



KARBONISASI LIMBAH PADAT KELAPA SAWIT DENGAN TEKNIK PIROLISIS PLASMA

RADEN IBRAHIM PURAWIARDI



**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



IPB University

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Karbonisasi Limbah Padat Kelapa Sawit dengan Teknik Pirolisis Plasma” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, November Tahun 2025

Raden Ibrahim Purawiardi
G7601222004

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



RINGKASAN

RADEN IBRAHIM PURAWIARDI. Karbonisasi Limbah Padat Kelapa Sawit dengan Teknik Pirolisis Plasma. Dibimbing oleh AKHIRUDDIN MADDU, YESSIE WIDYA SARI dan ARBI DIMYATI.

Melimpahnya produksi *crude palm oil* (CPO) di Indonesia memiliki salah satu dampak negatif. Dampak negatif tersebut adalah melimpahnya pula limbah-limbah padat kelapa sawit dalam bentuk biomassa-biomassa berupa tandan kosong (EFB), cangkang kernel kosong (PKS), pelepah (OPF), dan batang (OPT). Biomassa limbah-limbah padat ini sebetulnya masih dapat diolah kembali menjadi material karbon, namun umumnya proses karbonisasi yang dilakukan melalui proses pirolisis konvensional hanya mampu menghasilkan satu jenis alotrop karbon saja, yaitu amorf, serta membutuhkan waktu proses yang berjam-jam. Studi ini mencoba untuk memperkenalkan metode karbonisasi dengan durasi proses yang lebih cepat dalam hitungan menit dan menghasilkan alotrop-alotrop karbon kristalin yang lebih bervariasi. Metode yang digunakan adalah dengan menggunakan teknik pirolisis plasma atmosferik.

Dengan teknik ini, suhu dekomposisi yang dihasilkan dapat mencapai kisaran rentang 2 212 °C hingga 4 482 °C sehingga dapat menciptakan proses dekomposisi thermal secara lebih cepat dibandingkan dengan pirolisis konvensional. Pirolisis plasma yang digunakan dibangkitkan dari sumber arus listrik searah (DC) dengan potensial tetap 12 V dan variasi arus pada rentang 20 A hingga 80 A. Sumber plasma yang digunakan adalah gas argon (Ar) dengan kemurnian di atas 99 %. Hasil studi menunjukkan bahwa alotrop grafitik, turbostratik, dan karbon dengan tipe hibridisasi sp^3 dapat disintesis dengan metode ini. Alotrop grafitik dapat dihasilkan dari bagian pelepah dan batang, sedangkan alotrop turbostratik dapat dihasilkan dari bagian cangkang kernel kosong. Sementara itu, alotrop karbon dengan tipe hibridisasi sp^3 dapat dihasilkan dari tandan kosong. Keunikan ditemukan pada alotrop turbostratik yang disintesis dari cangkang kernel kosong, dimana selain berstruktur turbostratik juga memiliki morfologi yang berpori (mesopori). Keunikan lain juga ditemukan pada hasil sintesis dari tandan kosong dimana dengan variasi arus 60 A, 75 A, dan 80 A yang dapat menghasilkan alotrop-alotrop sp^3 dengan variasi struktur kristal monoklinik, kubik primitif, dan tetragonal.

Metode tiga tahap juga dilakukan pada studi ini, yaitu pelepah dan batang sawit dikonversi terlebih dahulu menjadi *bio-oil* lalu dikonversi lanjut menjadi jelaga (*soot*) dengan rentang suhu pembakaran 1 300 - 1 600 °C. Prekursor *soot* ini kemudian dipirolisis plasma dengan variasi arus 20 A, 40 A, 60 A, dan 80 A. Hasil dari sintesis tiga tahap ini adalah menghasilkan produk *carbon black* dengan rentang *grade* N990 hingga N110. Dengan hasil studi yang menunjukkan variasi alotrop karbon yang jauh lebih banyak dihasilkan melalui proses pirolisis plasma, maka potensi aplikasi dari karbon-karbon yang dihasilkan dari proses pirolisis plasma akan jauh lebih luas dibandingkan dengan karbon amorf yang dihasilkan dari proses pirolisis konvensional.

Kata kunci: karbon, sawit, pirolisis, plasma, *carbon black*.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



SUMMARY

RADEN IBRAHIM PURAWIARDI. *Carbonization of Oil Palm Solid Wastes via Plasma-assisted Pyrolysis*. Supervised by AKHIRUDDIN MADDU, YESSIE WIDYA SARI and ARBI DIMYATI.

The abundance of crude palm oil (CPO) production in Indonesia has one of the negative impacts. This negative impact is also the abundance of oil palm solid wastes in the form of oil palm empty fruit bunches (EFB), oil palm empty kernel shells (PKS), oil palm fronds (OPF), and oil palm trunks (OPT). These biomasses can actually still be utilized into carbon-based materials. In general, the carbonization process conducted through the conventional pyrolysis process and yielded only a type of amorphous carbon allotrope. This common process requires some hours of processing time. This study aims to introduce a carbonization method with a faster process duration of a few minutes and produce more varied allotropes of crystalline carbon. This proposed method is atmospheric plasma-assisted pyrolysis technique.

By using this technique, the temperature of decomposition can reach a range of 2 212 °C to 4 482 °C so that it can conduct a flash thermal decomposition process faster than conventional pyrolysis. The plasma torch used is generated from a direct current (DC) source with a fixed potential of 12 V and current variations in the range of 20 A to 80 A. The plasma source used is high purity argon (Ar) gas with a purity above 99%. The results of the study show that graphitic, turbostratic, and sp^3 carbon allotropes can be synthesized by this method. Graphitic allotropes can be produced from OPF and OPT, while turbostratic allotropes can be produced from PKS. Meanwhile, sp^3 carbon allotropes can be obtained from EFB. The uniqueness is found in the structure of turbostratic which is synthesized from PKS, which in addition to having a turbostratic structure also has a mesoporous morphology. Another uniqueness is also found in the synthesis of EFB where with current variations of 60 A, 75 A, and 80 A can produce sp^3 allotropes with variations in monoclinic, primitive cubic, and tetragonal crystal structures.

A three-stage method was also conducted in this study, i.e., OPF and OPT biomasses were first converted into bio-oil and then converted into soot with a combustion temperature of 1 300 - 1 600 °C. This soot precursor is then pyrolyzed by using plasma-assisted pyrolysis with current variations of 20 A, 40 A, 60 A, and 80 A. The result of this three-stage synthesis is to produce carbon black products with N990 – N110 grades. With the results of the study showing that the variation of carbon allotropes is much more produced through the plasma-assisted pyrolysis process, the potential application of carbons produced from the plasma-assisted pyrolysis process will be much wider than the amorphous carbon produced from the conventional pyrolysis process.

Keywords: carbon, oil palm, pyrolysis, plasma, carbon black.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2025
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.



IPB University

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



KARBONISASI LIMBAH PADAT KELAPA SAWIT DENGAN TEKNIK PIROLISIS PLASMA

RADEN IBRAHIM PURAWIARDI

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Fisika

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Dr.rer.nat. Hendradi Hardhienata, S.Si., M.Si.
- 2 Prof. Murni Handayani, S.Si., M.Sc., Ph.D.

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Prof. Murni Handayani, S.Si., M.Sc., Ph.D.
- 2 Dr. Mulyadi Sinung Harjono, Dipl.-Ing., M.T., IPU

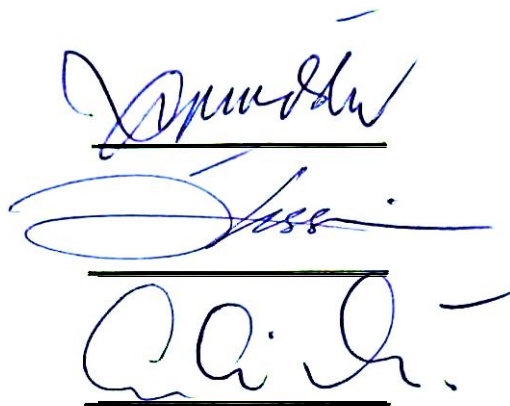
Judul Disertasi : Karbonisasi Limbah Padat Kelapa Sawit dengan
Teknik Pirolisis Plasma
Nama : Raden Ibrahim Purawiardi
NIM : G7601222004

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Akhiruddin Maddu, S.Si., M.Si.

Pembimbing 2:
Dr. Yessie Widya Sari, S.Si., M.Si.

Pembimbing 3:
Dr-Ing. Arbi Dimyati



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Husin Alatas, S.Si., M.Si.
NIP. 197106041998021001

Dekan Fakultas Matematika dan
Ilmu Pengetahuan Alam:
Dr. Berry Juliandi, S.Si., M.Si.
NIP. 197807232007011001



Tanggal Ujian: 6 November 2025

Tanggal Lulus:



IPB University

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah swt. atas segala petunjuk-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan November 2022 sampai dengan bulan Februari 2025 ini ialah pengolahan kembali limbah padat dari biomassa kelapa sawit, dengan judul “Karbonisasi Limbah Padat Kelapa Sawit dengan Teknik Pirolisis Plasma”.

Ucapan terima kasih sebesar-besarnya penulis ucapkan kepada para komisi pembimbing yaitu Prof. Dr. Akhiruddin Maddu (promotor utama), Dr. Yessie Widya Sari (co-promotor), dan Dr-Ing. Arbi Dimyati (co-promotor) yang telah bersedia membimbing, mengarahkan, dan banyak memberikan saran. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada para pimpinan sidang yaitu Dr. Akhmad Faqih (sidang tertutup) dan Prof. Dr. Ir. Yanto Santosa (sidang terbuka), serta para penguji di luar komisi pembimbing, yaitu Dr.rer.nat. Hendradi Hardhienata, Prof. Dr. Murni Handayani, dan Dr. Mulyadi Sinung Harjono. Di samping itu, penghargaan juga penulis sampaikan kepada Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang telah mendukung studi doktoral ini melalui program pendanaan *Degree by Research* (DbR) dan juga kepada rekan-rekan di kelompok riset berkas plasma, Pusat Riset Teknologi Analisis Berkas Nuklir, BRIN khususnya Airine Hijrah Handayani, M.Si.; Ucock Johan Anjasmoro, M.Si.; Agus Sunardi, S.ST.; dan Rohmad Salam, S.ST. yang telah banyak membantu selama pengumpulan data di laboratorium plasma *center* BRIN. Ungkapan terima kasih secara khusus juga disampaikan kepada kelompok riset *waste to energy*, Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi, BRIN khususnya Ir. Agus Kismanto, M.Sc.; Dr. Prima Zuldian; Oni Fariza, M.T.; Nina Konitat Supriatna, M.T.; Arie Basuki, A.Md.; Ir. Alfonsus Agus Raksodewanto, M.T. (alm.); Dr. Nabila Aprianti; Fahrudin Joko Ermada, S.T.; Ir. Samdi Yarsono, M.T.; Lan Nainggolan, M.M.SI. dan Prof. Dr. Ir. Rizal Alamsyah atas diskusi dan dukungan fasilitas dalam proses konversi OPT dan OPF menjadi prekursor *bio-oil*.

Akhir kata, semoga karya ilmiah yang sederhana dan jauh dari kata sempurna ini dapat memberikan manfaat bagi pihak yang membutuhkan inspirasi riset berbasis konversi biomassa dan juga memberikan dampak positif bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, November 2025

R. Ibrahim Purawiardi



IPB University

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR LAMPIRAN	xxv
DAFTAR SINGKATAN	xxvii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah dan Pertanyaan Riset	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	4
1.5 Ruang Lingkup	4
1.6 Kebaruan	4
1.7 Hipotesis	5
II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Limbah Padat Kelapa Sawit	7
2.1.1. Anatomi Pohon Kelapa Sawit	7
2.1.2. Komposisi Limbah Padat Kelapa Sawit Berdasarkan Uji Proksimat	8
2.1.3. Komposisi Limbah Padat Kelapa Sawit Berdasarkan Uji Ultimat	8
2.1.4. Komposisi Limbah Padat Kelapa Sawit Berdasarkan Kandungan Lignoselulosik	9
2.2 Karbon Berdasarkan Struktur Kristalnya	10
2.2.1. Grafit, Lonsdelit, Intan, dan Karbon Amorf	10
2.2.2. Alotrop Karbon Peralihan	11
2.2.3. Alotrop Grafitik	13
2.3 <i>Carbon Black</i>	16
2.3.1. Morfologi <i>Carbon Black</i>	16
2.3.2. Spesifikasi <i>Carbon Black</i>	17
2.3.3. Teknik Produksi <i>Carbon Black</i>	18
2.4 Teknologi Plasma	18
2.4.1. Prinsip Kerja Plasma Argon	18
2.4.2. Aplikasi Teknologi Plasma	21
2.4.3. Peluang Aplikasi Teknologi Plasma untuk Konversi Limbah Padat Kelapa Sawit	22
III METODE	23
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	23
3.1.1. Waktu Penelitian	23
3.1.2. Tempat Penelitian	23
3.2 Alat dan Bahan	23
3.2.1. Alat (Reaktor)	23
3.2.2. Bahan	25
3.3 Prosedur Kerja	26
3.3.1. Persiapan Bahan	26



3.3.2. Metode Satu Tahap	27
3.3.3. Metode Tiga Tahap	28
3.4 Analisis data	29
3.4.1. Analisis Produk Karbon Kristalin (Hasil Metode Satu Tahap)	29
3.4.2. Analisis Produk <i>Carbon Black</i> (Hasil Metode Tiga Tahap)	29
3.4.3. Parameter Pengujian	30
IV ESTIMASI TEMPERATUR BUSUR PLASMA	31
4.1 Pendahuluan	31
4.2 Metode Eksperimen	31
4.3 Model Matematika dari Metode Numerik	32
4.4 Solusi dan Parameter Awal dari Metode Numerik	34
4.5 Kombinasi Metode Eksperimen dan Metode Numerik	35
4.6 Hasil dan Pembahasan	37
4.7 Simpulan	38
V SINTESIS KARBON DARI LIMBAH PADAT KELAPA SAWIT DENGAN TEKNIK PIROLISIS PLASMA: STUDI AWAL DAN TINJAUAN RENDEMEN	39
5.1 Pendahuluan	39
5.2 Metodologi	40
5.2.1. Bahan dan Metode	40
5.2.2. Karakterisasi	40
5.2.3. Analisis Struktur Kristal	40
5.3 Hasil dan Pembahasan	41
5.3.1. Analisis Spektroskopi Raman	41
5.3.2. Analisis TEM	42
5.3.3. Analisis XRD	43
5.3.4. Analisis FTIR	47
5.3.5. Analisis SEM/EDX	48
5.3.6. Rendemen	49
5.4 Simpulan	50
VI ALOTROP TURBOSTRATIK DARI LIMBAH CANGKANG KERNEL KELAPA SAWIT	53
6.1 Pendahuluan	53
6.2 Metodologi	55
6.2.1. Bahan dan Metode	55
6.2.2. Karakterisasi	55
6.3 Hasil dan Pembahasan	56
6.3.1. Analisis Spektroskopi Raman	56
6.3.2. Analisis XRD	56
6.3.3. Analisis SAED-TEM	57
6.3.4. Analisis TEM <i>Imaging</i>	59
6.3.5. Analisis SEM/EDX dan BET	61
6.3.6. Analisis FTIR	63
6.3.7. Pendugaan Dekomposisi Selulosa dan Grafitisasi	64
6.3.8. Pendugaan Dekomposisi Lignin	67
6.3.9. Rendemen	73

6.4	Potensi Sebagai Material <i>Cofiring</i> Batubara	73
6.5	Simpulan	74

VII	ALOTROP KARBON sp^3 DARI LIMBAH TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT	75
7.1	Pendahuluan	75
7.2	Metodologi	77
	7.2.1. Bahan dan Metode	77
	7.2.2. Karakterisasi	78
	7.2.3. Analisis Struktur Kristal	78
7.3	Hasil dan Pembahasan	79
	7.3.1. Analisis Spektroskopi Raman	79
	7.3.2. Analisis SAED-TEM	80
	7.3.3. Analisis XRD	82
	7.3.4. Analisis FTIR	86
	7.3.5. Transformasi dan Diagram Fasa	91
	7.3.6. Karakteristik Alotrop sp^3	94
7.4	Potensi Aplikasi	95
	7.4.1. Preparasi Sampel	95
	7.4.2. Perlakuan Plasma dan Karakterisasi	95
	7.4.3. Hasil dan Analisis	95
7.5	Simpulan	103

VIII	SINTESIS <i>CARBON BLACK</i> DARI LIMBAH PELEPAH DAN BATANG KELAPA SAWIT MENGGUNAKAN METODE TIGA TAHAP	105
8.1	Pendahuluan	105
8.2	Metodologi	106
	8.2.1. Bahan dan Metode	106
	8.2.2. Karakterisasi	106
8.3	Konversi Limbah Padat OPF dan OPT Menjadi <i>Bio-Oil</i>	106
8.4	Konversi <i>Bio-Oil</i> Menjadi <i>Soot</i>	107
8.5	Konversi <i>Soot</i> Menjadi <i>Carbon Black</i>	109
	8.5.1. Analisis Rendemen dan Pendugaan Reaksi	109
	8.5.2. Analisis Spektroskopi Raman	110
	8.5.3. Analisis TEM	112
	8.5.4. Analisis BET	114
	8.5.5. Analisis PSA Mikro	117
	8.5.6. Analisis FTIR dan Pendugaan Disosiasi	119
8.6	Komparasi Pirolisis Plasma dan Pirolisis Konvensional	120
8.7	Simpulan	123

IX	SIMPULAN UMUM DAN SARAN	125
9.1	Simpulan Umum	125
9.2	Saran	125

DAFTAR PUBLIKASI	127
------------------	-----

DAFTAR PUSTAKA	129
----------------	-----

LAMPIRAN	141
----------	-----

RIWAYAT HIDUP	191
---------------	-----



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR TABEL

1	Komposisi limbah-limbah padat kelapa sawit yang digunakan di dalam studi	5
2	Komposisi limbah-limbah padat kelapa sawit berdasarkan pengujian proksimat	8
3	Komposisi limbah-limbah padat kelapa sawit berdasarkan pengujian ultimat	9
4	Komposisi limbah padat kelapa sawit berdasarkan uji kandungan lignoselulosik	9
5	Beberapa alotrop peralihan dengan hibridisasi sp^3	13
6	Spesifikasi (<i>grade</i>) dari <i>carbon black</i> berdasarkan standard ASTM	17
7	Parameter-parameter pengujian dalam karakterisasi	30
8	Hasil perhitungan estimasi temperatur busur plasma pada sistem reaktor plasma DC yang digunakan pada studi ini	38
9	Hasil perhitungan rendemen produk padat pirolisis plasma dari bahan baku limbah padat OPF	49
10	Hasil perhitungan rendemen produk padat pirolisis plasma dari bahan baku limbah padat EFB	49
11	Hasil perhitungan rendemen produk padat pirolisis plasma dari bahan baku limbah padat OPT	50
12	Hasil perhitungan rendemen produk padat pirolisis plasma dari bahan baku limbah padat PKS	50
13	Hasil analisis SAED-TEM sampel karbon dari PKS	58
14	Hasil perhitungan parameter kisi struktur heksagonal sampel-sampel produk karbon dari limbah padat PKS	59
15	Hasil analisis BJH dan N_2 <i>surface area</i> dengan BET	62
16	Komposisi unsur hasil EDX <i>mapping</i> pada sampel produk karbon dari PKS	62
17	Energi ikatan pada beberapa ikatan kovalen	63
18	Hasil perhitungan rendemen dari bahan baku limbah PKS	72
19	Hasil analisis nilai kalor dan spesifikasi batubaranya	74
20	Alotrop karbon dengan hibridisasi sp^3 yang disintesis dari limbah EFB	94
21	Ringkasan hasil kalkulasi struktur kristal dan parameter kisi Fe-0.03C	98
22	Hasil analisis koordinat atom Fe dan C pada fasa <i>cementite</i>	98
23	Hasil analisis koordinat atom Fe pada struktur kristal kubik	99
24	Hasil pengujian ultimat limbah OPF, limbah OPT, <i>bio-oil</i> , dan <i>biochar</i>	103
25	Hasil pengujian ultimat produk padat <i>soot</i>	104
26	Perbandingan <i>carbon black</i> antara hasil pirolisis plasma dan pirolisis konvensional	123

DAFTAR GAMBAR

1	Diagram fasa karbon	4
2	Ilustrasi singkat anatomi tanaman kelapa sawit (<i>Elaeis guineensis</i>)	7



3	Ilustrasi susunan periodik atom yang menyusun <i>graphite</i> , <i>lonsdaleite</i> , dan <i>diamond</i> dari sudut pandang {001}	10
4	Bagan transformasi fasa karbon	11
5	Ilustrasi turbostratik	12
6	Ilustrasi <i>graphene</i> dan <i>graphite</i>	14
7	Ilustrasi pembagian alotrop karbon grafitik berdasarkan dimensinya	14
8	Ilustrasi ikatan kimia grafitik oksida	15
9	Tipe-tipe morfologi <i>carbon black</i>	17
10	Struktur atom Ar yang terdiri dari proton dan dikelilingi oleh elektron-elektron	19
11	Ilustrasi proses tumbukan elektron dari medan listrik yang menumbuk elektron Ar di 1s	20
12	Ilustrasi proses tumbukan elektron dari medan listrik yang menumbuk elektron Ar di 3p	20
13	Prinsip kerja dari generator plasma	21
14	Sistem reaktor plasma DC	23
15	Disain struktural reaktor <i>spray combustion</i>	24
16	Skema proses <i>spray combustion</i>	24
17	Sistem reaktor pirolisis konvensional	25
18	Prosedur persiapan bahan	26
19	Prosedur metode satu tahap	27
20	Prosedur metode tiga tahap	28
21	Krusibel grafit sebagai <i>holder</i> sampel uji	31
22	Mekanisme pengukuran temperatur dinding luar krusibel grafit	32
23	Pola pembagian titik hitung (titik hitam) dan jarak (x) pada sampel uji	33
24	Disain pendiskretan dinding krusibel grafit yang memiliki tebal 5 mm	35
25	Grafik perubahan nilai T_4 terhadap perubahan waktu (t)	36
26	Kurva kalibrasi temperatur busur plasma	37
27	Pola spektrum Raman pada produk padat hasil pirolisis plasma	41
28	Hasil karakterisasi TEM berupa <i>imaging</i> (bagian atas) dan pola SAED (bagian bawah) pada produk padat pirolisis plasma	42
29	Pola-pola difraksi sampel produk padat pirolisis plasma dari berbagai bahan baku limbah padat kelapa sawit	44
30	Simulasi struktur kristal heksagonal pada produk padat pirolisis plasma dari bahan baku limbah pelepah kelapa sawit (OPF)	45
31	Simulasi struktur kristal kubik pada produk padat pirolisis plasma dari bahan baku limbah tandan kosong kelapa sawit (EFB)	45
32	Simulasi struktur kristal heksagonal pada produk padat pirolisis plasma dari bahan baku limbah batang pohon kelapa sawit (OPT)	46
33	Pola spektrum FTIR dari sampel-sampel produk padat pirolisis plasma dengan variasi bahan baku limbah padat kelapa sawit	47
34	Citra SEM dan EDX <i>mapping</i> pada sampel produk padat pirolisis plasma dari bahan baku OPF	48
35	Hasil kuantifikasi EDX <i>mapping</i> dengan unsur-unsur C dan O	48
36	Alur proses konversi limbah padat PKS dengan pirolisis plasma	54
37	Pola spektrum Raman pada sampel produk padat karbon dari limbah PKS	55



38	Pola difraksi sinar-x pada sampel produk padat karbon dari limbah PKS	56
39	Pola SAED-TEM pada sampel produk padat karbon dari limbah PKS	58
40	Hasil TEM <i>imaging</i> pada sampel produk padat karbon dari limbah PKS	60
41	Ilustrasi proses transformasi dari amorf ke <i>disordered crystalline</i>	60
42	Gambar morfologi produk padat karbon dari limbah PKS	61
43	Hasil analisis ukuran radius pori (r_p) dengan metode BJH pada sampel alotrop turbostratik	62
44	Hasil karakterisasi FTIR pada produk padat karbon dari limbah PKS	62
45	Ilustrasi struktur kimia dari selulosa	63
46	Ilustrasi proses disosiasi selulosa selama proses pirolisis plasma	64
47	Ilustrasi proses hibridisasi yang membentuk material karbon	65
48	Ilustrasi proses grafitisasi dari struktur aromatik hasil dekomposisi selulosa	66
49	Variasi struktur lignol yang merupakan prekursor dari lignin	67
50	Ilustrasi proses disosiasi lignol tipe H	68
51	Ilustrasi proses hibridisasi spontan setelah disosiasi lignol tipe H berakhir	68
52	Ilustrasi proses disosiasi lignol tipe G	69
53	Ilustrasi proses hibridisasi spontan setelah disosiasi lignol tipe G berakhir	69
54	Ilustrasi proses disosiasi lignol tipe S	70
55	Ilustrasi proses hibridisasi spontan setelah disosiasi lignol tipe S berakhir	70
56	Struktur kimia akhir setelah proses spontan hibridisasi dari prekursor lignol	71
57	Pola spektrum Raman produk padat pirolisis plasma dari bahan baku limbah EFB	79
58	Pola SAED-TEM zona <i>axes</i> {001} pada produk padat pirolisis plasma dari EFB dengan perlakuan arus input 60 A	80
59	Pola SAED-TEM zona <i>axes</i> {001} pada produk padat pirolisis plasma dari EFB dengan perlakuan arus input 75 A	81
60	Pola SAED-TEM zona <i>axes</i> {001} pada produk padat pirolisis plasma dari EFB dengan perlakuan arus input 80 A	82
61	Pola difraksi sinar-x produk padat pirolisis plasma dari bahan baku limbah padat EFB	83
62	Ilustrasi struktur kristal monoklinik yang terdeteksi pada sampel produk padat pirolisis plasma dari EFB dengan input arus 60 A	84
63	Ilustrasi struktur kristal kubik primitif ($P4_232$) yang terdeteksi pada sampel produk padat pirolisis plasma dari EFB dengan input arus 75 A	85
64	Ilustrasi struktur kristal tetragonal ($P4_2/mmc$) yang saling <i>overlapping</i> pada sumbu kisi <i>a</i> dan <i>c</i> pada sampel produk pirolisis plasma dengan input arus 80 A	85
65	Hasil karakterisasi FTIR pada produk padat pirolisis plasma dari bahan baku limbah padat EFB	86
66	Ilustrasi struktur berbasis aromatik berdasarkan interpretasi FTIR	87
67	Probabilitas proses dekomposisi dan hibridisasi selulosa pada limbah EFB selama proses pirolisis plasma (probabilitas pertama)	88



68	Probabilitas proses dekomposisi dan hibridisasi selulosa pada limbah EFB selama proses pirolisis plasma (probabilitas kedua)	88
69	Morfologi dari TEM <i>imaging</i> sampel produk padat pirolisis plasma dari bahan baku EFB	89
70	Ilustrasi struktur aromatik pada fraksi amorf produk pirolisis plasma dari EFB dengan rantai yang lebih panjang (arus input 60 A dan 80 A)	90
71	Ilustrasi struktur aromatik pada fraksi disorder produk pirolisis plasma dari EFB dengan rantai yang lebih panjang (arus input 75 A)	91
72	Pola difraksi sinar-x sampel produk pirolisis plasma dari EFB	91
73	Ilustrasi <i>unit-cell</i> struktur kristal heksagonal pada sampel produk padat pirolisis plasma dari EFB menggunakan arus input 20 A	92
74	Ilustrasi <i>unit-cell</i> struktur kristal trigonal pada sampel produk padat pirolisis plasma dari EFB menggunakan arus input 40 A	93
75	Diagram fasa karbon dari bahan baku limbah EFB hasil perlakuan plasma atmosferik menggunakan potensial tetap 12 V dan selang arus (I) 0 - 90 A	93
76	Citra SEM dengan mode BSE <i>compo</i>	96
77	Hasil pengujian nilai kekerasan berbasis metode Vicker (HV)	96
78	Pola difraksi sinar-x pada sampel Fe-0.03C (wt.%)	97
79	Ilustrasi susunan atom Fe pada struktur BCC <i>base metal</i> sebelum perlakuan <i>plasma sintering</i>	99
80	Ilustrasi susunan atom Fe dan <i>cementite</i> (Fe ₄ C ₃) pasca <i>plasma sintering</i> dengan durasi 2 menit	100
81	Ilustrasi susunan atom Fe dan <i>cementite</i> (Fe ₄ C ₃) pasca <i>plasma sintering</i> dengan durasi 4 menit	100
82	Ilustrasi susunan atom Fe dan <i>cementite</i> (Fe ₂ C) pasca <i>plasma sintering</i> dengan durasi 6 menit	101
83	Ilustrasi susunan atom Fe dan <i>cementite</i> (Fe ₂ C) pasca <i>plasma sintering</i> dengan durasi 8 menit	101
84	Hasil analisis EBSD <i>pole figure</i> untuk struktur kristal FCC (<i>retained austenite</i>) pada sampel dengan durasi 6 menit	102
85	Hasil analisis EBSD <i>pole figure</i> untuk struktur kristal FCC (<i>retained austenite</i>) pada sampel dengan durasi 8 menit	102
86	Morfologi <i>soot</i> hasil pengujian TEM <i>imaging</i>	104
87	Pola spektrum Raman pada sampel produk padat hasil proses tahap ketiga	106
88	Hasil TEM <i>imaging</i> berupa citra morfologi dari produk padat karbon hasil proses tahap ketiga	107
89	Pola SAED-TEM pada produk <i>carbon black</i> hasil proses tahap ketiga	108
90	Citra HRTEM pada sampel <i>carbon black</i> hasil perlakuan arus 20 A	109
91	Hasil analisis BET <i>multi point</i> pada sampel <i>carbon black</i>	110
92	Hasil analisis BET <i>multi point</i> pada sampel <i>carbon black</i> yang telah dilakukan penyesuaian	111
93	Hasil pengukuran radius pori (<i>r_p</i>) dengan metode BJH pada sampel <i>carbon black</i>	112
94	Grafik perubahan nilai <i>pore volume</i> berbasis metode BJH seiring dengan penambahan arus input	113



95	Grafik perubahan diameter rata-rata aglomerat (<i>d</i>) sebagai fungsi dari arus input (<i>I</i>)	113
96	Hasil analisis FTIR pada sampel produk <i>carbon black</i>	114
97	Ilustrasi proses disosiasi C=O dan C-O selama proses perlakuan plasma	115
98	Ilustrasi proses disosiasi C=O dan C-O selama proses perlakuan plasma (proses <i>cracking</i>)	116
99	Morfologi <i>carbon black</i> dari prekursor <i>soot</i> menggunakan metode pirolisis konvensional berdasarkan TEM <i>imaging</i>	117
100	Hasil analisis BET <i>multi point</i> pada sampel <i>carbon black</i> hasil pirolisis konvensional	118

DAFTAR LAMPIRAN

1	Kalkulasi struktur kristal heksagonal pada sampel karbon dari bahan baku OPF yang dipirolisis plasma satu tahap (12 V, 75 A)	142
2	Kalkulasi struktur kristal kubik pada sampel karbon dari bahan baku EFB yang dipirolisis plasma satu tahap (12 V, 75 A)	148
3	Kalkulasi struktur kristal heksagonal pada sampel karbon dari bahan baku OPT yang dipirolisis plasma satu tahap (12 V, 75 A)	153
4	Kalkulasi struktur kristal heksagonal produk turbostratik dari PKS berdasarkan data XRD (12 V, 70 A)	159
5	Kalkulasi struktur kristal heksagonal produk turbostratik dari PKS berdasarkan data XRD (12 V; 50 A, 60 A, 80 A)	160
6	Kalkulasi struktur kristal heksagonal produk turbostratik dari PKS berdasarkan data SAED-TEM (12 V, 50 A)	161
7	Kalkulasi struktur kristal heksagonal produk turbostratik dari PKS berdasarkan data SAED-TEM (12 V, 60 A)	162
8	Kalkulasi struktur kristal heksagonal produk turbostratik dari PKS berdasarkan data SAED-TEM (12 V, 70 A)	164
9	Kalkulasi struktur kristal heksagonal produk turbostratik dari PKS berdasarkan data SAED-TEM (12 V, 80 A)	166
10	Kalkulasi struktur kristal monoklinik pada sampel karbon dari bahan baku EFB yang dipirolisis plasma satu tahap (12 V, 60 A)	167
11	Kalkulasi struktur kristal kubik pada sampel karbon dari bahan baku EFB yang dipirolisis plasma satu tahap (12 V, 75 A)	171
12	Kalkulasi struktur kristal kubik pada sampel karbon dari bahan baku EFB yang dipirolisis plasma satu tahap (12 V, 80 A)	172
13	Kalkulasi struktur kristal tetragonal pada sampel karbon dari bahan baku EFB yang dipirolisis plasma satu tahap (12 V, 80 A)	173
14	Kalkulasi struktur kristal heksagonal pada sampel karbon dari bahan baku EFB yang dipirolisis plasma satu tahap (12 V, 20 A)	176
15	Kalkulasi struktur kristal trigonal pada sampel karbon dari bahan baku EFB yang dipirolisis plasma satu tahap (12 V, 40 A)	181
16	Perhitungan stoikiometri konversi limbah OPF/OPT menjadi <i>bio-oil</i> (proses tahap pertama)	186



17	Perhitungan stoikiometri konversi <i>bio-oil</i> menjadi <i>soot</i> (proses tahap kedua)	187
18	Perhitungan rendemen dan pendugaan reaksi pada konversi <i>soot</i> menjadi <i>carbon balck</i> (proses tahap ketiga)	188
19	Hasil analisis PSA mikro dan kalkulasi rata-rata diameter agregat	190

@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR SINGKATAN

SINGKATAN	DESKRIPSI
BET	: Brunauer-Emmett-Teller, sebuah metode karakterisasi material untuk menganalisis luas permukaan spesifik dari sebuah material uji.
BJH	: Barrett-Joyner-Halenda, sebuah metode karakterisasi material untuk menganalisis volume poros dan area distribusi pada material yang berpori.
EDX	: <i>Energy-dispersive X-ray</i> , sebuah metode karakterisasi material tidak merusak untuk menentukan komposisi unsur dari material uji.
EFB	: <i>Empty fruit bunch</i> , dalam bahasa Indonesia dikenal sebagai tandan kosong kelapa sawit (TKKS).
FTIR	: <i>Fourier transform infrared</i> , sebuah metode karakterisasi material tidak merusak untuk mengidentifikasi gugus fungsi atau ikatan kimia berdasarkan interaksi material uji dengan dengan sinar infra merah (<i>infrared</i>).
OPF	: <i>Oil palm frond</i> , dalam bahasa Indonesia dikenal sebagai pelepah pohon kelapa sawit.
OPT	: <i>Oil palm trunk</i> , dalam bahasa Indonesia dikenal sebagai batang pohon kelapa sawit.
PKS	: <i>Palm kernel shell</i> , istilah lebih singkat dari <i>oil palm kernel shell</i> , dalam bahasa Indonesia dikenal sebagai cangkang kernel kosong dari pohon kelapa sawit.
PSA	: <i>Particle size analysis</i> , metode analisis material untuk mengukur dan menghitung ukuran partikel dari serbuk material uji.
SAED	: <i>Selected-area electron diffraction</i> , sebuah metode dari alat karakterisasi mikroskop elektron transmisi (TEM) untuk melihat citra visual susunan periodik kumpulan atom-atom dari suatu material kristalin.
SEM	: <i>Scanning electron microscope</i> , sebuah alat karakterisasi material yang memindai material uji dengan berkas elektron untuk melihat tampilan citra morfologi secara mikroskopis.
SSA	: <i>Specific surface area</i> , dalam bahasa Indonesia dikenal sebagai luas permukaan spesifik dari material uji, dimana SSA ini merupakan keluaran dari hasil pengujian BET.
TEM	: <i>Transmission electron microscope</i> , dalam bahasa Indonesia dapat diterjemahkan sebagai mikroskop elektron transmisi, dimana metode ini menggunakan berkas elektron yang ditransmisikan ke material uji untuk dilihat citra morfologinya maupun citra difraksinya melalui metode SAED.
XRD	: <i>X-ray diffraction</i> , dalam bahasa Indonesia dapat diterjemahkan sebagai difraksi sinar-x, yaitu sebuah metode karakterisasi material untuk mengidentifikasi struktur kristal suatu material uji berdasarkan prinsip persamaan Bragg.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.