitch*.



(a) rasio komposisi 60:40



(b) rasio komposisi 70:30

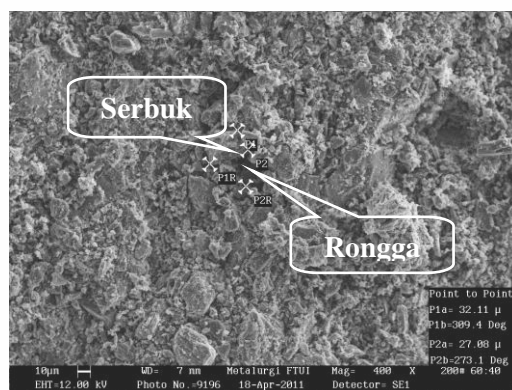


(c) rasio komposisi 80:20

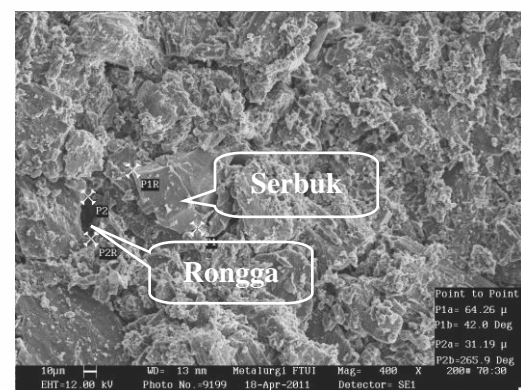
Gambar 4. 85. Topografi komposit karbon-karbon mesh 150

Ukuran rongga 32,23  $\mu\text{m}$  dalam topografi ikatan serbuk karbon dengan matriks di dalam komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 60:40 dan ukuran serbuk karbon mesh 150 ditunjukkan Gambar 4. 85a. Ukuran rongga 54,49  $\mu\text{m}$  dari komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 70:30 dan ukuran serbuk karbon mesh 150 ditunjukkan pada Gambar 4. 85b. Ukuran rongga 44,65  $\mu\text{m}$  dalam topografi komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 80:20 dan serbuk mesh 150 ditunjukkan pada Gambar 4. 85c.

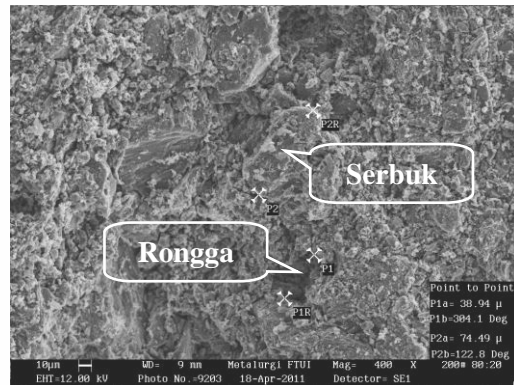
Ukuran rongga 27,08  $\mu\text{m}$  dalam topografi komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 60:40 dan ukuran serbuk karbon mesh 200 ditunjukkan Gambar 4. 86a. Ukuran rongga 31,19  $\mu\text{m}$  terjadi dalam komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 70:30 dan ukuran serbuk karbon mesh 200, ditunjukkan pada Gambar 4. 86b. Ukuran rongga 38,94  $\mu\text{m}$  dalam topografi komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 80:20 dan ukuran serbuk mesh 200 ditunjukkan dalam Gambar 4. 86c.



(a) rasio komposisi 60:40



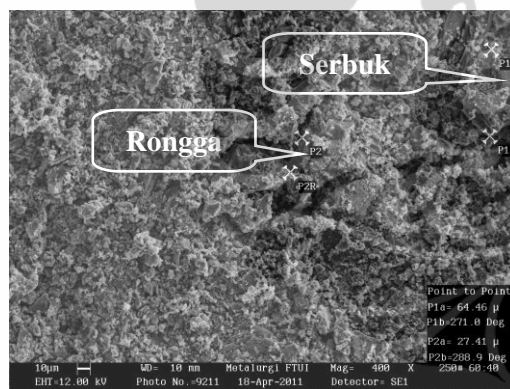
(b) rasio komposisi 70:30



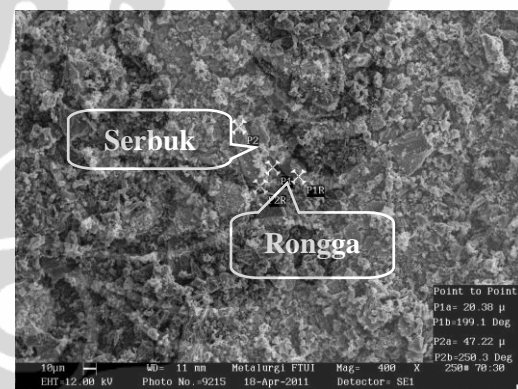
(c) rasio komposisi 80:20

Gambar 4. 86. Topografi komposit karbon-karbon mesh 200

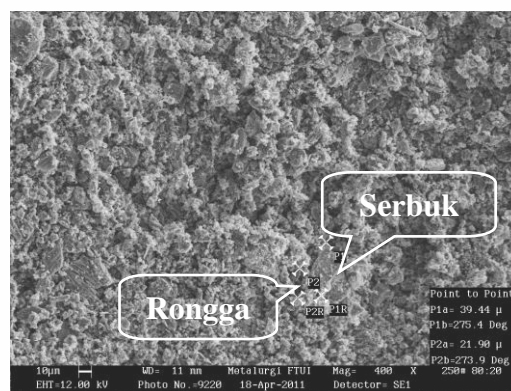
Ukuran rongga 27,41  $\mu\text{m}$  dalam topografi komposit karbon-karbon yang rasio komposisi 60:40 dengan ukuran mesh 250 ditunjukkan pada Gambar 4. 87a. Ukuran rongga 20,38  $\mu\text{m}$  yang dihasilkan komposit dengan rasio komposisi 70:30 dan ukuran serbuk karbon mesh 250, ditunjukkan pada Gambar 4. 87b.



(a) rasio komposisi 60:40



(b) rasio komposisi 70:30



(c) rasio komposisi 80:20

Gambar 4. 87. Topografi komposit karbon-karbon mesh 250



Ukuran rongga 21,90  $\mu\text{m}$  dalam topografi komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi 80:20 dan ukuran mesh 250 ditunjukkan dalam Gambar 4. 87c.

Proses pembentukan rongga-rongga porositas juga diakibatkan oleh proses densifikasi dari komposit yang bersangkutan.

Selama karbonisasi senyawa gas pitch terlepas dan membentuk rongga pori. Ketika tekanan pencetakan semakin tinggi dan porositas semakin rendah, dan senyawa gas akan menemukan jalan keluarnya sendiri, yang menghasilkan tegangan dan pemuaian dalam material komposit [4].

Rongga-rongga yang ditunjukkan dalam uji SEM penelitian ini merupakan akibat proses yang sama yaitu pembentukan rongga seperti jebakan udara, moisture yang terserap dan pertumbuhan rongga pada tekanan rendah. Ketika komposit diproses curing, produk gas dapat terjebak sebagai rongga [9]. Proses karbonisasi pirolisis komposit karbon-karbon berbasis *coal tar pitch* mengakibatkan pengembangan matriks *pitch* karena pembentukan retakan internal atau rongga-rongga yang tidak keluar di permukaan [10].

Selama proses densifikasi, tegangan akan terbentuk dalam komposit karena evolusi hidrokarbon baik dari matriks ataupun dari serbuk karbon, yang menyebabkan susutan volume dan kehilangan berat dan selanjutnya bisa terjadi pembentukan rongga-rongga porositas [47].

Ikatan yang kuat antara serbuk dan matriks mencegah pembentukan retakan dan rongga. Oleh karena itu selama pirolisis, matriks menyusut menjauh dari permukaan serat, yang menyebabkan pembentukan rongga-rongga [52].

Pembentukan rongga-rongga adalah akibat karbonisasi matriks pitch. Pelemahan ikatan antarmuka akibat karbonisasi juga mengakibatkan penghantaran kekuatan serbuk yang jelek [53].

Rongga-rongga terjadi pada posisi ikatan antarmuka. Rongga-rongga ini kemungkinan timbul dari jebakan gas selama pencetakan dan evolusi gas selama proses konsolidasi karbonisasi. Kantong-kantong matriks terletak di antarmuka serbuk/pitch dalam komposit. Dalam susunan serbuk, penyusutan matriks cenderung menarik serat lebih dekat. Jika gerakan demikian tertahan misalnya oleh faktor geometric, selanjutnya matriks retak atau pelepasan ikatan antarmuka serbuk – matriks terjadi, yang meningkatkan morfologi jaringan rongga yang

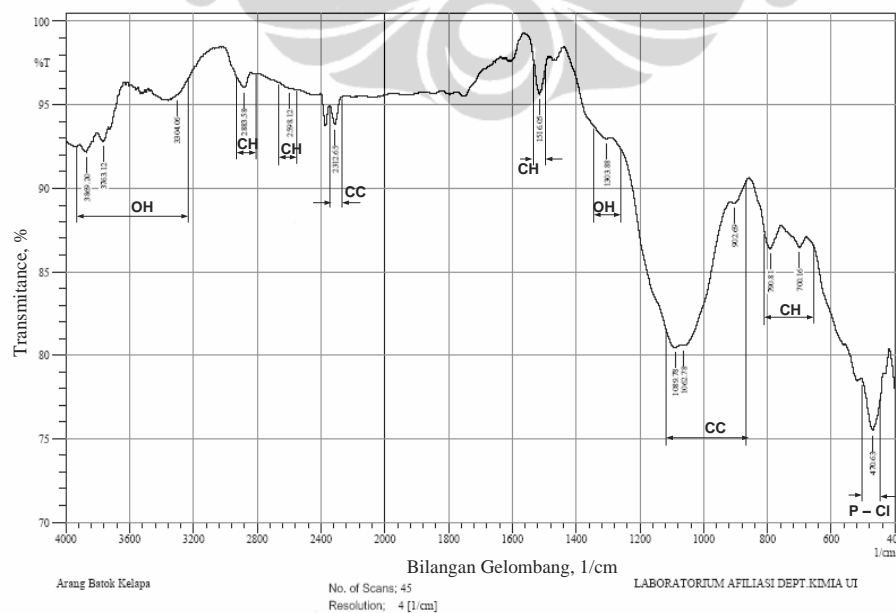
berbeda [56].

Rongga-rongga yang terbentuk dalam komposit karbon-karbon dalam penelitian ini juga menunjukkan retakan-retakan akibat tarik-menarik yang terjadi pada ikatan antarmuka antara serbuk karbon dan matriks coal tar pitch. Seperti ditunjukkan pada gambar foto mikro hasil uji SEM.

#### 4. 5. Analisis uji FTIR

FTIR mempunyai kepanjangan *Fourier Transform InfraRed*. Dalam *infrared spectroscopy*, radiasi dilewatkan melalui sampel. Beberapa radiasi *infrared* diserap oleh sampel dan beberapa radiasi ditransmisikan (*transmitted*). Spektra yang dihasilkan menggambarkan transmisi dan absorpsi molekular, yang menciptakan sidik jari (jejak) molekular dari sampel. Seperti sidik jari, tidak ada dua struktur molekul yang unik menghasilkan spektra *infrared* yang sama. *Infrared spectroscopy* dapat menghasilkan identifikasi positif (analisis kualitatif dari tiap jenis material yang berbeda). Spektra yang dihasilkan umumnya rumit, mempunyai pita-pita serapan yang sangat sempit dan khas untuk tiap senyawa sehingga penggunaannya terutama untuk identifikasi senyawa organik (kualitatif), untuk tujuan kuantitatif, analisis ini tidak banyak digunakan.

Energi vibrasi spektra *infrared* yang diabsorpsi oleh ikatan molekul yang terbentuk dalam arang cangkang kelapa ditunjukkan Gambar 4. 88.



Gambar 4. 88. Spektra *infrared* arang cangkang kelapa

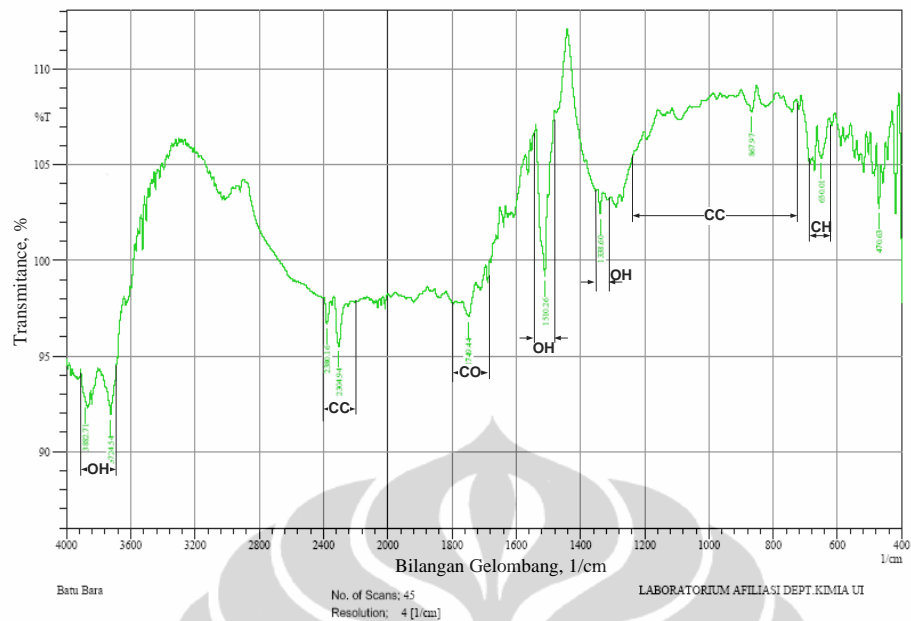
Bilangan gelombang sekitar 2883,58/cm dan 2598,12/cm menunjukkan ikatan molekul CH, energi vibrasi yang diabsorpsi sebesar 4%. Bilangan gelombang sekitar 2312,65/cm menunjukkan ikatan molekul CC, dengan energi vibrasi yang diabsorpsi sebesar 6%. Bilangan gelombang sekitar 1516,05/cm menunjukkan ikatan molekul CH, energi vibrasi yang diabsorpsi sebesar 4%. Bilangan gelombang sekitar 1089,78/cm dan 1062,78/cm menunjukkan ikatan molekul CC, dengan energi vibrasi yang diabsorpsi sebesar 19%.

Ikatan molekul yang terjadi dan besar energi vibrasi yang diabsorpsi oleh ikatan molekul di dalam arang cangkang kelapa ditunjukkan dalam Tabel 4. 5.

Tabel 4. 5: Bilangan gelombang spektra *infrared* cangkang kelapa

No	Bilangan gelombang, 1/cm	Ikatan molekul	Energi yang diabsorpsi, %
1	3869,20	OH	8
2	3763,12	OH	6
3	3304,06	OH	4,5
4	2883,58	CH	4
5	2598,12	CH	4
6	2312,65	CC	6
7	1516,05	CH	4
8	1303,88	OH	7
9	1089,78	CC	19
10	1062,78	CC	19
11	902,69	CC	11
12	790,81	CH	13
13	700,16	CH	13
13	470,63	P-Cl	24

Energi vibrasi spektra *infrared* yang diabsorpsi oleh ikatan molekul yang terbentuk dalam batubara ditunjukkan Gambar 4. 89. Bilangan gelombang sekitar 3882,71/cm dan 3724,54/cm menunjukkan ikatan molekul OH, energi spektra *infrared* yang diabsorpsi sebesar 8%. Bilangan gelombang sekitar 2380,16/cm dan 2304,94/cm menunjukkan ikatan molekul CC, energi spektra *infrared* yang diabsorpsi sebesar 4%. Bilangan gelombang sekitar 1749,44/cm menunjukkan ikatan CO, energi spektra *infrared* yang diabsorpsi sebesar 3%. Bilangan gelombang 1510,26/cm menunjukkan ikatan OH, spektra *infrared* yang diabsorpsi sebesar 2%.



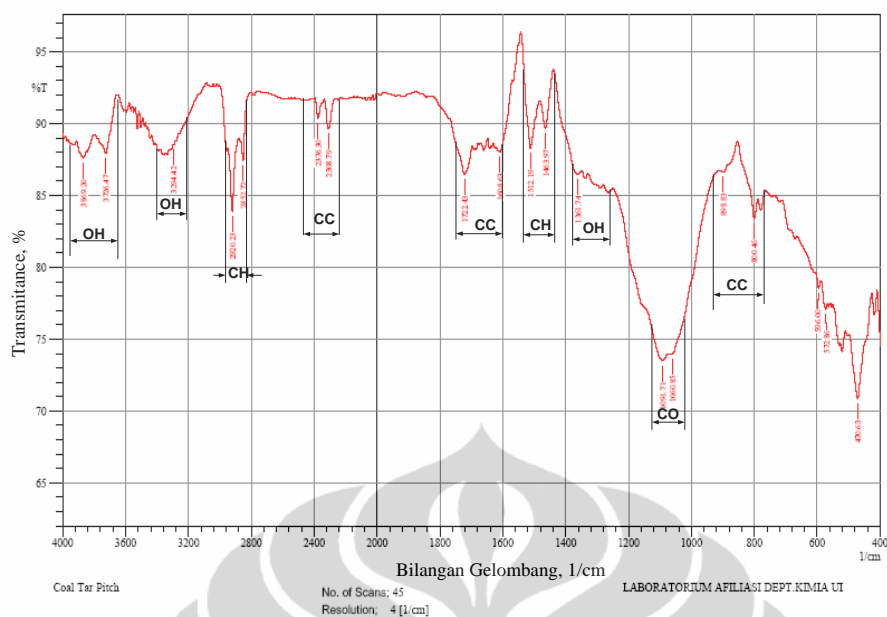
Gambar 4. 89. Spektra *infrared* batubara

Tabel 4. 6: Bilangan gelombang spektra *infrared* batubara

No	Bilangan gelombang, 1/cm	Ikatan molekul	Energi yang diabsorpsi, %
1	3882,71	OH	8
2	3724,54	OH	8
3	2380,16 dan 2304,94	CC	4
4	1749,44	CO	3
5	1510,26	OH	2
6	1338,60	OH	0
7	1250 - 730	CH	0

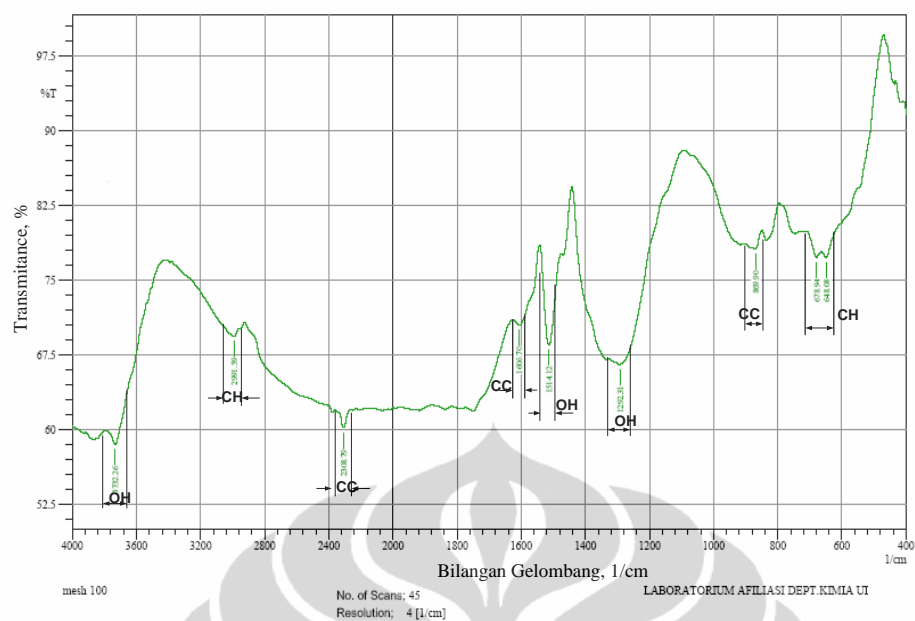
Bilangan gelombang 1338,60/cm menunjukkan ikatan OH, energi spektra *infrared* yang diabsorpsi sebesar 0%. Bilangan gelombang dari 700 – 1250 /cm menunjukkan ikatan CH. Ikatan molekul dan energi vibrasi yang diabsorpsi oleh ikatan molekul di dalam batubara ditunjukkan dalam Tabel 4. 6.

Energi vibrasi spektra *infrared* yang diabsorpsi oleh ikatan molekul dalam *coal tar pitch* ditunjukkan Gambar 4. 90. Bilangan gelombang sekitar 3200 – 4000/cm dan 1200 – 1400/cm menunjukkan ikatan molekul OH. Bilangan gelombang sekitar 2800 – 3000/cm dan sekitar 1400 – 1500/cm menunjukkan ikatan molekul CH. Bilangan gelombang sekitar 2200 – 2400/cm, sekitar 1600 – 1800/cm dan sekitar 800 – 1000/cm menunjukkan ikatan molekul CC. Bilangan gelombang sekitar 1000 – 1100/cm menunjukkan ikatan CO. Ikatan molekul yang terjadi di dalam *coal tar pitch* dan energi vibrasi yang diabsorpsi oleh ikatan tersebut ditunjukkan dalam Tabel 4. 7.

Gambar 4. 90. Spektra *infrared coal tar pitch*Tabel 4. 7: Bilangan gelombang spektra *infrared coal tar pitch*

No	Bilangan gelombang, 1/cm	Ikatan molekul	Energi yang diabsorpsi, %
1	3869,20	OH	12
2	3726,47	OH	12
3	3294,42	OH	12
4	2920,23	CH	16
5	2852,72	CH	13
6	2376,30	CC	9
7	2308,79	CC	11
8	1722,43	CC	13
9	1608,63	CC	12
10	1512,19	CH	12
11	1463,97	CH	10
12	1361,74	OH	13
13	1091,71	CO	27
14	1060,85	CO	26
15	898,83	CC	13
16	800,46	CC	16

Energi vibrasi spektra *infrared* yang diabsorpsi oleh komposit karbon-karbon dengan serbuk mesh 100 untuk rasio komposisi BB:ABK 80:20 ditunjukkan Gambar 4. 91. Ikatan molekul OH diidentifikasi oleh bilangan gelombang sekitar 3750/cm, sekitar 1500/cm dan 1300/cm. Ikatan molekul CC ditunjukkan oleh bilangan gelombang sekitar 2200 – 2400/cm, sekitar 1600/cm dan sekitar 800 – 900/cm. Bilangan gelombang sekitar 3000/cm dan sekitar 600 – 700/cm menunjukkan ikatan molekul CH.



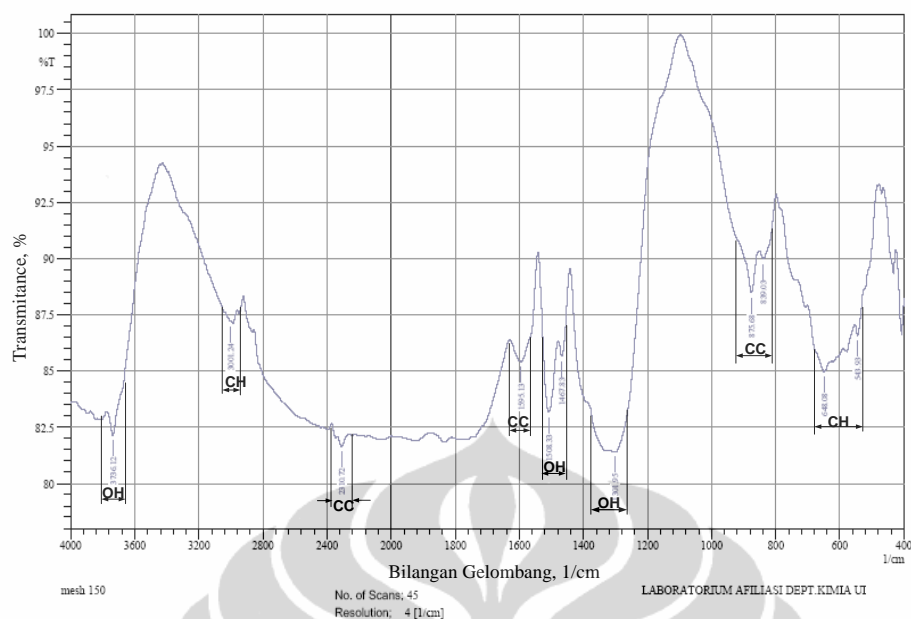
Gambar 4. 91. Spektra *infrared* komposit karbon-karbon mesh 100, rasio komposisi BB: ABK 80:20

Besaran energi yang diabsorpsi dan ikatan molekul pada tiap bilangan gelombang yang ditunjukkan pada grafik dapat dilihat pada Tabel 4. 8. Absorpsi energi spektra *infrared* oleh ikatan molekul CC dengan rasio komposisi 80:20 terjadi pada bilangan gelombang 2308,79/cm sebesar 40% dan pada bilangan gelombang 869,90/cm sebesar 20%.

Tabel 4. 8: Bilangan gelombang spektra *infrared* mesh 100, rasio komposisi 80:20

No	Bilangan gelombang, 1/cm	Ikatan molekul	Energi yang diabsorpsi, %
1	3732,26	OH	42
2	2991,59	CH	30
3	2308,79	CC	40
4	1606,70	OH	30
5	1514,12	OH	31
6	1292,31	OH	33
7	869,90	CC	20
8	678,94	CH	20
9	648,08	CH	20

Energi vibrasi spektra *infrared* yang diabsorpsi oleh komposit karbon-karbon dengan serbuk mesh 150 untuk rasio komposisi BB:ABK 80:20 ditunjukkan Gambar 4. 92.



Gambar 4. 92. Spektra *infrared* komposit karbon-karbon mesh 150, rasio komposisi BB: ABK 80:20

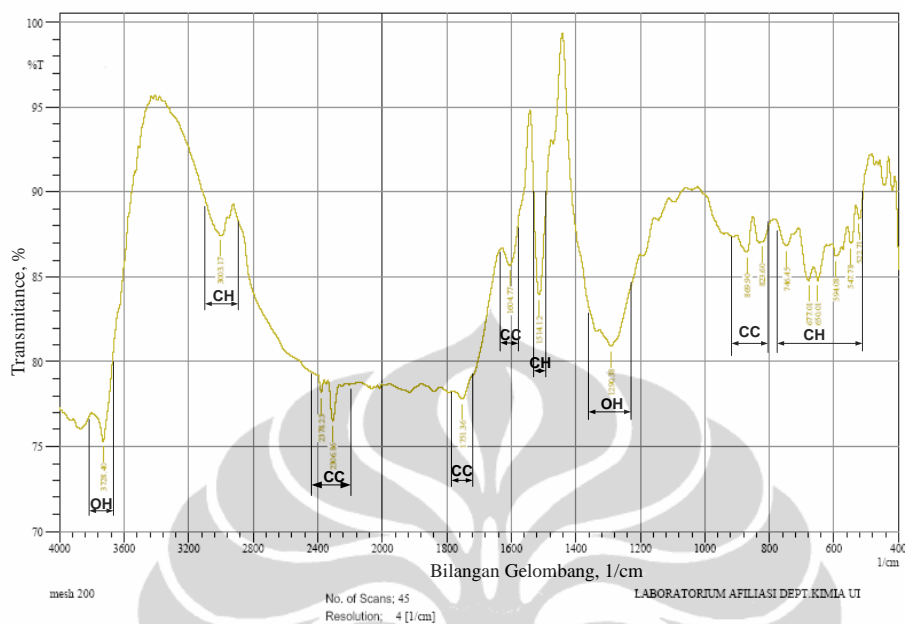
Bilangan gelombang sekitar 3750/cm dan sekitar 1300 – 1500/cm menunjukkan ikatan molekul OH. Ikatan molekul CH diidentifikasi oleh bilangan gelombang sekitar 530 – 650/cm dan sekitar 3000/cm. Bilangan gelombang sekitar 830 – 880/cm dan gelombang sekitar 2300/cm menunjukkan ikatan molekul CC. Besaran energi yang diabsorpsi dan ikatan molekul pada tiap bilangan gelombang yang ditunjukkan pada grafik dapat dilihat pada Tabel 4. 9.

Tabel 4. 9: Bilangan gelombang spektra *infrared* mesh 150, rasio komposisi 80:20

No	Bilangan gelombang, 1/cm	Ikatan molekul	Energi yang diabsorpsi, %
1	3736,12	OH	18
2	3001,24	CH	13
3	2310,72	CC	18
4	1595,13	OH	14,5
5	1508,33	OH	17
6	1467,83	OH	14
7	1301,95	OH	19
8	875,68	CC	11,5
9	839,03	CC	10
10	648,08	CH	15
11	543,93	CH	13

Energi vibrasi spektra *infrared* yang diabsorpsi oleh komposit karbon-karbon dengan serbuk mesh 200 untuk rasio komposisi BB:ABK 80:20

ditunjukkan Gambar 4. 93. Bilangan gelombang sekitar 520 – 800/cm dan sekitar 3000/cm menunjukkan ikatan molekul CH.



Gambar 4. 93. Spektra *infrared* komposit karbon-karbon mesh 200, rasio komposisi BB: ABK 80:20

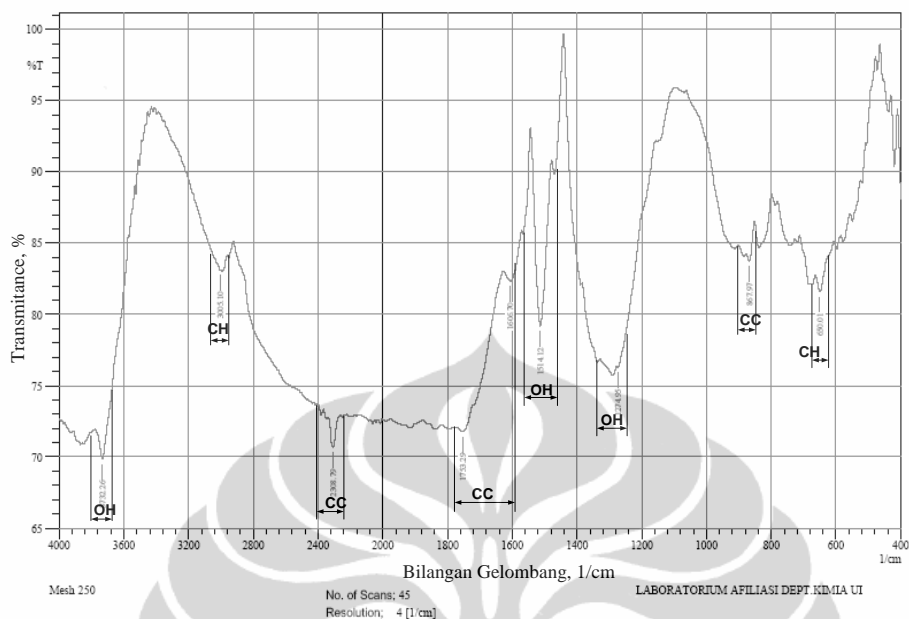
Tabel 4. 10: Bilangan gelombang spektra *infrared* mesh 200, rasio komposisi 80:20

No	Bilangan gelombang, 1/cm	Ikatan molekul	Energi yang diabsorpsi, %
1	3728,40	OH	24,5
2	3003,17	CH	12
3	2378,23 dan 1751,36	CC	22
4	2306,86	CC	23
5	1604,77	CC	14
6	1514,12	CH	16
7	1290,38	OH	19
8	869,90 dan 823,60	CC	13
9	746,45	CH	13
10	677,01 dan 650,01	CH	15
11	594,08	CH	14
12	547,78	CH	13
13	522,71	CH	12

Ikatan molekul OH ditunjukkan oleh bilangan gelombang sekitar 1280 – 1400/cm dan sekitar 3750/cm. Ikatan molekul CC ditunjukkan oleh bilangan gelombang sekitar 2300 – 2380/cm dan bilangan gelombang sekitar 1600 – 1800/cm. Bilangan gelombang sekitar 800 – 1000/cm menunjukkan ikatan molekul CC. Besaran energi yang diabsorpsi dan ikatan molekul pada tiap bilangan



gelombang yang ditunjukkan pada grafik dapat dilihat pada Tabel 4. 10.



Gambar 4. 94. Spektra *infrared* komposit karbon-karbon mesh 250, rasio komposisi BB: ABK 80:20

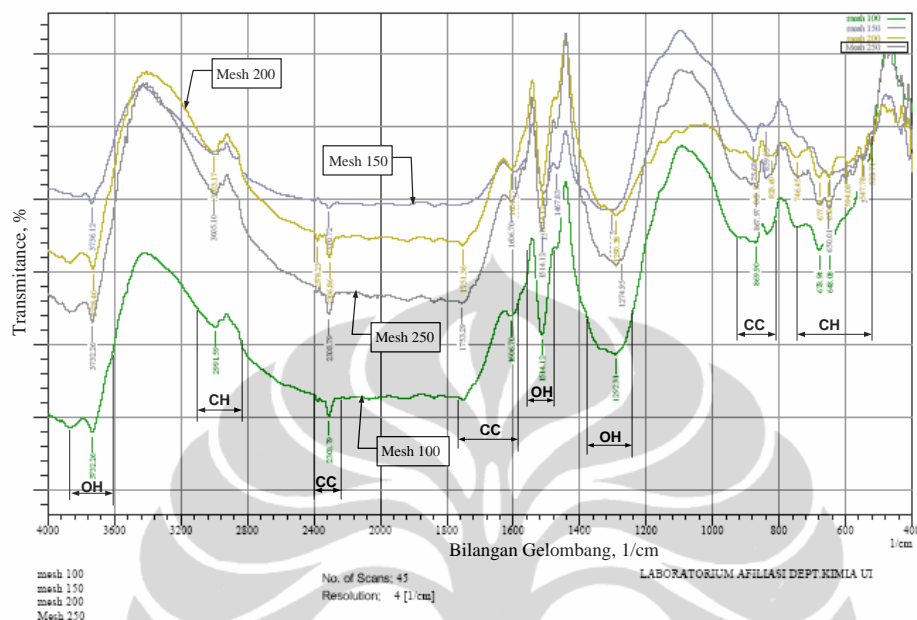
Energi vibrasi spektra *infrared* yang diabsorpsi oleh komposit karbon-karbon dengan serbuk mesh 250 untuk rasio komposisi BB:ABK 80:20 ditunjukkan Gambar 4. 94.

Tabel 4. 11: Bilangan gelombang spektra *infrared* mesh 250, rasio komposisi 80:20

No	Bilangan gelombang, 1/cm	Kemungkinan ikatan	Energi yang diabsorpsi, %
1	3732,26	OH	30
2	3005,10	CH	17
3	2308,79	CC	29
4	1753,29	CC	23
5	1606,70	CC	17
6	1514,12	OH	21
7	1274,95	OH	24
8	867,97	CC	16
9	650,01	CH	18

Bilangan gelombang sekitar 650/cm dan sekitar 3000/cm menunjukkan ikatan molekul CH. Ikatan molekul OH ditunjukkan oleh bilangan gelombang sekitar 1250 – 1600/cm dan sekitar 3750/cm. Ikatan molekul CC ditunjukkan oleh bilangan gelombang sekitar 2300/cm, 1600 – 1700/cm dan sekitar 800 – 900/cm.

Besaran energi yang diabsorpsi dan ikatan molekul pada tiap bilangan gelombang yang ditunjukkan pada grafik dapat dilihat pada Tabel 4. 11.

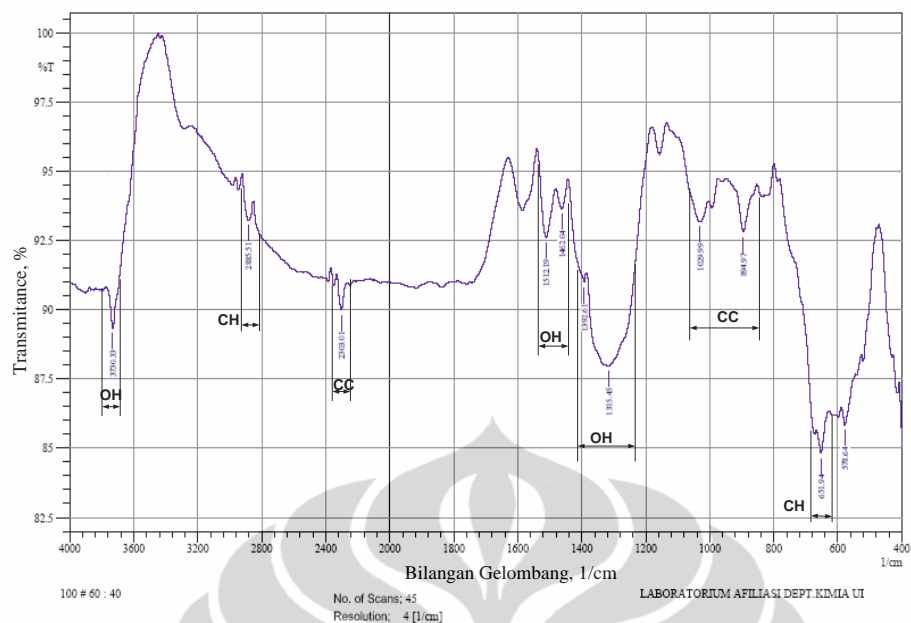


Gambar 4. 95. Spektra *infrared* komposit karbon-karbon

Energi vibrasi spektra *infrared* yang diabsorpsi oleh komposit karbon-karbon dengan serbuk mesh 100, 150, 200 dan 250 untuk rasio komposisi BB:ABK 80:20 ditunjukkan Gambar 4. 95. Secara garis besar hasil absorpsi energi spektra *infrared* oleh sampel untuk semua jenis ukuran serbuk dan komposisi yang sama menunjukkan bentuk dan kecenderungan yang sama.

Bilangan gelombang juga menunjukkan ikatan molekul yang sama antara tiap ukuran serbuk mesh. Bilangan gelombang sekitar 3750/cm, sekitar 1400 – 1600/cm dan 1200 – 1400/cm menunjukkan ikatan yang sama untuk semua ukuran serbuk, yaitu ikatan molekul OH. Ikatan molekul CH untuk semua jenis ukuran serbuk ditunjukkan oleh bilangan gelombang sekitar 500 – 900/cm dan sekitar 3000/cm. Semua jenis ukuran serbuk menunjukkan ikatan molekul CC pada bilangan gelombang sekitar 2000 – 2400/cm, sekitar 1600 – 1700/cm dan 800 – 1000/cm.

Energi vibrasi spektra *infrared* yang diabsorpsi oleh ikatan molekul dalam komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi BB:ABK 60:40, untuk ukuran serbuk mesh 100 ditunjukkan Gambar 4. 96.



Gambar 4. 96. Spektra *infrared* komposit karbon-karbon mesh 100, rasio komposisi BB: ABK 60:40

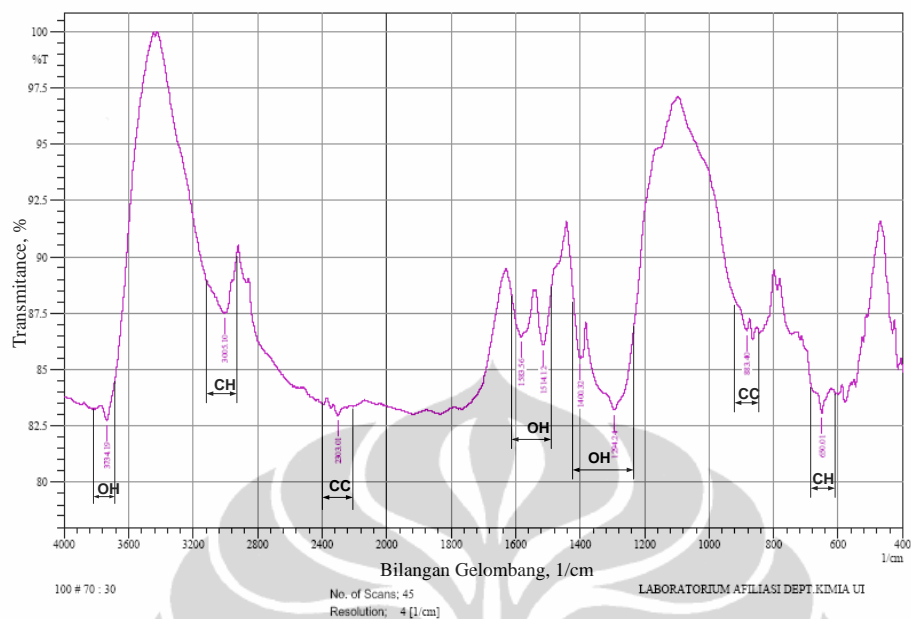
Bilangan gelombang sekitar 3750/cm, sekitar 1420 – 1520/cm dan sekitar 1220 – 1410/cm menunjukkan ikatan molekul OH. Bilangan gelombang sekitar 2800 – 3000/cm dan sekitar 600 – 700/cm menunjukkan ikatan CH. Ikatan molekul CC ditunjukkan oleh bilangan gelombang sekitar 2300 – 2400/cm dan 820 – 1100/cm.

Tabel 4. 12: Bilangan gelombang spektra *infrared* mesh 100, rasio komposisi 60:40

No	Bilangan gelombang, 1/cm	Kemungkinan ikatan	Energi yang diabsorpsi, %
1	3730,33	OH	11
2	2885,51	CH	7
3	2303,01	CC	10
4	1512,19	OH	7,5
5	1462,04	OH	6
6	1392,61	OH	9
7	1315,45	OH	12
8	1029,99	CC	6,5
9	894,97	CC	7
10	651,94	CH	15

Besar energi vibrasi yang diabsorpsi oleh tiap ikatan molekul dapat dilihat pada Tabel 4. 12. Absorpsi energi *infrared* oleh ikatan CC dari komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi BB:ABK 60:40 terjadi pada bilangan gelombang sekitar 2303,01/cm sebesar 10%, pada bilangan gelombang sekitar 1029,99/cm

sebesar 6,5%, dan pada bilangan gelombang sekitar 894,97/cm sebesar 7%.



Gambar 4. 97. Spektra *infrared* komposit karbon-karbon mesh 100, rasio komposisi BB: ABK 70:30

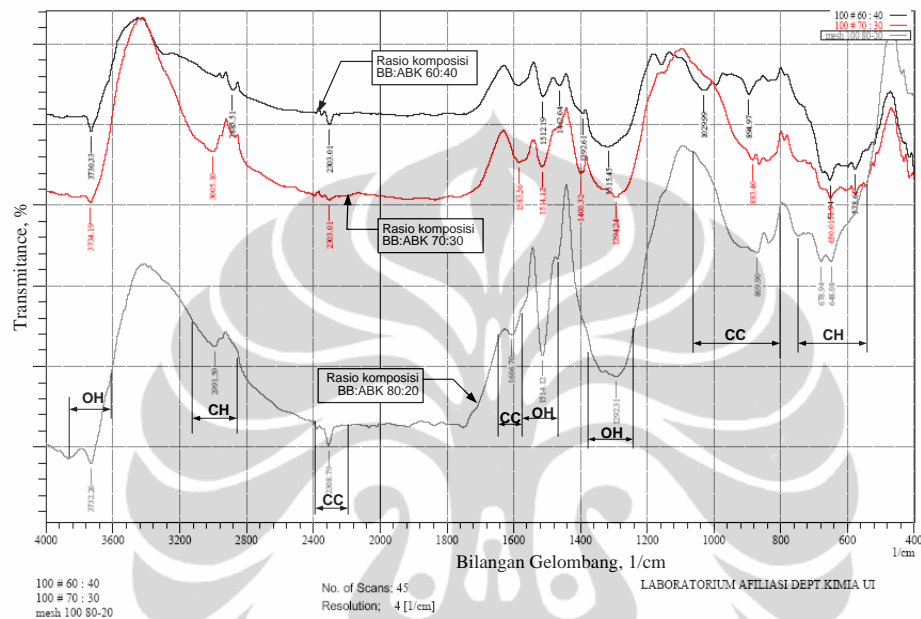
Energi vibrasi spektra *infrared* yang diabsorpsi oleh ikatan molekuler yang terbentuk dalam komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi BB:ABK 70:30, dengan ukuran serbuk mesh 100 ditunjukkan Gambar 4. 97.

Bilangan gelombang sekitar 3700/cm, sekitar 1500 – 1600/cm dan sekitar 1220 – 1410/cm menunjukkan ikatan molekuler OH. Bilangan gelombang sekitar 3000/cm dan sekitar 600 – 700/cm menunjukkan ikatan molekuler CH. Ikatan molekuler CC ditunjukkan oleh bilangan gelombang sekitar 2200 – 2400/cm dan sekitar 820 – 900/cm.

Tabel 4. 13: Bilangan gelombang spektra *infrared* mesh 100, rasio komposisi 70:30

No	Bilangan gelombang, 1/cm	Kemungkinan ikatan	Energi yang diabsorpsi, %
1	3734,19	OH	17,5
2	3005,10	CH	12,5
3	2303,01	CC	17
4	1583,56	OH	13,5
5	1514,12	OH	14
6	1400,32	OH	14,5
7	1294,24	OH	17
8	883,40	CC	14
9	650,01	CH	17

Absorpsi energi *infrared* oleh ikatan CC dari komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi BB:ABK 70:30 terjadi pada bilangan gelombang sekitar 2303,01/cm sebesar 17%, dan pada bilangan gelombang sekitar 883,40/cm sebesar 7%. Seperti ditunjukkan pada Tabel 4. 13.



Gambar 4. 98. Spektra *infrared* komposit karbon-karbon

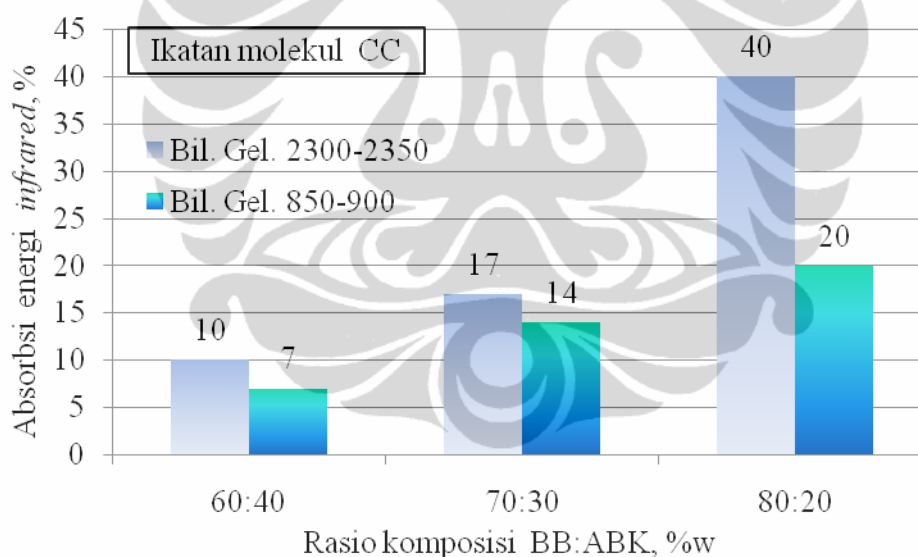
Energi vibrasi *infrared* yang diabsorpsi oleh ikatan molekul yang terbentuk di dalam komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi BB:ABK 60:40, 70:30 dan 80:20, untuk ukuran serbuk mesh 100 ditunjukkan Gambar 4. 98. Gambar tersebut menunjukkan bentuk grafik yang cenderung sama untuk semua rasio komposisi. Puncak-puncak absorpsi energi spektra *infrared* cenderung terjadi pada bilangan gelombang yang sama untuk semua rasio komposisi, sehingga pada sekitar bilangan gelombang tersebut juga menunjukkan ikatan molekul yang sama untuk semua rasio komposisi dari komposit karbon-karbon.

Absorpsi energi *infrared* oleh tiap ikatan yang terbentuk di dalam komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk mesh 100, untuk semua jenis komposisi ditunjukkan Tabel 4. 14.

Tabel 4. 14. Absorpsi energi spektra *infrared* oleh ikatan molekuler untuk mesh 100

No	Ikatan molekuler	BB:ABK 60:40		BB:ABK 70:30		BB:ABK 80:20	
		Bilangan gelombang, 1/cm	Absorpsi energi, %	Bilangan gelombang, 1/cm	Absorpsi energi, %	Bilangan gelombang, 1/cm	Absorpsi energi, %
1	CC	2303,01	10	2303,01	17	2308,79	40
2		894,97	7	883,40	14	869,90	20
3	CH	2885,51	7	3005,10	12,5	2991,59	30
4		651,94	15	650,01	17	648,08	20
5	OH	3730,33	11	3734,19	17,5	3732,26	42
6		1512,19	7,5	1583,56	13,5	1606,70	30
7		1462,04	6	1514,12	14	1514,12	31
8		1315,45	12	1294,24	17	1292,31	33

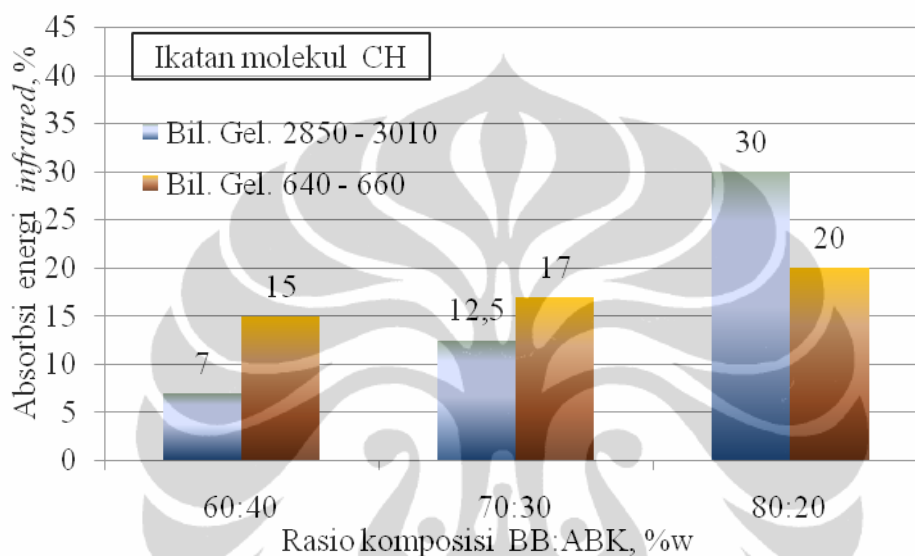
Pada daerah sekitar bilangan gelombang yang berdekatan (relatif sama), tiap rasio komposisi BB:ABK menyerap energi spektra *infrared* yang berbeda. Semakin tinggi persentase kandungan berat serbuk karbon batubara semakin tinggi persentase absorpsi energi *infrared* yang diserap oleh tiap ikatan molekuler di dalam komposit tersebut.



Gambar 4. 99. Pengaruh rasio komposisi terhadap absorpsi energi *infrared* oleh ikatan molekuler CC

Absorpsi energi spektra *infrared* oleh ikatan molekuler CC dalam komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk mesh 100 ditunjukkan Gambar 4. 99, untuk rasio komposisi BB:ABK 60:40, 70:30 dan 80:20, pada sekitar bilangan gelombang yang teridentifikasi. Pada bilangan gelombang sekitar 2300 – 2350/cm, rasio komposisi 60:40 menyerap energi spektra *infrared* 10%, dan rasio

komposisi 80:20 menyerap energi spektra *infrared* 40%. Pada bilangan gelombang sekitar 850 – 900/cm, rasio komposisi 60:40 menyerap energi spektra *infrared* 7%, dan rasio komposisi 80:20 menyerap energi spektra *infrared* 20%. Fakta ini menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase kandungan serbuk karbon batubara semakin tinggi absorpsi energi spektra *infrared* oleh ikatan molekul CC dari komposit karbon-karbon tersebut.

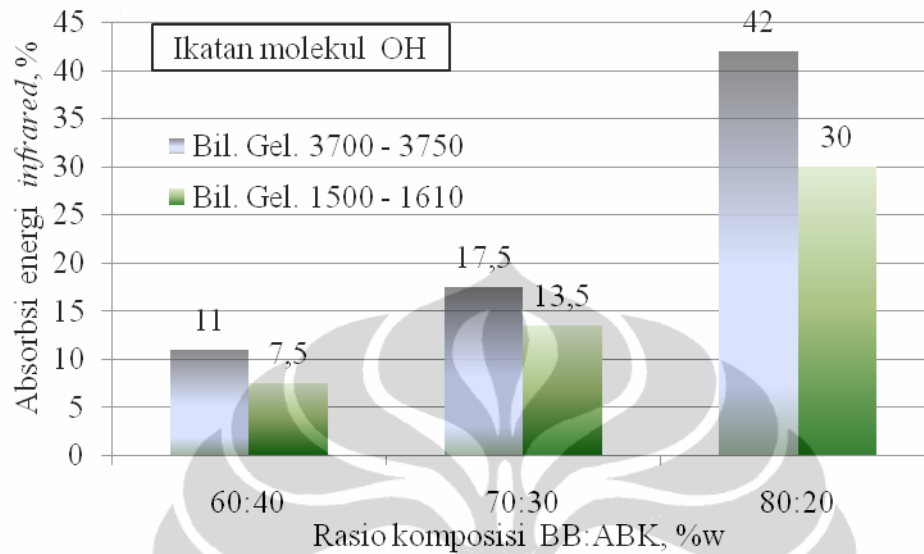


Gambar 4. 100. Pengaruh rasio komposisi terhadap absorpsi energi *infrared* oleh ikatan molekul CH

Absorpsi energi spektra *infrared* oleh ikatan molekul CH dalam komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk mesh 100 ditunjukkan Gambar 4. 100, untuk rasio komposisi BB:ABK 60:40, 70:30 dan 80:20, pada sekitar bilangan gelombang yang teridentifikasi. Pada bilangan gelombang sekitar 2850 – 3010/cm, rasio komposisi 60:40 menyerap energi spektra *infrared* 7%, dan rasio komposisi 80:20 menyerap energi spektra *infrared* 30%. Pada bilangan gelombang sekitar 640 – 660/cm, rasio komposisi 60:40 menyerap energi spektra *infrared* 15%, dan rasio komposisi 80:20 menyerap energi spektra *infrared* 20%. Fakta ini menunjukkan serapan energi spektra *infrared* oleh ikatan molekul CH semakin tinggi, ketika persentase kandungan serbuk karbon batubara semakin tinggi.

Absorpsi energi spektra *infrared* oleh ikatan molekul OH dalam komposit karbon-karbon dengan ukuran serbuk mesh 100 ditunjukkan Gambar 4. 101,

untuk rasio komposisi BB:ABK 60:40, 70:30 dan 80:20, pada sekitar bilangan gelombang yang teridentifikasi.



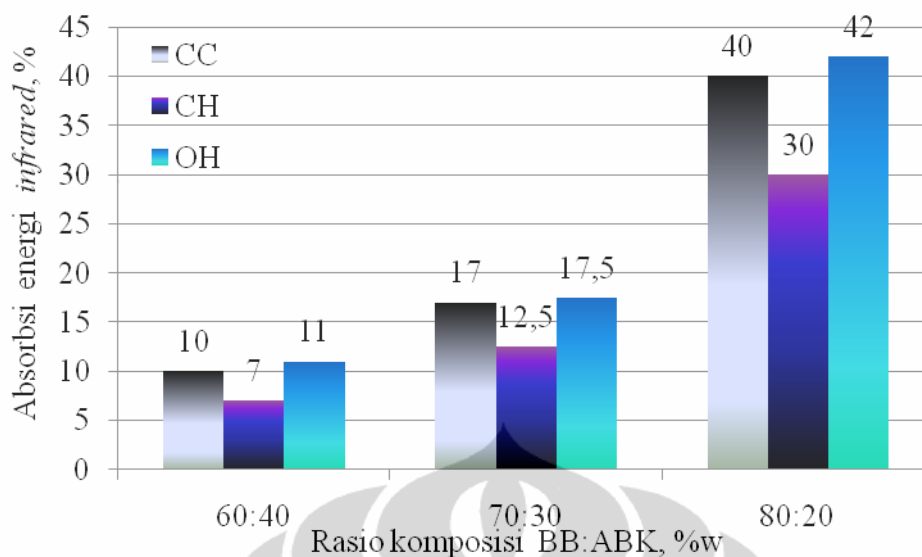
Gambar 4. 101. Pengaruh rasio komposisi terhadap absorpsi energi *infrared* oleh ikatan molekul OH

Pada bilangan gelombang sekitar 3700 – 3750/cm, pada rasio komposisi 60:40, ikatan molekul OH menyerap energi spektra *infrared* 11%, dan rasio komposisi 80:20 menyerap energi spektra *infrared* 42%. Pada bilangan gelombang sekitar 1500 – 1610/cm, pada rasio komposisi 60:40, ikatan molekul OH menyerap energi spektra *infrared* 7,5%, dan rasio komposisi 80:20 menyerap energi spektra *infrared* 30%. Fakta ini juga menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase kandungan serbuk karbon batubara semakin tinggi serapan energi spektra *infrared* oleh ikatan molekul OH dari komposit tersebut.

Absorpsi energi spektra *infrared* oleh ikatan molekul CC, CH dan OH dari komposit karbon-karbon dalam rasio komposisi BB:ABK 60:40, 70:30 dan 80:20 dengan ukuran serbuk mesh 100 ditunjukkan Gambar 4. 102. Serapan energi spektra *infrared* oleh tiap jenis ikatan molekul cenderung meningkat. Semakin tinggi persentase kandungan serbuk karbon batubara semakin tinggi absorpsi energi spektra *infrared* oleh komposit karbon-karbon.

Bentuk ikatan yang terjadi dalam CC, CH dan OH adalah ikatan *covalent* seperti yang dijelaskan dalam *Bond Lengths and Energies* [30].





Gambar 4. 102. Pengaruh rasio komposisi terhadap absorpsi energi *infrared* oleh ikatan molekul CC, CH, OH

Secara teoritis ikatan molekul CC yang teridentifikasi pada bilangan gelombang sekitar 2100 – 2400 menunjukkan ikatan  $C \equiv C$  (*triple bond*) yang mempunyai panjang gelombang 4,2 – 4,8  $\mu\text{m}$  dengan kekuatan ikatan molekul dari lemah sampai medium. Ikatan molekul CC yang teridentifikasi pada sekitar bilangan gelombang 850 – 900/cm menunjukkan ikatan  $C - C$  (*single bond*) yang mempunyai panjang gelombang 8,3 – 12,5  $\mu\text{m}$  dengan kekuatan ikatan molekul dari medium sampai lemah. Ikatan molekul CC yang teridentifikasi pada sekitar bilangan gelombang 1600 – 1700/cm menunjukkan ikatan  $C = C$  (*double bond*) yang mempunyai panjang gelombang 5,9 – 6,3  $\mu\text{m}$  dengan kekuatan ikatan medium [31]. Ikatan molekul tersebut terjadi pada frekwensi yang sama untuk semua jenis rasio komposisi BB:ABK 60:40, 70:30 dan 80:20. Serapan energi vibrasi *infrared* oleh ikatan molekul lebih kuat dipengaruhi oleh rasio komposisi BB:ABK. Kekuatan ikatan molekul lebih kuat dipengaruhi oleh bentuk ikatan dari molekul dan panjang gelombang yang terbentuk dalam ikatan molekul tersebut. Teori *Molecules and the properties of bonded atoms* menjelaskan bahwa ikatan molekul  $C - C$  (*single bond*) mempunyai energi ikatan 345 kJ/mol, ikatan molekul  $C = C$  (*double bond*) mempunyai energi ikatan 615 kJ/mol dan ikatan molekul  $C \equiv C$  (*triple bond*) mempunyai energi ikatan 835 kJ/mol [32].

Tabel 4. 15: Energi ikatan molekul CC

No	Ikatan molekul	BB:ABK 60:40		BB:ABK 70:30		BB:ABK 80:20		Panjang gelombang, $\mu\text{m}$	Energi ikatan, kJ/mol
		Frekw, 1/cm	Absb enrg, %	Frekw, 1/cm	Absb enrg, %	Frekw, 1/cm	Absb enrg, %		
1	C $\equiv$ C	2303,01	10	2303,01	17	2308,79	40	4,2 – 4,8	835
2	C – C	894,97	7	883,40	14	869,90	20	8,3 – 12,5	345

Energi ikatan molekul CC yang terjadi dalam penelitian komposit karbon-karbon yang dilaporkan disini diasumsikan juga mempunyai energi ikatan yang sama, energi ikatan adalah jumlah kerja yang harus dilakukan untuk menarik dua buah atom sehingga terpisah sempurna [32]. Besaran energi ikatan molekul CC yang terjadi dalam penelitian ini dapat dilihat dalam Tabel 4. 15.

Terdapat kecenderungan yang umum bahwa semakin besar energi ikatan semakin kuat ikatan tersebut. Bagaimanapun tidak ada formula yang bisa menunjukkan hubungan tersebut karena variasi yang menyebar sangat luas [30].

Ikatan molekul yang teridentifikasi pada daerah frekwensi tinggi menunjukkan panjang gelombang yang pendek, dan menunjukkan energi ikatan yang tinggi. Hal tersebut berlaku untuk ikatan molekul CC.

Bentuk ikatan molekul CH yang terjadi dalam komposit karbon-karbon ini juga menunjukkan ikatan *covalent*, seperti yang dijelaskan dalam *Bond Lengths and Energies* [30]. Ikatan molekul CH yang terdeteksi dalam komposit karbon-karbon ini terjadi pada daerah frekwensi 2850 – 3010/cm dan pada daerah frekwensi 640 – 660/cm. Secara teoritis ikatan molekul CH yang terdeteksi pada kedua daerah frekwensi tersebut adalah *single bond* C – H, dan ikatan tunggal molekul C – H yang terdeteksi pada daerah frekwensi sekitar 2700 – 3300/cm menunjukkan ikatan molekul yang kuat, dengan panjang gelombang 3,0 – 3,7  $\mu\text{m}$ . Ikatan tunggal molekul C – H yang terdeteksi pada daerah frekwensi 600 – 900/cm menunjukkan ikatan molekul yang lemah, dengan panjang gelombang 11,1 – 16,7  $\mu\text{m}$ , [31]. Teori *Molecules and the properties of bonded atoms* menjelaskan bahwa ikatan molekul C – H (*single bond*) mempunyai energi ikatan 415 kJ/mol, dan ini terjadi pada semua daerah frekwensi yang terdeteksi [32].

Penting untuk dipahami bahwa sifat yang tepat dari jenis ikatan spesifik akan ditentukan sebagian oleh keadaan ikatan lainnya dalam molekul tersebut, sehingga energi dan panjang ikatan molekul C – H bagaimanapun akan tergantung

pada atom lain yang terikat terhadap atom tersebut.

Tabel 4. 16: Energi ikatan molekul CH

No	Ikatan molekul	BB:ABK 60:40		BB:ABK 70:30		BB:ABK 80:20		Panjang gelombang, $\mu\text{m}$	Energi ikatan, kJ/mol
		Frekw, 1/cm	Absb enrg, %	Frekw, 1/cm	Absb enrg, %	Frekw, 1/cm	Absb enrg, %		
1	C – H	2885,51	7	3005,10	12,5	2991,59	30	3,0 – 3,7	415
2	C – H	651,94	15	650,01	17	648,08	20	11,1 – 16,7	415

Secara sama, panjang ikatan molekul C – H akan bervariasi sebesar antara molekul yang berbeda. Karena alasan ini, nilai yang tercantum dalam teori energi ikatan dan panjang ikatan biasanya adalah rata-rata yang diambil dari variasi senyawa yang mengandung pasangan atom yang spesifik, demikian teori yang dijelaskan dalam *Molecules and the properties of bonded atoms* [32]. Energi ikatan molekul C – H yang terbentuk dalam komposit karbon-karbon ini diasumsikan sama dengan teori yang dijelaskan, artinya meskipun terdeteksi pada daerah frekwensi yang berbeda dan menunjukkan panjang gelombang yang berbeda tetapi menghasilkan energi ikatan yang sama, seperti ditunjukkan dalam Tabel 4. 16.

Teori *Bond Lengths and Energies* menjelaskan bahwa ikatan yang terbentuk oleh molekul OH adalah bentuk ikatan *covalent* atau ikatan *predominant covalent* [30]. Ikatan molekul OH yang terdeteksi dalam komposit karbon-karbon ini terjadi pada daerah frekwensi 3000 – 3700/cm dan pada daerah frekwensi 1200 – 1500/cm. Secara teoritis ikatan molekul OH yang terdeteksi pada daerah frekwensi tersebut menunjukkan ikatan molekul tunggal O – H, ikatan molekul O – H yang terdeteksi pada frekwensi 3000 – 3700/cm menunjukkan panjang gelombang 2,7 – 3,3  $\mu\text{m}$  yang menunjukkan ikatan molekul yang kuat, dan ikatan molekul O – H yang terdeteksi pada frekwensi 1200 – 1500/cm menunjukkan panjang gelombang 6,9 – 8,3  $\mu\text{m}$  dengan ikatan molekul yang lemah sampai medium [31]. Teori *Molecules and the properties of bonded atoms* menjelaskan bahwa ikatan molekul O – H (*single bond*) mempunyai energi ikatan 460 kJ/mol, dan ini terjadi pada semua daerah frekwensi yang terdeteksi [32]. Sifat ikatan molekul ini akan ditentukan sebagian oleh keadaan ikatan lainnya dalam molekul tersebut, sehingga energi dan panjang ikatan molekul O – H tergantung pada atom lain yang terikat terhadap atom tersebut, dengan

demikian panjang ikatan molekul O – H akan bervariasi antara molekul yang berbeda. Karena alasan ini, nilai yang tercantum dalam teori energi ikatan dan panjang ikatan biasanya adalah rata-rata yang diambil dari variasi senyawa yang mengandung pasangan atom yang spesifik, demikian teori yang dijelaskan dalam *Molecules and the properties of bonded atoms* [32].

Energi ikatan molekul O – H yang terbentuk dalam komposit karbon-karbon ini diasumsikan sama dengan teori yang dijelaskan, artinya meskipun terdeteksi pada daerah frekwensi yang berbeda dan menunjukkan panjang gelombang yang berbeda tetapi menghasilkan energi ikatan yang sama, seperti ditunjukkan dalam Tabel 4. 17.

Tabel 4. 17: Energi ikatan molekul OH

No	Ikatan molekul	BB:ABK 60:40		BB:ABK 70:30		BB:ABK 80:20		Panjang gelombang, $\mu\text{m}$	Energi ikatan, kJ/mol
		Frekw, 1/cm	Absb enrg, %	Frekw, 1/cm	Absb enrg, %	Frekw, 1/cm	Absb enrg, %		
1	O – H	3730,33	11	3734,19	17,5	3732,26	42	2,7 – 3,3	460
2	O – H	1512,19	7,5	1583,56	13,5	1606,70	30	6,9 – 8,3	460
3	O – H	1462,04	6	1514,12	14	1514,12	31	6,9 – 8,3	460
4	O – H	1315,45	12	1294,24	17	1292,31	33	6,9 – 8,3	460

#### 4. 6. Analisis sifat mekanik

Blanco menyatakan bahwa porositas dan kekuatan tekan komposit karbon-karbon dipengaruhi oleh deformasi material pada saat karbonisasi [4].

Sifat mekanik terbaik diperoleh karena kandungan *pitch* yang tinggi. Tetapi tambahan kandungan *pitch* menyebabkan *pitch* mengembang. Pengeembangan ini karena pembentukan internal retakan atau pori yang tidak keluar di permukaan luar, yang menjadi penyebab penurunan kekuatan mekanik. Sifat mekanik dari komposit karbon tidak hanya tergantung pada bahan penguat dan matriks, tetapi juga pada karakteristik rekatan antarmuka antara serbuk dan matriks. Interaksi antara komponen tersebut bertanggung jawab atas perbedaan yang dapat diperhitungkan untuk sistem *pitch* / karbon yang berbeda [10].

Ling-jun mengungkapkan penyebab kelemahan sifat mekanik secara umum. Bagian dari gas atau pengotor di dalam bahan karbon pasti akan melepaskan diri selama proses grafitisasi dan karbonisasi sehingga menyebabkan penurunan kepadatan sampel karbon [17].

Sifat mekanik dari komposit karbon-karbon tidak hanya berkaitan dengan densitas volume dan proses densifikasi, tetapi juga berkaitan terhadap sifat serbuk yang meliputi kuat tekan dari serbuk itu sendiri, struktur mikro serbuk dan morfologi permukaan serbuk. Semakin tinggi kuat tekan serbuk, semakin kasar permukaan serbuk, semakin banyak rongga dari tiap serbuk karbon, maka akan semakin tinggi kuat tekan komposit karbon berbasis *coal tar pitch* [17].

Penyebab aus komposit karbon-karbon yang terjadi pada penelitian dapat dijelaskan bahwa selama karbonisasi senyawa *pitch* yang mudah menguap terlepas. Senyawa yang mudah menguap tersebut akan mencari jalan keluar, yang mengakibatkan tegangan dan pemuaian dalam material. Pemuaian ini mempengaruhi sifat material, seperti densitas dan sifat mekanik. Hal ini menunjukkan bahwa interaksi karbon *pitch* dan serbuk memainkan peranan yang penting dalam sifat material selama proses karbonisasi. Sifat gesekan komposit karbon ditentukan terutama oleh jenis serbuk karbon yang digunakan [4].

Selama karbonisasi dalam penelitian ini, *pitch* dan serbuk karbon mengalami transformasi yang menyebabkan material berubah bentuk. Faktor lain yang mempengaruhi sifat mekanik dari komposit karbon-karbon ini, adalah kualitas campuran dari serbuk karbon/*pitch* atau rekatan antarmuka serbuk karbon /*pitch* [10].

Selama karbonisasi senyawa *pitch* yang mudah menguap terlepas. Senyawa yang mudah menguap tersebut akan mencari jalan keluarnya, yang mengakibatkan tegangan dan pemuaian dalam material. Pemuaian ini dapat mempengaruhi sifat material, seperti densitas dan sifat mekanik [17].

Sifat mekanik dalam penelitian ini termasuk kekerasan dari komposit karbon-karbon dipengaruhi oleh tiga kondisi, ikatan antara *pitch* dan serbuk karbon, peretakan (pelepasan ikatan) pada ikatan antarmuka (*interface*) *pitch* dan serbuk karbon, dan keberadaan rongga matriks yang mendorong pelepasan ikatan antarmuka [48].

Nilai kekuatan mekanik termasuk kekerasan diperkirakan karena terjadi banyak penyusutan volume dan kehilangan berat komposit selama pirolisis yang menyebabkan pembangkitan pusat-pusat konsentrasi tegangan, yang menjadi inisiator retakan yang memperlemah kekuatan mekanik termasuk kekerasan [47].

Unjuk kerja sifat mekanik termasuk kekerasan komposit karbon-karbon tergantung tidak hanya pada sifat serbuk karbon dan matriks, tetapi juga pada ukuran serbuk dan sifat ikatan antarmuka dari matriks dan serbuk [49]. Penelitian ini menunjukkan, keadaan ukuran serbuk dan matriks membuktikan bahwa ukuran yang semakin kecil memainkan peranan dominan dalam adesi ikatan antarmuka dari serbuk karbon terhadap matriks pitch [49] [52].

Ikatan kimia yang kuat pada antarmuka tidak dapat membentuk pelepasan, sebuah adhesi antarmuka yang lemah mengakibatkan retak [52]

Pelemahan ikatan antarmuka setelah grafitisasi menyebabkan penghantaran kekuatan serbuk yang jelek [53].

Matriks yang melingkupi serbuk karbon mengubah sifat gesek, sifat mekanik dan sifat termal. Karena perubahan struktur mikro dari matriks karbon (*pitch*), yang tergantung pada proses densifikasi dan perlakuan panas (karbonisasi) sehingga dapat mempengaruhi unjuk kerja gesekan. Specimen serbuk yang terkelupas, sebagai akibat mekanisme pembajakan oleh serbuk karbon yang relatif keras, dan kerutannya menjadi penyebab utama meningkatnya laju aus. Runtuhan serbuk karbon yang keras dipertimbangkan menjadi penyebab aus abrasif melalui pemecahan lapisan karbon lunak pada permukaan yang bergesekan [55].

Penelitian ini diprediksi juga mengalami hal yang sama, hal ini dapat dibuktikan melalui pembentukan rongga-rongga yang terdeteksi pada topografi hasil uji SEM.

Pada pengujian porositas komposit karbon-karbon dari bahan cangkang kelapa, ketika temperatur *curing* meningkat persentase porositas juga meningkat, hal ini dibuktikan pada Gambar 4. 42. Pori atau rongga yang terbentuk di dalam komposit karbon-karbon memperlemah sifat mekanik komposit. Semakin banyak pori dalam komposit berarti persentase porositas semakin tinggi. Ukuran rongga atau pori juga semakin besar, hal ini dapat dibuktikan pada Gambar 4. 68 Hal ini dapat juga ditunjukkan pada topografi struktur mikro uji SEM pada Gambar 4. 69.

Topografi uji SEM pada Gambar 4. 73 membuktikan adanya rongga pada komposit karbon-karbon dari bahan serbuk karbon batubara. Besar ukuran rongga ditunjukkan pada Gambar 4.72, yang ukurannya tidak sama pada setiap perubahan temperatur *curing*. Hal ini juga yang menjadi penyebab lemahnya sifat mekanik

komposit karbon-karbon.

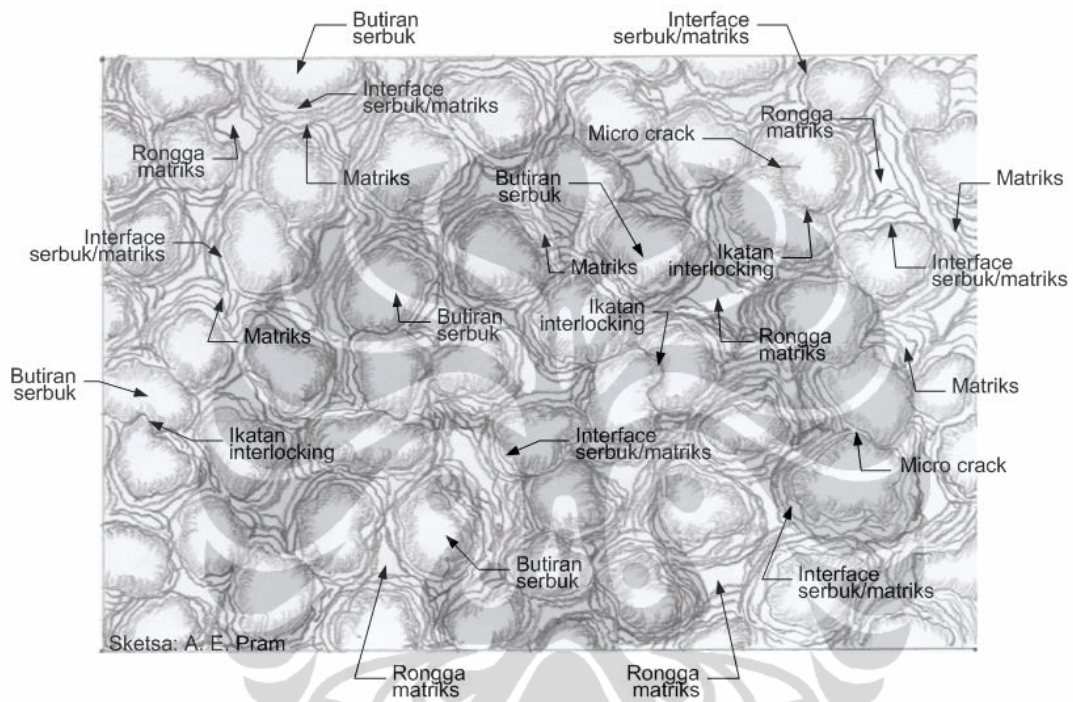
Komposit karbon-karbon dengan bahan campuran serbuk karbon batubara dan serbuk karbon cangkang kelapa dalam matriks *coal tar pitch* juga menunjukkan gejala yang sama, yaitu terbentuknya rongga-rongga dalam komposit. Hal ini dapat dibuktikan pada Gambar 4. 83 yang menunjukkan ukuran rongga-rongga dalam komposit pada semua rasio komposisi dan ukuran serbuk. Juga dapat dibuktikan melalui Gambar 4. 84, Gambar 4. 85, Gambar 4. 86, Gambar 4. 87.

Rongga-rongga yang tergambar pada topografi uji SEM juga menunjukkan adanya pelemahan ikatan antarmuka antara serbuk karbon terhadap *pitch*. Rongga-rongga dalam komposit diprediksi terbentuk oleh peristiwa bahwa bagian gas atau pengotor di dalam bahan karbon yang melepaskan diri selama proses karbonisasi sehingga menyebabkan penurunan kepadatan sampel karbon atau menimbulkan porositas [17]. Proses pemanasan juga berkontribusi terhadap pelemahan ikatan antarmuka antara serbuk karbon dan matriks [5], sehingga peristiwa pelemahan ikatan antarmuka ini bila jumlah makin besar akan semakin memperlambat komposit karbon-karbon secara keseluruhan. Sifat pirolisis *pitch* dipengaruhi oleh keberadaan serbuk karbon yang digunakan sebagai penguat dalam komposit karbon-karbon. Hasil karbon *pitch* meningkat dengan keberadaan serbuk karbon akibat pemanasan. Keberadaan serbuk karbon mempercepat laju polimerisasi *pitch*. Formasi dan pengembangan *mesophase* dimodifikasi oleh keberadaan karbon *pitch* [7].

Secara keseluruhan ikatan antarmuka antara serbuk karbon terhadap matriks, antara serbuk karbon terhadap serbuk karbon lainnya tetap terjadi dalam bentuk ikatan *interlocking* secara mekanik. Hal ini dapat dibuktikan pada gambar topografi uji SEM misalnya pada Gambar 4. 84, Gambar 4. 85, Gambar 4. 86, Gambar 4. 87. Pada gambar tersebut ditunjukkan bahwa sebagian besar serbuk terhadap serbuk lainnya dan serbuk terhadap matriks masih membentuk ikatan antarmuka yang baik. Ikatan antarmuka antara serbuk karbon terhadap matriks juga membentuk ikatan antar molekul secara *covalent*. Hal ini dibuktikan melalui uji FTIR yang hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4. 95 dan Gambar 4. 98.

Ikatan-ikatan *interlocking* mekanik tersebut, bila diperbanyak dan diperbesar akan sangat membantu dalam meningkatkan sifat mekanik komposit karbon-karbon.

Proses yang terjadi pada struktur mikro di dalam komposit karbon-karbon yang berpengaruh terhadap sifat mekanik, sifat fisik dan sifat elektrik ditunjukkan pada sketsa Gambar 4. 103.



Gambar 4. 103. Sketsa struktur mikro ikatan serbuk karbon dan matriks di dalam komposit karbon-karbon

Teknik yang disarankan untuk meningkatkan ikatan *interlocking* mekanik dengan cara menutup atau mengisi rongga-rongga pori dalam komposit dengan cara proses reimpregnasi dan karbonisasi berulang-ulang. Teknik yang disarankan untuk meningkatkan kekuatan ikatan antarmuka antara serbuk dan matriks dengan cara meningkatkan kekasaran permukaan butiran serbuk, meningkatkan rongga permukaan butiran serbuk, sehingga dapat meyerap matriks. Teknik ini akan meningkatkan sifat mekanik secara keseluruhan komposit karbon-karbon.



## BAB 5 KESIMPULAN

1. Temperatur tekan panas meningkat, laju aus menurun, komposit makin tahan aus, ini terjadi pada komposit karbon-karbon dari serbuk karbon batubara dengan matriks *coal tar pitch*.
2. Persentase berat kandungan serbuk karbon batubara meningkat, nilai kekerasan turun, komposit semakin lunak, laju aus meningkat. Persentase berat kandungan karbon cangkang kelapa meningkat, laju aus turun, komposit makin keras. Ukuran serbuk semakin kecil, laju aus cenderung turun. Nilai laju aus terbaik (paling rendah) adalah  $0,056 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ , dihasilkan oleh komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi karbon batubara 60% dan karbon cangkang kelapa 40%, pada ukuran serbuk mesh 200.
3. Persentase berat kandungan serbuk karbon cangkang kelapa meningkat, kekuatan impak Charpy meningkat, komposit semakin tangguh. Ukuran serbuk karbon semakin kecil, kekuatan impak Charpy meningkat. Nilai kekuatan impak Charpy tertinggi adalah  $0,95 \text{ kJ/m}^2$ , dihasilkan oleh komposit karbon-karbon dengan rasio komposisi karbon batubara 60% dan karbon cangkang kelapa 40%, pada ukuran serbuk mesh 200.
4. Konduktivitas elektrik tertinggi adalah  $3,4 \text{ S/m}$ , dihasilkan oleh komposit dengan rasio komposisi serbuk karbon batubara 80% dan serbuk karbon cangkang kelapa 20%, pada ukuran serbuk karbon mesh 150. Ukuran serbuk karbon semakin kecil, konduktivitas elektrik cenderung tidak stabil, pada ukuran tertentu meningkat, sementara ukuran berikutnya cenderung menurun. Persentase berat kandungan serbuk karbon batubara meningkat, konduktivitas elektrik cenderung meningkat.

## DAFTAR REFERENSI

- [1] Mazumdar, S.K., 2002, COMPOSITES MANUFACTURING: Materials, Product, and Process Engineering
- [2] ASM, 2001, Composites, ASM Handbook, Volume 21
- [3] Manocha, L. M., 2003, High performance carbon–carbon composites, *Sadhana* Vol. 28, Parts 1 & 2, pp. 349–358.
- [4] Blanco, C. R. Santamaria, J. Bermejo, R. Menendez, 2000, Pitch-based carbon composites with granular reinforcements for frictional applications, *Carbon* 38,1043–1051
- [5] Douarche, N., D. Rouby , G. Peix , J.M. Jouin, 2001, Relations between X-ray tomography, density and mechanical properties in carbon–carbon composites, *Carbon* 39, 1455–1465
- [6] Chen, T., J. Liao, G. Liu, F. Zhang, Q. Gong, 2003, Effects of needle-punched felt structure on the mechanical properties of carbon/carbon composites, *Carbon* 41, 993–999
- [7] Mendez, A., R. Santamaria, R. Menendez , J. Bermejo, 2001, Influence of granular carbons on the pyrolysis behaviour of coal-tar pitches, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 58–59, 825–840
- [8] Mendez, A., R. Santamaria, M. Granda, T. Morgan, A.A. Herod, R. Kandiyoti, R. Menendez, 2003, Influence of granular carbons on pitch properties, *Fuel* 82, 1241–1250
- [9] Kim, J. W., H. G. Kim, D. G. Lee, 2004, Compaction of thick carbon/phenolic fabric composites with autoclave method, *Composite Structures* 66, 467–477
- [10] Mendez, A., R. Santamaria, M. Granda, R. Menendez, 2005, Preparation and characterisation of pitch-based granular composites to be used in tribological applications, *Wear* 258, 1706–1716
- [11] Gupta, G., A. D. Rey, 2005, Texture modeling in carbon–carbon composites based on mesophase precursor matrices, *Carbon* 43, 1400–1406

- [12] Chen, T., W. Gong, G. Liu, F. Zhang, 2005, Influence of graphite foils on I-CVI densification rate and microstructure of obtained pyrolytic carbon of carbon-carbon composites, *Composites: Part A* 36, 1494–1498
- [13] Su, F. H., Z. Z. Zhang, K. Wang, W. Jiang, W. M. Liu, 2005, Tribological and mechanical properties of the composites made of carbon fabrics modified with various methods, *Composites: Part A* 36, 1601–1607
- [14] Su, F.H., Z. Z. Zhang, W. M. Liu, 2006, Mechanical and tribological properties of carbon fabric composites filled with several nano-particulates, *Wear* 260, 861–868
- [15] Manocha, L.M., A. Warriar, S. Manocha, D. Sathiyamoorthy, S. Banerjee, 2006, Thermophysical properties of densified pitch based carbon/carbon materials—I. Unidirectional composites, *Carbon* 44, 480–487
- [16] Manocha, L.M., A. Warriar, S. Manocha, D. Sathiyamoorthy, S. Banerjee, 2006, Thermophysical properties of densified pitch based carbon/carbon materials—II. Bidirectional composites, *Carbon* 44, 488–495
- [17] Ling-jun, G., L. He-jun, L. K. Zhi, W. Chuang, 2008, Effect of granular reinforcements on the properties of pitch-based carbon composites, *New Carbon Materials*, 23(1): 51–57
- [18] Petraconi, G., A. Mikhailovich Essiptchouk, L. I. Charakhovski, C. Otani, H. S. Maciel, R. S. Pessoa, M. L. Gregori, S. F. Costa, 2010, Degradation of carbon-based materials under ablative conditions produced by a high enthalpy plasma jet, *Journal of Aerospace Technology and Management*, V. 2, n. 1, 33 – 40
- [19] He J. L., Z. Lei-Lei, L. J. Hua, L. K. Zhi, F. Q. Gang, Z. Xue-Ni, C. Sheng, 2010, Wear Mechanism of Biomedical Carbon/Carbon Composites for Artificial Hip Joints, *Journal of Inorganic Materials*, Vol. 25 No. 9, 999-1002
- [20] Palaninathan, R. 2010, Behavior of Carbon-Carbon Composite under Intense Heating, *International Journal of Aerospace Engineering*, Volume 2010, 7 pages
- [21] Kalaitzidou, K., H. Fukushima and L. T. Drzal, 2010, A Route for Polymer Nanocomposites with Engineered Electrical Conductivity and Percolation Threshold, *Materials*, 3, 1089-1103
- [22] Kamonsawas, J., A. Sirivat, S. Niamlang, P. Hormnirun and W. P. Ouajai, 2010, Electrical Conductivity Response of Poly (Phenylenevinylene)/ Zeolite Composites Exposed to Ammonium Nitrate, *Sensors*, 10, 5590-5603

- [23] Goto, H., 2011, Electrically conducting paper from a polyaniline/pulp composite and paper folding art work for a 3D object, *Textile Research Journal* 81(2), 122–127
- [24] Tangboriboon, N., N. Uttanawanit, M. Longtong, P. Wongpinthong, A. Sirivat, R. Kunanuruksapong, 2010, Electrical and Electrorheological Properties of Alumina/Natural Rubber (STR XL) Composites, *Materials*, 3, 656-671
- [25] Sancaktar, E. and L. Bai, 2011, Electrically Conductive Epoxy Adhesives, *Polymers*, 3, 427-466
- [26] Shen, L., J. Li, B. M. Liaw, F. Delale, J. H. Chung, 2007, Modeling and analysis of the electrical resistance measurement of carbon fiber polymer–matrix composites, *Composites Science and Technology* 67, 2513–2520
- [27] Celzard, A., J.F. Mareche, F. Payot, G. Furdin, 2002, Electrical conductivity of carbonaceous powders, *Carbon* 40, 2801–2815
- [28] Harper, C. A., 2004, *Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites*, Fourth Edition, The McGraw-Hill Companies.
- [29] Levashov, E., V. Kurbatkina and Z. Alexandr, 2010, Improved Mechanical and Tribological Properties of Metal-Matrix Composites Dispersion-Strengthened by Nanoparticles, *Materials*, 3, 97-109
- [30] “Bond Lengths and Energies”, 2012, [<http://www.science.uwaterloo.ca/~cchieh/cact/c120/bondel.html>]
- [31] Skoog, D. A., F. James Holler, T. A. Nieman, 1998, *Principles of Instrumental analysis*, Fifth edition
- [32] Lower, S., 2007, *Molecules and the properties of bonded atoms*
- [33] Tai, N. H., H. H. Kuo, J. H. Chern Lin, C. P. JU, 2002, Mechanical and tribological properties of 2-D carbon/carbon composites densified through pulse chemical vapor infiltration, *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE* 37, 3693 – 3703
- [34] He, Y. G., K. Z. Li, H. J. Li, J. F. Wei, Q. G. Fu, D. S. Zhang, 2010, Effect of interface structures on the fracture behavior of two-dimensional carbon/carbon composites by isothermal chemical vapor infiltration, *J Mater Sci*, 45:1432–1437
- [35] Kravetskii, G. A., V. V. Rodionova, Yu. M. Dvoryanchikov, and S. A. Kolesnikov, 2007, Carbon-ceramic Composite Materials With Protective Erosion-Resistant Coatings, *Refractories and Industrial Ceramics*, Vol. 48, No. 1, 57-62

- [36] Wróbel, G., Z. Rdzawski, G. Muzia, S. Pawlak, 2009, The application of transient thermography for the thermal characterisation of carbon fibre/epoxy composites, *Journal of Achievement in Materials and Manufacturing Engineering*, Volume 36
- [37] Zhang, X. R., X. Q. Pei, Q. H. Wang, 2007, The effect of fiber oxidation on the friction and wear behaviors of short-cut carbon fiber/polyimide composites, *EXPRESS Polymer Letters* Vol.1, No.5, 318–325
- [38] Dagli, L. and Y. Remond, 2002, Identification of the Non-linear Behaviour a 4D Carbon–Carbon Material Designed for Aeronautic Application, *Applied Composite Materials* 9: 1–15
- [39] Howling, G. I., E. Ingham, H. Sakoda, T. D. Stewart, J. Fisher, A. Antonarulajah, S. Appleyard, B. Rand, 2004, Carbon-carbon composite bearing materials in hip arthroplasty: analysis of wear and biological response to wear debris, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 15, 91-98
- [40] Corb, I., F. Manea, C. Radovan, A. Pop, G. Burtica, P. Malchev, S. Picken, J. Schoonman, 2007, Carbon-based Composite Electrodes: Preparation, Characterization and Application in Electroanalysis, *Sensors*, 7, 2626-2635
- [41] Blanco, C., R. Santamaria, J. Bermejo, R. Menendez, 2000, A comparative study of air-blown and thermally treated coal-tar pitches, *Carbon*, 38, 517–523
- [42] Guillen, M. D., A. Dominguez, M. J. Iglesias, E. Fuente and C. G. Blanco, 1996, Analysis of coal tar pitch: relations between thermal behaviour and composition, *Fuel* Vol. 75, No. 9, 1101-1107
- [43] Blanco, C., J. Bermejo, H. Marsh, R. Menendez, 1997, Chemical and physical properties of carbon as related to brake performance, *Wear* 213, 1-12
- [44] Mora, E., R. Santamaria, C. Blanco, M. Granda, R. Menendez, 2003, Mesophase development in petroleum and coal tar pitches and their blends, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 68-69, 409-424
- [45] Blanco, C., V. Prada, R. Santamaria, J. Bermejo, R. Menendez, 2002, Pyrolysis behaviour of mesophase and isotropic phases isolated from the same pitch, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 63, 251–265
- [46] Akinci, A., 2009, Mechanical and structural properties of polypropylene composites filled with graphite flakes, *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol.35, issue 2, 91-94

- [47] Dhami, T. L., O. P. Bahl, and P. K. Jain, 1995, Carbon-carbon Composite Made with Oxidised Pan (Panex) Fibers, *Carbon* Vol. 33, No 11, 1517-1524
- [48] Venkat, M. R., P. Mahajan, R.K. Mittal, 2008, Effect of architecture on mechanical properties of carbon/carbon composites, *Composite Structures* 83, 131–142
- [49] Chen, W., Y. Yu, P. Li, C. Wang, T. Zhou, X. Yang, 2007, Effect of new epoxy matrix for T800 carbon fiber/epoxy filament wound composites, *Composites Science and Technology* 67, 2261–2270
- [50] Park, S. J., M. K. Seo, J. R. Lee, 2002, Effect of oxidation inhibitor on the low energy tribological behavior of carbon–carbon composites, *Carbon* 40, 835–843
- [51] Dwivedi, H. , R. B. Mathur, T. L. Dhama, O. P. Bahl, M. Monthieux, S. P. Sharma, 2006, Evidence for the benefit of adding a carbon interphase in an all-carbon composite, *Carbon* 44, 699–709
- [52] Ko, T. H., W. S. Kuob, Y. H. Chang, 2003, Influence of carbon-fiber felts on the development of carbon–carbon composites, *Composites: Part A* 34, 393–401
- [53] Tzeng, S. S., W. C. Lin, 1999, Mechanical behavior of two-dimensional carbon/carbon composites with interfacial carbon layers, *Carbon* 37, 2011–2019
- [54] Park, S. J. , M. K. Seo , D. R. Lee, 2003, Studies on the mechanical and mechanical interfacial properties of carbon–carbon composites impregnated with an oxidation inhibitor, *Carbon* 41, 2991–3002
- [55] Shin, H. K., H. B. Lee, K. S. Kim, 2001, Tribological properties of pitch-based 2-D carbon–carbon composites, *Carbon* 39, 959–970
- [56] Appleyard, S.P., B. Rand, 2002, The effect of fiber–matrix interactions on structure and property changes during the fabrication of unidirectional carbon/carbon composites, *Carbon* 40, 817–834
- [57] Senet, S., R. E. Grimes, K. W. White, 1993, Effect of microstructure on elevated temperature fracture behavior of two dimensional carbon/carbon composites, *Journal of materials science* 28, 2049–2060