



ANALISIS TERMAL DAN RENDEMEN PRODUK PADA PEMANFAATAN LIMBAH PADAT KELAPA SAWIT MELALUI PROSES PIROLISIS LAMBAT

DINDA DWI NADYANINGRUM



**PROGRAM STUDI TEKNIK PERTANIAN DAN BIOSISTEM
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “Analisis Termal dan Rendemen Produk pada Pemanfaatan Limbah Padat Kelapa Sawit melalui Proses Pirolisis Lambat” 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 skripsi ini.

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

Bogor, Agustus 2026

Dinda Dwi Nadyaningrum
F1401221061

ABSTRAK

DINDA DWI NADYANINGRUM. Analisis Termal dan Rendemen Produk pada Pemanfaatan Limbah Padat Kelapa Sawit melalui Proses Pirolisis Lambat. Dibimbing oleh MUHAMAD YULIANTO.

Peningkatan limbah biomassa padat kelapa sawit berupa tandan kosong kelapa sawit (TKKS), serat, dan cangkang belum ditangani secara optimal. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi, mengetahui energi termal dan besar rendemen dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS), serat dan cangkang melalui *slow pyrolysis*. Pirolisis dilakukan menggunakan reaktor *fixed-bed batch* berkapasitas 1 kg dengan variasi suhu (100– 300 °C) dan waktu tinggal (90– 145 menit). Hasil menunjukkan cangkang memiliki profil suhu paling stabil dan keefektifan kondenser tertinggi berkat densitasnya yang besar. Sebaliknya, struktur berongga pada TKKS menyebabkan distribusi panas fluktuatif namun menghasilkan rendemen gas tertinggi (16–20%). Serat menghasilkan rendemen *bio-oil* tertinggi (47%), sedangkan cangkang menghasilkan biochar tertinggi (53%) dengan produk berada pada tahap torefaksi. Keefektifan kondenser seluruh kondisi operasi berkisar 66–89%. Konsumsi energi spesifik paling efisien diperoleh pada TKKS suhu 300 °C dan waktu tinggal 90 menit (4,724 kWh/kg), sementara cangkang perlu energi lebih tinggi untuk mencapai fase pirolisis. Karakteristik termal, energi, dan rendemen pirolisis lambat berbeda nyata antarjenis limbah sehingga pemilihan kondisi operasi harus disesuaikan dengan sifat fisik biomassa.

Kata kunci : Biomassa, Cangkang, Kelapa sawit, Pirolisis lambat, Serat, TKKS.



ABSTRACT

DINDA DWI NADYANINGRUM. Thermal Analysis and Product Yield of Palm Oil Solid Waste Utilization through Slow Pyrolysis Process. Supervised by MUHAMAD YULIANTO.

The increasing volume of solid oil palm biomass waste including empty fruit bunches (EFB), fiber, and shells has not yet been managed optimally. This study aimed to analyze the potential, determine the thermal energy, and assess the yield of empty fruit bunches (EFB), fiber, and shells through slow pyrolysis. Pyrolysis was conducted using a 1 kg fixed-bed batch reactor with varying temperatures (100–300 °C) and residence times (90–145 minutes). The results showed that shells exhibited the most stable temperature profile and the highest condenser efficiency due to their high density. In contrast, the porous structure of empty fruit bunches caused fluctuating heat distribution but yielded the highest gas yield (16–20%). Fibers produced the highest bio-oil yield (47%), while shells produced the highest biochar yield (53%), with the product reaching the torrefaction stage. Condenser efficiency across all operating conditions ranged from 66–89%. The most efficient specific energy consumption was achieved in the TKKS at 300 °C and a residence time of 90 minutes (4.724 kWh/kg), while shells required higher energy to reach the pyrolysis phase. The thermal characteristics, energy consumption, and yields of slow pyrolysis differed significantly among waste types; therefore, the selection of operating conditions must be tailored to the physical properties of the biomass.

Keywords: Biomass, EFB, Fiber, Shells, Slow pyrolysis, Oil palm.



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 2026
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.

ANALISIS TERMAL DAN RENDEMEN PRODUK PADA PEMANFAATAN LIMBAH PADAT KELAPA SAWIT MELALUI PROSES PIROLISIS LAMBAT

DINDA DWI NADYANINGRUM

Skripsi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana pada
Program Studi Teknik Pertanian dan Biosistem

**PROGRAM STUDI TEKNIK PERTANIAN DAN BIOSISTEM
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@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.

Tim Penguji pada Ujian Skripsi:

1 Dr. Leopold Oscar Nelwan, S. TP, M. Si

2 Dr.Ir. Agus Sutejo, M.Si



Judul Skripsi : Analisis Termal dan Rendemen Produk pada Pemanfaatan Limbah Padat Kelapa Sawit melalui Proses Pirolisis Lambat

Nama : Dinda Dwi Nadyaningrum
NIM : F1401221061

@Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Pembimbing:

Dr. Muhamad Yulianto, ST., M. T
NIP 198307102010121005



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

Prof. Dr. Ir. Edy Hartulistiyoso, M.Sc.Agr
NIP 196304251989031001



Tanggal Ujian:
(30 Juli 2026)

Tanggal Lulus:
()



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Januari 2026 sampai bulan Juni 2026 dengan judul “Analisis Termal dan Rendemen Produk pada Pemanfaatan Limbah Padat Kelapa Sawit melalui Proses Pirolisis Lambat”

Terima kasih penulis ucapkan kepada Bapak Dr. Muhamad Yulianto, ST., MT yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada pembimbing akademik, moderator seminar, dan penguji luar komisi pembimbing. Di samping itu, penghargaan penulis sampaikan kepada Teknisi Laboratorium Divisi Teknik Energi Terbarukan Pak Angga Permana yang selalu membantu selama proses pengambilan data dan teman-teman satu bimbingan saya, Rizky, Ziyan, Safira dan Bang Gde yang selalu menemani dan memberikan semangat selama proses penelitian ini. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada ayah, mamah, Ka Ananda, Dewangga dan Putri yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayangnya. Terima kasih juga penulis sampaikan kepada para sahabat Azhar, Salu, Bertha, Dinda Rahma, Silvia, Abil, dan Diva yang selalu menemani dan memberikan semangat dalam kondisi apapun.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Agustus 2026

Dinda Dwi Nadyaningrum



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR LAMPIRAN	x
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Limbah Padat Kelapa Sawit	4
2.2 Proses Termokimia Biomassa	4
2.3 Pirolisis dan Klasifikasinya	5
2.4 Mekanisme Proses Pirolisis	6
2.5 Reaktor Pirolisis	7
2.6 Produk dan Analisis Rendemen	8
2.7 Proses Kondensasi Uap Pirolisis	9
2.8 Analisis Energi Spesifik	9
METODE	11
3.1 Waktu dan Tempat	11
3.2 Alat dan Bahan	11
3.3 Prosedur Penelitian	13
3.4 Eksperimental Set-up	14
3.5 Matriks Penelitian	15
3.6 Metode Analisis	16
HASIL DAN PEMBAHASAN	22
4.1 Profil Suhu pada Proses Pirolisis	22
4.2 Profil suhu pada kondenser	27
4.3 Keefektifan Kondenser	28
4.4 Analisis Hasil Rendemen	32
4.5 Analisis Energi Spesifik	47
SIMPULAN DAN SARAN	51
5.1 Simpulan	51
5.2 Saran	51
DAFTAR PUSTAKA	52
LAMPIRAN	56



DAFTAR TABEL

1	Kategori pirolisis	6
2	Data kadar air dan konduktivitas termal	12
3	Analisis ultimat dan proksimat TKKS, serat dan cangkang	12
4	Experimental <i>set-up</i>	15
5	Matriks penelitian	16
6	Analisis laju pemanasan pada reaktor	25
7	Analisis energi input proses pirolisis	41
8	Analisis energi evaporasi proses pirolisis	42
9	Analisis energi <i>vaporation</i> proses pirolisis	43
10	Analisis energi pirolisis	44
11	Analisis energi <i>losses</i> proses pirolisis	45
12	Analisis persentase <i>losses</i>	46
13	Analisis energi spesifik	48

DAFTAR GAMBAR

1	(a) TKKS, (b) serat, (c) cangkang	1
2	Dampak jumlah oksigen atau udara yang dikonsumsi	5
3	Hasil proses pirolisis di berbagai kondisi	6
4	Mekanisme, tahapan pirolisis dan gasifikasi	7
5	Produk pirolisis	8
6	Diagram alir penelitian	13
7	Experimental <i>Set-up</i>	14
8	Diagram skematik sistem pirolisis	17
9	Profil suhu reaktor pada suhu 300 °C	22
10	Profil suhu pada reaktor (a) serat, (b) TKKS, (c) cangkang	24
11	profil suhu kondenser pada suhu 300 °C	27
12	Profil suhu di dalam kondenser pada biomassa (a) serat, (b) TKKS, dan (c) cangkang	28
13	Kinerja kondenser (a) serat, (b) TKKS, dan (c) cangkang	30
14	Rendemen biochar (a) serat, (b) TKKS, (c) cangkang	33
15	Produk biochar serat (a) 90, (b)120, dan (c) 145 menit	34
16	Produk biochar TKKS (a) 90, (b)120, dan (c) 145 menit	35
17	Produk biochar cangkang (a) 90, (b)120, dan (c) 145 menit	35
18	Rendemen <i>bio-oil</i> (a) serat, (b) TKKS, (c) cangkang	37
19	Rendemen <i>bio-oil</i> serat (a) 90 (b) 120, (c) 145 menit	38
20	Rendemen <i>bio-oil</i> TKKS (a) 90 (b) 120, (c) 145 menit	38
21	Rendemen <i>bio-oil</i> cangkang (a) 90 (b) 120, (c) 145 menit	39
22	Rendemen gas (a) serat, (b) TKKS, (c) cangkang	39
23	Persentase energi <i>losses</i> (a) serat, (b) TKKS, (c) cangkang	46
24	Profil suhu pada kondenser biomassa TKKS waktu (a) 90 (b) 120 (c)145 menit	58

25	Profil suhu pada kondenser biomassa serat waktu (a) 90 (b) 120 (c)145 menit	59
26	Profil suhu pada kondenser biomassa cangkang waktu (a) 90 (b) 120 (c)145 menit	61
27	Profil suhu sisi gas panas dan air pendingin pada kondenser (a) 90, (b) 120, dan (c) 145 menit	63

DAFTAR LAMPIRAN

1	Profil suhu pada kondenser	57
2	Profil suhu sisi gas panas dan air pendingin pada kondenser	61
3	Contoh perhitungan keefektifan kondenser	64
4	Contoh perhitungan produk proses pirolisis	65
5	Contoh perhitungan temal pada reaktor	65
6	Contoh perhitungan energi spesifik	67



DAFTAR NOTASI

W	= Energi listrik input total yang disuplai oleh pemanas (<i>heater</i>) ke dalam sistem reaktor pirolisis (kJ)
Q_{reaktor}	= Jumlah energi panas total yang diserap dan dimanfaatkan dalam sistem reaktor pirolisis (kJ)
Q_{Heating}	= Jumlah energi panas sensibel yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu biomassa dari kondisi awal hingga suhu operasi target (kJ)
$Q_{\text{Evaporation}}$	= Energi panas total yang dibutuhkan untuk penguapan air dalam biomassa, mencakup pemanasan sensibel air dan kalor laten penguapan (kJ)
Q_{pir}	= Energi panas yang dibutuhkan untuk melangsungkan reaksi dekomposisi termal (kJ)
Q_{Vapour}	= Energi panas yang terbawa oleh fraksi uap volatil hasil pirolisis saat meninggalkan ruang reaktor (kJ)
Q_{Losses}	= Kehilangan energi panas dari dinding dan permukaan luar reaktor ke lingkungan sekitar (kJ)
m_{Biomassa}	= Massa awal bahan baku biomassa padat kelapa sawit yang dimasukkan ke dalam reaktor (kg)
m_w	= Massa air yang teruapkan dari bahan biomassa selama proses pemanasan dan pengeringan (kg)
$C_{p,\text{Biomassa}}$	= Kapasitas panas spesifik bahan baku biomassa padat kelapa sawit pada tekanan konstan (kJ/kg °C)
$C_{p,c}$	= Kapasitas panas spesifik air pada tekanan konstan (kJ/kg °C)
$C_{p,h}$	= Kapasitas panas spesifik uap pirolisis (kJ/kg °C)
h_{fg}	= Kalor laten penguapan air pada kondisi fase jenuh (kJ/kg)
T_i	= Suhu awal bahan biomassa sebelum proses pemanasan dimulai (°C)
T_f	= Suhu akhir target operasi proses pirolisis (°C)
T_s	= Suhu pada permukaan luar dinding reaktor pirolisis (°C)
T_a	= Suhu udara lingkungan sekitar (°C)
T_c	= Suhu pada titik pusat atau bagian inti reaktor pirolisis (°C)
T_{h1}	= Suhu uap pirolisis / <i>flue gas</i> saat memasuki saluran masuk kondenser (°C)
T_{h2}	= Suhu uap pirolisis / <i>flue gas</i> saat keluar dari saluran kondenser (°C)
T_{c1}	= Suhu air saat memasuki sistem kondenser (°C)
T_{c2}	= Suhu air saat keluar dari sistem kondenser (°C)
h	= Koefisien perpindahan panas konveksi alami antara permukaan reaktor dan udara lingkungan (W/m ² °C)



A

k

L

r

r_s

r_c

Q_{vap}

Q_w

m_{fg}

ε

Q_{aktual}

Q_{max}

R_{char}

R_{oil}

R_{gas}

$m_{biochar}$

$m_{bio-oil}$

$m_{rendemen}$

HR / β

t

MC

- = Luas permukaan luar efektif perpindahan panas pada reaktor silinder (m^2)
- = Konduktivitas termal material dinding reaktor silinder (W/mK)
- = Panjang efektif silinder reaktor pirolisis (m)
- = Jari-jari silinder reaktor pirolisis (m)
- = Jari-jari luar dari dinding silinder reaktor pirolisis (m)
- = Jari-jari posisi sensor suhu di titik pusat reaktor (m)
- = Laju energi panas yang dibawa oleh aliran uap pirolisis menuju kondenser (W)
- = Laju energi panas yang diserap oleh air pendingin pada sistem kondenser (W)
- = Laju aliran massa uap pirolisis / *flue gas* yang mengalir ke kondenser (kg/s)
- = Keefektifan termal alat penukar kalor (kondenser) dalam memindahkan panas
- = Laju perpindahan panas aktual yang berhasil diserap oleh air pendingin pada kondenser (W)
- = Laju perpindahan panas maksimum teoritis yang mungkin ditransfer dalam kondenser (W)
- = Persentase rendemen produk biochar hasil pirolisis (%)
- = Persentase rendemen produk *bio-oil* hasil kondensasi uap pirolisis (%)
- = Persentase rendemen produk gas (%)
- = Massa produk biochar yang dihasilkan dari proses pirolisis (kg)
- = Massa produk *bio-oil* dari proses kondensasi (kg)
- = Massa produk hasil pirolisis yang terukur secara eksperimental (kg)
- = Laju pemanasan (*heating rate*) reaktor selama proses pirolisis berlangsung ($^{\circ}C/menit$)
- = Waktu proses atau waktu tinggal pemanasan pirolisis (menit)
- = Kadar air bahan baku biomassa padat (*moisture content*) (%)

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