



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN SETELAH HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSETUJUAN TIM PROMOTOR.....	iii
HALAMAN PERSETUJUAN TIM PENGUJI	iv
PRAKATA.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xii
INTISARI	xiii
ABSTRACT	xiv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan dan Batasan Masalah.....	3
1.3. Keaslian Penelitian.....	4
1.4. Tujuan Penelitian	6
1.5. Manfaat Penelitian	6
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Sekam Padi sebagai Sumber Energi.....	7
2.1.1 Potensi sekam padi di Indonesia	7
2.1.2 Karakteristik fisika, kimia dan termal sekam padi	9
2.1.3 Keunggulan bentuk pelet.....	11
2.2 Karakteristik Katalisis Abu	11
2.3 Pengaruh Kondisi Operasi Pirolisis	14
2.4 Pengaruh Penambahan Katalis Abu Sekam Padi	15
2.5 Model Kinetika Reaksi Pirolisis.....	16
BAB 3. LANDASAN TEORI DAN HIPOTESIS	18
3.1 Model Kinetika Global Satu-Tahap	18
3.2 Model Kinetika Multi-Komponen Satu-Tahap	20
3.3 Model Kinetika Semi-Global Dua-Tahap	21
3.4 Hipotesis.....	23
BAB 4. METODE PENELITIAN	24
4.1 Bahan	24
4.2 Alat.....	24
4.3 Prosedur Penelitian.....	25
4.3.1 Penyiapan bahan baku.....	25
4.3.2 Pembuatan pelet sekam padi	26
4.3.3 Analisis termogravimetri dengan TGA standar	26
4.3.4 Rangkaian rakitan alat <i>macro</i> -TGA	27
4.3.5 Kalibrasi alat ukur	28
4.3.6 Percobaan <i>blank-sample</i>	28
4.3.7 Analisis termogravimetri dengan <i>macro</i> -TGA	28
4.3.8 Penentuan parameter kinetika	29



BAB 5. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	32
5.1. Karakteristik Fisika dan Kimia Serbuk Sekam Padi	32
5.2. Karakteristik Katalis Abu	34
5.3. Karakteristik Pelet Sekam Padi	36
5.4. Analisis Termogravimetri dengan TGA Standar	38
5.4.1. Pengaruh <i>heating rate</i> terhadap karakteristik dekomposisi termal	40
5.4.2. Pengaruh penambahan abu terhadap karakteristik dekomposisi termal	41
5.4.3. Analisis Kinetika Mengontrol	42
5.5. Kinetika Reaksi Global Satu-Tahap	44
5.5.1. Parameter Kinetika <i>Model-Free</i>	44
5.5.2. Parameter Termodinamika Reaksi	47
5.6. Kinetika Reaksi Multi-Komponen Satu-Tahap	49
5.6.1. Karakteristik dekomposisi termal komponen	49
5.6.2. Pengaruh <i>heating rate</i> terhadap dekomposisi komponen	51
5.6.3. Pengaruh penambahan abu terhadap dekomposisi komponen	52
5.6.4. Parameter kinetika Model 3-IPR	53
5.7. Kinetika Reaksi Semi-Global Dua-Tahap	59
5.7.1. Perbandingan profil kurva TG dan DTG	59
5.7.2. Validasi model kinetika 2-Step-C	61
5.7.3. Parameter kinetika Model 2-Step-C	62
5.8. Analisis Termogravimetri dengan Macro-TGA	66
5.8.1. Pengaruh Diameter Pelet dan Laju Alir N ₂	66
5.8.1.1. Profil kurva DTG	67
5.8.1.2. Parameter kinetika semu (pirolisis single pellet)	70
5.8.1.3. Yield produk arang	72
5.8.2. Pengaruh <i>Heating Rate</i> dan Penambahan Abu terhadap Yield Produk	73
5.8.2.1. Profil kurva DTG	73
5.8.2.2. Yield produk pirolisis	75
5.8.2.3. Parameter kinetika semu (apparent kinetics) tumpukan pelet	81
5.8.3. Pengaruh Suhu Akhir Pirolisis dan Penambahan Abu terhadap Yield	83
5.8.3.1. Profil kurva DTG	83
5.8.3.2. Yield produk pirolisis	85
5.8.3.3. Parameter kinetika semu (apparent kinetics) tumpukan pelet	89
5.9. Karakterisasi Produk Pirolisis	90
5.9.1. Karakterisasi Produk Gas	91
5.9.2. Karakterisasi Produk Cair (Tar / Bio-Oil)	97
5.9.3. Karakterisasi Produk Padat (Arang)	104
5.9.3.1. Nilai kalor	104
5.9.3.2. Analisis FT-IR	105
5.9.3.3. Analisis penyusutan volume pelet (shrinking)	107
5.10. Kemungkinan Mekanisme Reaksi Pirolisis Katalitik	108
BAB 6. KESIMPULAN DAN SARAN	111
DAFTAR PUSTAKA	113
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Pustaka penelitian tentang pirolisis biomassa katalitik secara <i>in-situ</i>	5
Tabel 2.1. Luas Panen, Produksi Padi, dan Potensi Sekam Teoritis* Menurut Provinsi	8
Tabel 2.2. Karakteristik sekam padi, arang sekam padi dan abu sekam padi	10
Tabel 2.3. Komposisi kimia abu sekam padi (% berat)	13
Tabel 2.4. Model reaksi pirolisis (<i>lumped models</i>)	17
Tabel 3.1. Model kinetika pirolisis semi-global dua tahap yang dipilih	22
Tabel 4.1. Daftar peralatan yang digunakan dalam penelitian	24
Tabel 4.2. Kode sampel.....	26
Tabel 4.3. Daftar percobaan dengan macro-TGA	29
Tabel 5.1. Karakteristik kimia serbuk sekam padi	32
Tabel 5.2. Komposisi hemiselulosa, selulosa, dan lignin dalam sekam padi.....	33
Tabel 5.3. Komposisi unsur katalis abu sekam	35
Tabel 5.4. Densitas pelet sekam padi (Ø 3 mm) untuk percobaan dengan TGA standar.....	37
Tabel 5.5. Densitas pelet sekam padi (Ø 7 mm) untuk percobaan dengan Macro-TGA	37
Tabel 5.6. Suhu awal (K) dan persentase pengurangan massa (% massa) tiap tahap	39
Tabel 5.7. Nilai estimasi dan pengukuran parameter	42
Tabel 5.8. Nilai bilangan tak berdimensi Py^I , Py^{II} , dan Bi	43
Tabel 5.9. Nilai parameter kinetika model FR, FWO, dan KAS	45
Tabel 5.10. Perbandingan nilai E_a pada pirolisis non-katalitik sekam padi.....	46
Tabel 5.11. Perbandingan nilai E_a pada pirolisis katalitik sekam padi.....	46
Tabel 5.12. Nilai parameter termodinamika pada pirolisis non-katalitik dan katalitik	48
Tabel 5.13. Karakteristik termal dekomposisi komponen (model 3-IPR)	51
Tabel 5.14. Rentang suhu dekomposisi komponen pada pirolisis non-katalitik	51
Tabel 5.15. Rentang suhu dekomposisi maksimum pada pirolisis non-katalitik	51
Tabel 5.16. Nilai parameter kinetika Model 3-IPR.....	53
Tabel 5.17. Perbandingan nilai E_a pada pirolisis non-katalitik biomassa (Model 3-IPR)	55
Tabel 5.18. Perbandingan nilai A pada pirolisis non-katalitik biomassa (Model 3-IPR).....	56
Tabel 5.19. Nilai konstanta kecepatan reaksi (1/min) tiap komponen pada Model 3-IPR.....	57
Tabel 5.20. Tingkat sensitivitas parameter kinetika model 3-IPR	58
Tabel 5.21. Parameter kinetika Model 2-Step-C.....	62
Tabel 5.22. Nilai konstanta kecepatan reaksi Model 2-Step-C	64
Tabel 5.23. Tingkat sensitivitas parameter kinetika Model 2-Step-C.....	65
Tabel 5.24. Nilai parameter kinetika semu Model 3-IPR (<i>single pellet</i>)	70
Tabel 5.25. Nilai parameter kinetika semu Model 2-Step-C (<i>single pellet</i>).....	71
Tabel 5.26. Yield produk padat (arang) sebagai fungsi diameter pelet.....	72
Tabel 5.27. Yield produk pirolisis sebagai fungsi <i>heating rate</i> dan penambahan abu.....	81
Tabel 5.28. Parameter kinetika semu Model 2-Step-C (tumpukan pelet - HR)	82
Tabel 5.29. Karakteristik termal pirolisis pelet sekam variasi suhu akhir pirolisis.....	84
Tabel 5.30. Yield produk pirolisis primer dan sekunder pada suhu akhir pirolisis.....	86
Tabel 5.31. Yield produk pirolisis pada variasi suhu akhir pirolisis dan penambahan abu	88
Tabel 5.32. Parameter kinetika Model 2-Step-C (tumpukan pelet – T akhir).....	90
Tabel 5.33. Karakteristik produk gas hasil pirolisis pada suhu tinggi	96
Tabel 5.34. Nilai kalor pelet sekam padi dan produk arang hasil pirolisis	104
Tabel 5.35. Penetapan spektrum FT-IR untuk pelet sekam padi dan arang.....	106
Tabel 5.36. Penyusutan ukuran/volum (<i>shrinking</i>) pelet sekam padi	108

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Kandungan aktif biomassa dan hasil dekomposisi termal (Lu & Gu, 2022).....	10
Gambar 2.2. (a) Struktur SiO_4 tetrahedron dan (b) silikat (Hannon <i>et al.</i> , 2021)	12
Gambar 2.3. Struktur silika: (a) kristal; (b) amorf (Drewitt <i>et al.</i> , 2022).....	13
Gambar 4.1. Tahapan penelitian dan pengolahan data.....	25
Gambar 4.2. Skema peralatan percobaan menggunakan <i>macro</i> -TGA	27
Gambar 4.3. Algoritma perhitungan minimasi SSE.....	30
Gambar 5.1. Serbuk sekam padi ukuran 180-250 μm	32
Gambar 5.2. Abu sekam padi ukuran 180-250 μm	34
Gambar 5.3. Gambar SEM-EDX katalis abu sekam dengan perbesaran 5000x	34
Gambar 5.4. Pola kurva XRD katalis abu pada λ Cu K- $\alpha=1,564 \text{ \AA}$	35
Gambar 5.5. Campuran serbuk sekam padi dan serbuk abu sekam pada rasio 10:2	36
Gambar 5.6. Pelet sekam padi pada diameter: (a) 3 mm; (b) 7 mm.....	37
Gambar 5.7. Profil suhu pirolisis sebagai fungsi waktu.....	38
Gambar 5.8. Kurva TG (w) dan DTG (-dw/dt) pada percobaan dengan TGA standar	39
Gambar 5.9. Zona reaksi-transfer panas pada pirolisis biomassa	43
Gambar 5.10. Plot model FR, FWO, KAS pirolisis: (a,c,e) non-katalitik (RRH);	44
Gambar 5.11. Kurva DTG (-dw/dt) hasil percobaan dan model 3-IPR	49
Gambar 5.12. Pengaruh <i>heating rate</i> dan rasio penambahan abu terhadap dekomposisi	50
Gambar 5.13. Nilai Ea rata-rata Model 3-IPR: (a) tiap <i>heating rate</i> ; (b) tiap komponen	54
Gambar 5.14. Analisis sensitivitas model 3-IPR disekitar nilai optimum	58
Gambar 5.15. Plot kurva TG (w) dan DTG (-dw/dt) berbagai model kinetika.....	60
Gambar 5.16. Validasi Model 2-Step-C berdasar kriteria.....	61
Gambar 5.17. Nilai Ea untuk tiap reaksi pada kinetika Model 2-Step-C	63
Gambar 5.18. Analisis sensitivitas Model 2-Step-C	65
Gambar 5.19. Kurva TG (w) hasil percobaan dengan Macro-TGA pada variasi.....	66
Gambar 5.20. Kurva -dw/dt Model 3-IPR dan 2-Step-C pada laju alir N_2 100 mL/min	67
Gambar 5.21. Kurva DTG (-dw/dt) model 3-IPR; (a,c,e) variasi laju alir N_2 ;	68
Gambar 5.22. Profil suhu pelet arah radial sebagai fungsi diameter pelet.....	69
Gambar 5.23. Kurva DTG Model 2-Step-C pada variasi <i>heating rate</i>	73
Gambar 5.24. Profil suhu pelet arah radial ukuran 7 mm pada variasi <i>heating rate</i>	74
Gambar 5.25. Profil yield produk pirolisis (% massa) pada 10 K/min untuk:	75
Gambar 5.26. Profil yield produk primer dan sekunder pirolisis sekam padi sebagai	76
Gambar 5.27. Profil produk pirolisis sekam padi pada variasi <i>heating rate</i> :	80
Gambar 5.28. Kurva DTG Model 2-Step-C pada variasi suhu akhir pirolisis	84
Gambar 5.29. Profil yield produk pirolisis primer dan sekunder	85
Gambar 5.30. Profil produk pirolisis sekam padi pada variasi suhu akhir pirolisis:	87
Gambar 5.31. Profil komposisi produk gas pada pirolisis pelet sekam padi pada	92
Gambar 5.32. Konsentrasi gas permanen pada variasi suhu akhir pirolisis:	94
Gambar 5.33. (a,b) material volatil terkondensasi dan (c,d) terlarut dalam iso-propanol.....	98
Gambar 5.34. (a) Total jumlah peak GC-MS; (b) Total area peak GC-MS produk cair.....	99
Gambar 5.35. Distribusi (%area) berat molekul produk cair hasil analisis GC-MS	99
Gambar 5.36. Kandungan oksigenat dan aromatik pada pirolisis pelet sekam padi	100
Gambar 5.37. Distribusi produk cair pirolisis pelet sekam padi berdasar kelompok.....	101
Gambar 5.38. Spektrum FT-IR pelet sekam dan arang pelet sekam pada pirolisis:	105
Gambar 5.39. Pengukuran dimensi pelet sekam padi dan arang hasil pirolisis	107
Gambar 5.40. Ilustrasi transport bio-oil/tar ke dalam pori katalis abu.....	108
Gambar 5.41. Mekanisme reaksi pirolisis katalitik pelet sekam padi	109



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A1	Kode MATLAB pada pemodelan kinetika menggunakan Model 3-IPR
Lampiran A2	Kode MATLAB pada pemodelan kinetika menggunakan Model 2-Step-C
Lampiran B	Studi Transfer Panas dan Kinetika pada Pirolisis Pelet Tunggal
Lampiran C	Contoh perhitungan yield produk gas
Lampiran D	Resume nilai parameter kinetika
Lampiran E	Hasil analisis produk cair dengan GC-MS

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

TGA	<i>Thermogravimetric Analysis</i> (analisis termogravimetri)
TG	<i>Thermogravimetry</i> (kurva mass loss (%))
DTG	<i>Differential Thermogravimetry</i> (kurva kecepatan mass loss – (%/min))
RHA	<i>Rice Husk Ash</i> (abu sekam padi)
RRH	<i>Raw Rice Husk</i> (Sekam padi)
ARH	Sekam padi dengan penambahan abu
IPA	Isopropil alkohol (isopropanol)
GC-FID	<i>Gas Chromatography– Flame Ionized Detector</i>
GC-MS	<i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i>
FTIR	<i>Fourier-Transform Infrared spectroscopy</i>
SEM-EDX	<i>Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-ray spectroscopy</i>
XRD	<i>X-Ray Diffraction</i>
3-IPR	<i>Three Independent Parallel Reactions</i>
M	<i>Moisture</i>
VM	<i>Volatile Matter</i>
h	koefisien transfer panas konveksi ($\text{W/m}^2.\text{K}$)
C_p	kapasitas panas sampel fungsi suhu (J/kg.K)
Py^I	rasio kecepatan reaksi dan tahanan konduksi panas internal
Py^{II}	rasio kecepatan reaksi dan tahanan konveksi panas eksternal
Bi	Biot number
L	panjang pellet (mm)
D	diameter pelet (mm)
k	konstanta kecepatan reaksi (1/min)
E_a	energi aktivasi (kJ/mol)
A	faktor pre-eksponensial (1/min)
R	konstanta gas ideal ($0,0083145 \text{ kJ/mol.K}$)
R^2	koefisien determinasi
i	komponen i (hemiselulosa, selulosa, lignin)
c_i	fraksi material volatil yang dihasilkan oleh komponen i
n_i	orde reaksi untuk komponen i
t	waktu (menit)
T	suhu (K)
m_i	massa sampel awal (g)
m_t	massa sampel pada waktu tertentu (g)
m_f	massa sampel akhir yang tersisa (g)
w	raksi massa padatan biomassa pada waktu tertentu
α	konversi (% massa)
$f(\alpha)$	model reaksi diferensial
$g(\alpha)$	model reaksi integral
β	heating rate (K/min)
λ	konduktivitas panas sekam padi (W/m.K)
ρ	densitas pelet (kg/m^3)