

Pemodelan Kinetika Pirolisis Biomassa Campuran Sekam Padi dan Tongkol Jagung

Vila Rosa, Yazid Bindar, Elvi Restiawaty

Institut Teknologi Bandung, Indonesia

Email: virosa1995@gmail.com, yazid@che.itb.ac.id, e.restiawaty@itb.ac.id

Abstrak

Penelitian ini menyajikan pemodelan kinetika proses pirolisis cepat campuran biomassa sekam padi dan tongkol jagung untuk menghasilkan produk cair. Dengan semakin meningkatnya kekhawatiran tentang pemanasan global dan penipisan sumber daya energi fosil, sumber energi alternatif yang berkelanjutan dan ramah lingkungan semakin diperlukan. Biomassa, khususnya limbah pertanian, menawarkan solusi menjanjikan untuk produksi biofuel. Pirolisis adalah proses pemecahan termal yang terjadi tanpa oksigen, menghasilkan bio-crude oil, biochar, dan gas pirolisis. Untuk mengoptimalkan proses pirolisis dan hasilnya, pemahaman mendalam tentang mekanisme reaksi dan kinetiknya sangat penting. Penelitian ini menggunakan metode isokonversi model-bebas seperti Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) dan Flynn-Wall-Ozawa (FWO) untuk analisis kinetika, memberikan wawasan tentang tahapan reaksi selama pirolisis. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa energi aktivasi (E_a) meningkat dengan tingginya derajat konversi, dengan campuran menunjukkan perilaku yang merupakan kombinasi aditif dari komponen-komponennya. Hasil ini sangat penting untuk desain dan optimasi reaktor pirolisis yang efisien serta kontribusinya terhadap pemanfaatan biomassa yang berkelanjutan.

Kata Kunci: Pirolisis, Biomassa, Sekam Padi, Tongkol Jagung, Pemodelan Kinetika, Energi Aktivasi, Bio-crude Oil, Biochar, Keberlanjutan

Abstract

This research presents the kinetic modeling of the fast pyrolysis process of a biomass mixture consisting of rice husk and corn cob to produce liquid products. With the growing concerns about global warming and the depletion of fossil energy resources, alternative sustainable and environmentally friendly energy sources are increasingly required. Biomass, especially agricultural residues, offers a promising solution for biofuel production. Pyrolysis is a thermal decomposition process that occurs in the absence of oxygen, yielding bio-crude oil, biochar, and pyrolysis gas. To optimize the pyrolysis process and its outcomes, a detailed understanding of the reaction mechanism and its kinetics is essential. This study employs model-free isoconversional methods such as Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) and Flynn-Wall-Ozawa (FWO) for kinetic analysis, providing insights into the reaction stages during pyrolysis. The study's findings demonstrate that the activation energy (E_a) increases with higher conversion degrees, with the mixture showing a behavior that is an additive combination of its components. These results are crucial for the efficient design and optimization of pyrolysis reactors and contribute to the sustainable utilization of biomass.

Keywords: Pyrolysis, Biomass, Rice Husk, Corn Cob, Kinetic Modeling, Activation Energy, Bio-crude Oil, Biochar, Sustainability

PENDAHULUAN

Pemanasan global dan penipisan sumber daya energi fosil adalah isu global yang mendesak untuk segera ditangani. Kebutuhan akan sumber energi alternatif yang berkelanjutan dan ramah lingkungan semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan industrialisasi (Al-Ghussain, 2019; Diffenbaugh & Burke, 2019; Hansen et al., 2023; Kumar, 2018; Leu, 2021; Sayyidati, 2017). Pertanian dan kehutanan merupakan industri utama di Indonesia, menghasilkan banyak limbah dan produk sampingan yang bisa digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan listrik (Haryanti, 2022; Parinduri et al., 2018). Potensi total biomassa untuk pembangkitan listrik adalah 32.655 MWe (ERIA, 2022). Potensi bahan baku di Indonesia untuk memproduksi bioetanol generasi kedua, terutama dari ampas tebu, jerami padi, sisa tanaman jagung, ampas sagu, dan EF, dengan total potensi sekitar 34,6 juta kL per tahun. Biomassa dapat dikonversi menjadi bahan bakar melalui berbagai proses seperti pembakaran langsung, gasifikasi, pirolisis, dan *hydrothermal liquefaction* (Haruna, 2020; Niapele, 2013; Pandebesie & Kartini, 2016; Papilo et al., 2016; Sindhuwati et al., 2021).

Penelitian ini berfokus pada pemanfaatan campuran biomassa sekam padi dan tongkol jagung melalui proses pirolisis cepat untuk menghasilkan produk cair. Pirolisis adalah proses pemecahan termal biomassa dalam kondisi tanpa oksigen, menghasilkan tiga produk utama yaitu *Bio Crude Oil* (BCO), *biochar* (arang), dan *bio* pirolisis gas (BPG).

Untuk mengoptimalkan proses dan hasil pirolisis, pemahaman mendalam tentang mekanisme reaksi dan karakteristik kinetiknya sangat penting. Setiap komponen utama biomassa seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin memiliki karakteristik dekomposisi termal yang berbeda, mempengaruhi jalur reaksi serta produk akhir pirolisis. Oleh karena itu, diperlukan model kinetika yang dapat diaplikasikan pada berbagai jenis biomassa campuran dan mampu mengakomodasi variasi komposisi serta sifat termal dari setiap komponen biomassa. Pendekatan pemodelan kinetika yang digunakan dalam studi pirolisis biomassa mencakup metode isokonvensional yang memungkinkan penentuan energi aktivasi tanpa asumsi model reaksi tertentu, serta metode *model-fitting* seperti *Distributed Activation Energy Model* (DAEM) yang memberikan wawasan rinci tentang tahapan reaksi selama pirolisis. Model kinetika yang komprehensif tidak hanya membantu memahami mekanisme dasar pirolisis, tetapi juga sangat berguna dalam perancangan dan optimasi reaktor pirolisis.

Pengembangan model kinetika yang lebih baik akan memberikan manfaat signifikan dalam merancang dan mengoptimalkan proses pirolisis untuk berbagai aplikasi industri, mendukung pemanfaatan sumber daya biomassa yang lebih efisien dan berkelanjutan, serta mengurangi dampak lingkungan (Bhavanam & Sastry, 2015; Cai et al., 2013; Feng et al., 2022; Ji et al., 2020). Dengan pendekatan sistematis dan komprehensif, tantangan dalam studi kinetika pirolisis biomassa campuran dapat diatasi, membuka jalan bagi inovasi teknologi dan aplikasi industri yang lebih luas.

Singh & Sawarkar (2020) meneliti kinetika pirolisis tongkol jagung (corn cob) menggunakan metode isokonversi seperti Kissinger-Akahira-Sunose, Flynn-Wall-Ozawa, dan Starink, dengan hasil energi aktivasi sekitar 61–62 kJ/mol. Studi ini menunjukkan potensi bioenergi tongkol jagung, namun terbatas pada biomassa tunggal dan tanpa memperhitungkan campuran biomassa atau interaksi komponen termal. Kedua, Lin et al. (2025) melakukan analisis kinetika pirolisis jerami dan sekam padi menggunakan TG-FTIR dan Py-GC/MS yang mendalami mekanisme reaksi serta produk pirolisis, namun penelitian mereka tidak menerapkan model kinetika lanjutan seperti DAEM untuk campuran biomassa secara kuantitatif.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinetika pirolisis cepat campuran biomassa sekam padi dan tongkol jagung dengan metode isokonversi dan model-fitting (DAEM), sehingga memperoleh pemahaman detail tentang mekanisme reaksi, energi aktivasi, dan distribusi produk (BCO, biochar, gas). Manfaatnya mencakup perancangan reaktor yang lebih efisien, optimasi produktivitas bahan bakar cair dari biomassa lokal, serta kontribusi terhadap pengembangan energi terbarukan berkelanjutan yang mendukung pengurangan penggunaan energi fosil dan pengelolaan limbah pertanian secara lebih produktif dan ramah lingkungan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui pemodelan kinetika berbasis metode bebas model (*model-free*) untuk menganalisis karakteristik pirolisis campuran biomassa sekam padi dan tongkol jagung. Analisis dilakukan menggunakan data sekunder berupa hasil perhitungan energi aktivasi (E_a) yang diperoleh melalui metode Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) dan Flynn-Wall-Ozawa (FWO). Penelitian ini bersifat non-eksperimental, dengan fokus pada analisis numerik dan simulasi termokimia menggunakan data termogravimetri (TGA) yang telah tersedia. Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan kuantitatif dengan metode isokonversi berbasis data termogravimetri (TGA) pada biomassa campuran sekam padi dan tongkol jagung. Proses analisis mencakup tahapan pengumpulan

data TGA multi-laju pemanasan, pengolahan data untuk perhitungan derajat konversi (α), estimasi parameter kinetika menggunakan metode Kissinger-Akahira-Sunose (KAS), Flynn-Wall-Ozawa (FWO), dan Coats-Redfern, serta validasi hasil melalui pendekatan master plot.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah biomassa campuran sekam padi dan tongkol jagung. Sampel biomassa tersebut telah dikeringkan (untuk menghilangkan kadar air) dan digiling hingga berukuran seragam sebelum analisis TGA, sesuai praktik standar dalam analisis termogravimetri biomassa. Data *Thermogravimetric Analysis* (TGA) untuk campuran biomassa ini diperoleh dari Laboratorium Instrumen ITB. Pada analisis TGA, sampel dipanaskan dalam atmosfer *inert* (gas nitrogen) dari suhu ruang hingga suhu sekitar 600°C (hingga dekomposisi termal selesai) dengan tiga laju pemanasan (β) yang berbeda: 10, 20, dan 30 °C/menit. Selama pemanasan, perubahan massa sampel tercatat sebagai fungsi suhu/waktu, sehingga menghasilkan kurva termogravimetri (% massa vs. suhu) untuk tiap laju pemanasan. Data inilah yang selanjutnya diolah dan dianalisis untuk pemodelan kinetika. Karena data TGA berasal dari laboratorium instrumen ITB (bukan melalui eksperimen langsung peneliti), penelitian ini bersifat data *processing*, di mana fokusnya adalah pada pengolahan dan analisis data yang sudah tersedia.

Data mentah yang diperoleh dari instrumen berupa suhu, massa sampel, dan aliran kalor sebagai fungsi waktu/suhu untuk masing-masing laju pemanasan. Pengolahan data dilakukan menggunakan Microsoft Excel secara bertahap sebagai berikut:

1. Perhitungan Derajat Konversi (α)

Dari kurva TGA (massa vs. suhu), dihitung derajat konversi pirolisis, α , yang merepresentasikan fraksi biomassa yang terdekomposisi pada suatu suhu tertentu. Nilai α dihitung menggunakan persamaan:

2. Interpolasi Suhu Isokonversi

Untuk keperluan analisis kinetika metode isokonversi, diperlukan data suhu untuk fraksi konversi tertentu yang sama pada setiap laju pemanasan. Oleh karena itu, dilakukan interpolasi linier pada kurva α vs. T untuk menentukan suhu pada nilai-nilai α tertentu (misalnya setiap kenaikan 0,1 atau 10% konversi) pada masing-masing laju pemanasan. Hasilnya adalah sekumpulan pasangan data T_α (suhu pada konversi α) untuk setiap laju pemanasan β . Data isokonversi ini akan digunakan dalam perhitungan kinetika model-bebas (KAS dan FWO) di tahap berikut.

3. Perhitungan Fungsi $g(\alpha)$

Untuk analisis model-fitting (metode Coats-Redfern), dihitung fungsi konversi terintegrasi $g(\alpha)$ sesuai asumsi model reaksi tertentu.

4. Perhitungan Awal Parameter

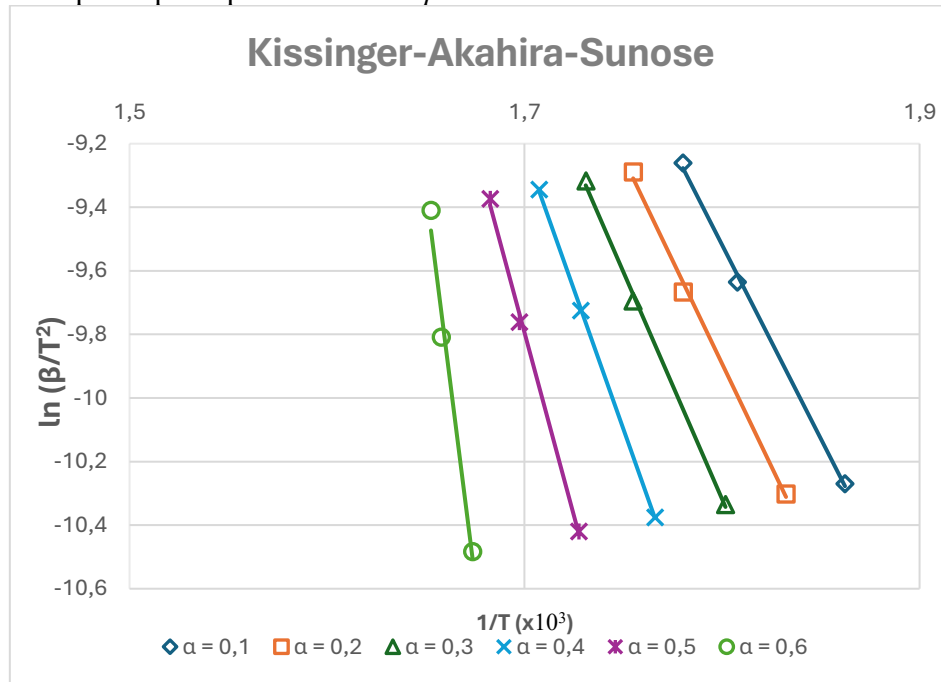
Perhitungan awal nilai energi aktivasi (E_a) menggunakan metode isokonversi (KAS & FWO) serta metode Coats-Redfern. Hasil perhitungan ini berupa nilai E_a (sebagai fungsi α untuk KAS/FWO, atau nilai rata-rata/global untuk Coats-Redfern) beserta faktor pre-eksponensial (A) untuk metode Coats-Redfern. Semua perhitungan dilakukan di Excel dengan memanfaatkan fitur regresi linier (*trendline*) dan pengolahan data numerik sederhana. Hasil parameter kinetika yang diperoleh kemudian akan divalidasi pada tahap berikutnya

HASIL DAN PEMBAHASAN

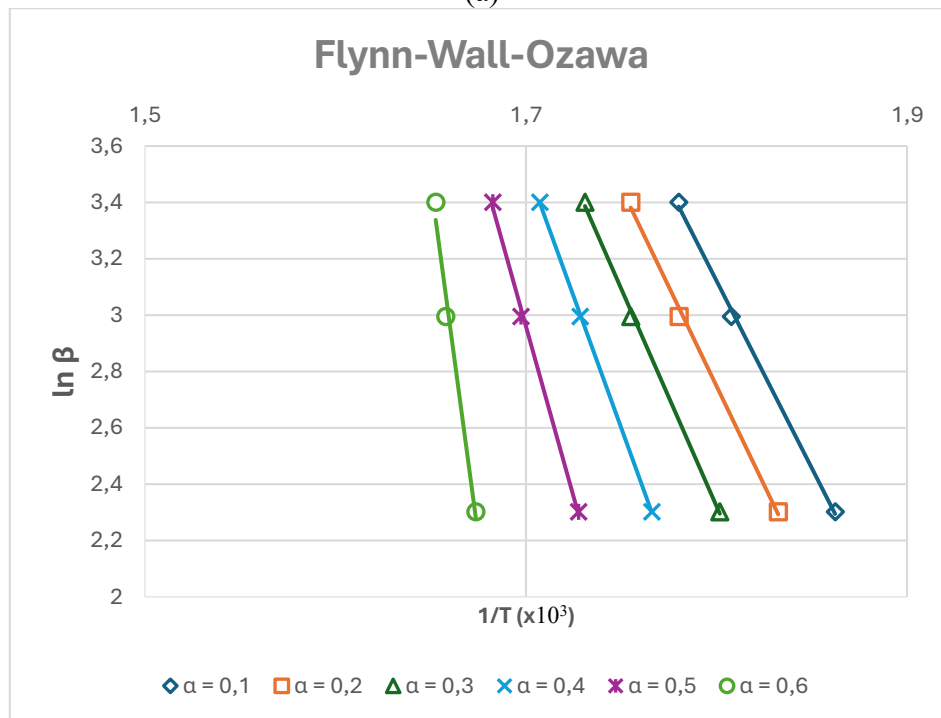
Energi Aktivasi (E_a) dan Faktor Pra-Eksponensial (A)

Energi aktivasi (E_a) merepresentasikan energi minimum yang dibutuhkan untuk memulai reaksi pirolisis, sedangkan faktor pra-eksponensial A terkait dengan frekuensi tumbukan molekuler yang efektif dalam reaksi (konstan untuk suatu reaksi pada rentang temperatur tertentu). Pada metode isokonversi KAS dan FWO, E_a dihitung sebagai fungsi dari derajat konversi (α). Perhitungan dilakukan untuk beberapa nilai α (0,1 hingga 0,6 dengan interval 0,1)

menggunakan data laju pemanasan 10, 20, 30 °C/menit. Hasil regresi linier KAS ($\ln(\beta/T^2)$ vs $1/T$) dan FWO ($\ln(\beta)$ vs $1/T$) menghasilkan kemiringan garis yang berbanding dengan $-E_a/R$, sehingga E_a tiap α dapat diperoleh dari *slope*.

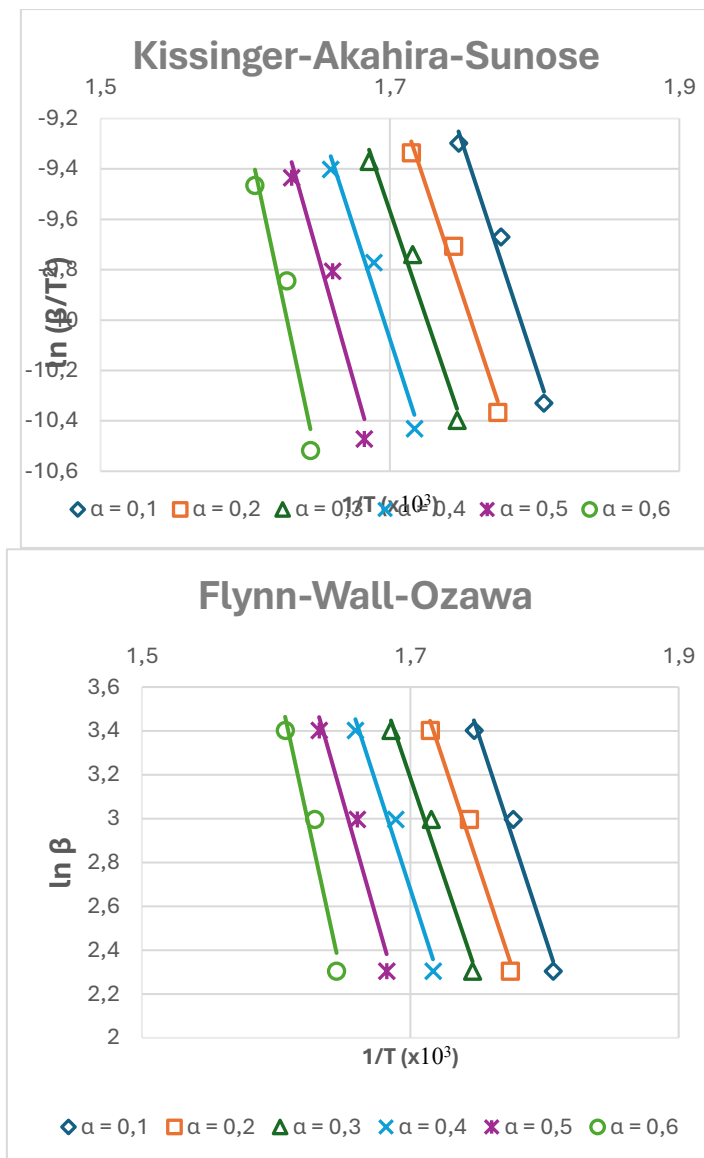


(a)

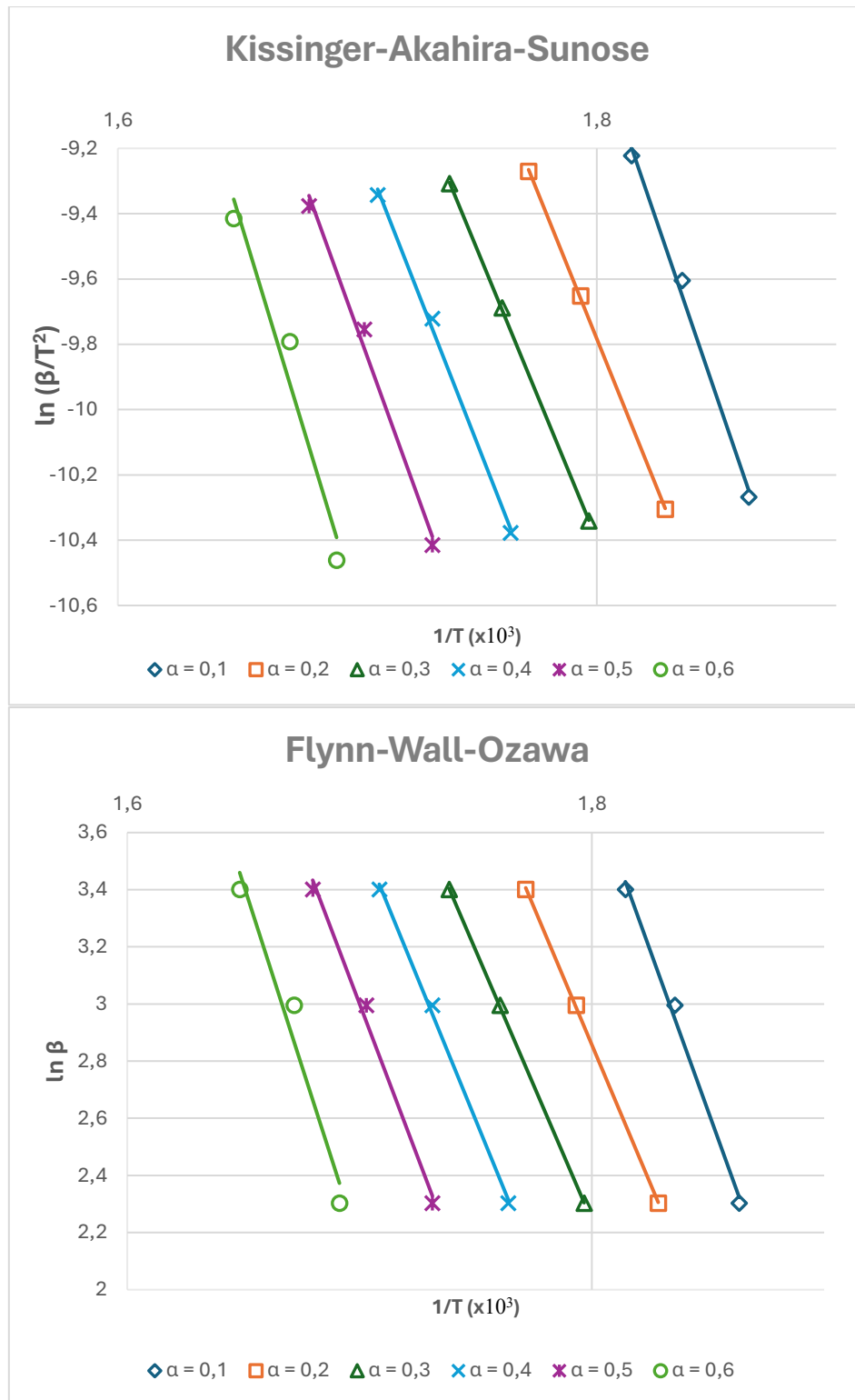


(b)

Gambar 1. Plot Arrhenius Linier dengan Metode KAS (a), FWO (b) Tongkol Jagung



Gambar 2. Plot Arrhenius Linier dengan Metode KAS (a), FWO (b) Sekam Padi



Gambar 3. Plot Arrhenius Linier dengan Metode KAS (a), FWO (b) Campuran

Tabel 1 sampai 3 menyajikan hasil perhitungan E_a untuk tongkol jagung, sekam padi, dan campuran (1:1) pada berbagai tingkat konversi (α), menggunakan metode KAS dan FWO. Secara umum, nilai E_a cenderung meningkat seiring kenaikan α , kemudian melonjak tajam pada $\alpha > 0,5$. Sebagai contoh, pada tongkol jagung: E_a sekitar 101–145 kJ/mol pada $\alpha = 0,1$ – $0,4$, lalu naik menjadi ~191 kJ/mol di $\alpha = 0,5$, dan mencapai ~400 kJ/mol di $\alpha = 0,6$. Pola

serupa terlihat pada sekam padi (Tabel IV.2): $E_a \sim 145$ kJ/mol ($\alpha = 0,1$) meningkat menjadi ~ 168 kJ/mol ($\alpha = 0,5$) dan ~ 223 kJ/mol ($\alpha = 0,6$). Campuran sekam–tongkol menunjukkan tren kenaikan lebih landai: $E_a \sim 178$ kJ/mol ($\alpha = 0,1$) naik menjadi ~ 168 kJ/mol ($\alpha = 0,5$) dan ~ 200 kJ/mol ($\alpha = 0,6$). Kecenderungan kenaikan E_a pada konversi tinggi mencerminkan bahwa tahap akhir pirolisis (dekomposisi lignin dan residu karbon) memerlukan energi lebih besar daripada tahap awal (devolatilisasi hemiselulosa/selulosa).

Dari Tabel tersebut dapat dihitung rata-rata E_a untuk tiap sampel. Tongkol jagung memiliki E_a rata-rata ~ 179 kJ/mol, sekam padi ~ 162 kJ/mol, dan campuran 1:1 ~ 167 kJ/mol. Menariknya, nilai E_a rata-rata campuran berada di antara E_a masing-masing komponen tunggal, mengindikasikan bahwa perilaku pirolisis campuran cenderung merupakan penjumlahan (aditif) dari kedua biomassa tanpa ada efek sinergis yang signifikan. Hal ini sejalan dengan temuan Singh dkk. (2021) dan Burra & Gupta (2018), di mana *co-pyrolysis* sesama biomassa lignoselulosa dilaporkan bersifat aditif (tidak jauh berbeda dari perkiraan campuran linear), berbeda dengan campuran biomassa-plastik yang kadang menunjukkan penurunan E_a (efek sinergis katalitik).

Sebagai perbandingan, Singh dkk. (2021) melaporkan bahwa pirolisis tongkol jagung murni menghasilkan nilai rata-rata E_a sebesar 240 kJ/mol menggunakan berbagai metode isokonversi. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan hasil dalam penelitian ini, kemungkinan karena mencakup tahap dekomposisi akhir yang lebih lengkap. Menariknya, dalam studi tersebut ditemukan bahwa *co-pyrolysis* antara tongkol jagung dan polyethylene mampu menurunkan kebutuhan energi aktivasi hingga sekitar 10%. Temuan ini menegaskan bahwa kehadiran komponen tambahan dapat memengaruhi parameter kinetika secara signifikan. Namun, dalam penelitian ini, pencampuran sekam padi dan tongkol jagung tidak menunjukkan penurunan energi aktivasi yang berarti, kemungkinan karena keduanya merupakan biomassa lignoselulosa murni yang tidak memberikan efek katalitik satu sama lain.

Selain E_a , faktor pra-eksponensial A juga diperoleh untuk masing-masing bahan. Nilai A berkisar pada orde 10^{14} – 10^{15} 1/s. Secara spesifik, tongkol jagung memiliki $A \approx 3,08 \times 10^{15}$ 1/s, sekam padi $A \approx 6,99 \times 10^{14}$ 1/s, sedangkan campuran $A \approx 1,03 \times 10^{13}$ 1/s. Nilai A campuran yang sedikit lebih rendah dari komponen murninya dapat diinterpretasikan bahwa frekuensi tumbukan efektif dalam campuran tersebut berkurang; kemungkinan karena interaksi fisik (misal, keberadaan silika tinggi pada sekam) menghambat kontak reaktan sehingga frekuensi reaksi efektif menurun dibanding biomassa murni. Meskipun demikian, perbedaan ini tidaklah ekstrim dan masih dalam satu orde besaran yang sama.

Tabel 1. Hasil Perhitungan E_a Tongkol Jagung

TONGKOL JAGUNG				
α	KAS		FWO	
	E_a (kJ/mol)	R^2	E_a	R^2
0,1	101,414172	0,9983	105,110907	0,9985
0,2	107,682928	0,9975	111,20647	0,9978
0,3	118,865258	0,9987	121,982413	0,9988
0,4	145,794304	0,9999	147,740318	0,9999
0,5	191,371652	0,9978	191,247299	0,998
0,6	407,527338	0,9805	397,033821	0,9814
Rata-rata	178,775942		179,053538	

Tabel 2. Hasil Perhitungan E_a Sekam Padi

SEKAM PADI				
α	KAS		FWO	
	E_a	R^2	E_a	R^2
0,1	145,428488	0,9762	147,1948	0,979
0,2	143,441442	0,9786	145,471282	0,9813
0,3	140,780962	0,9767	143,091561	0,9796

SEKAM PADI				
α	KAS		FWO	
	Ea	R ²	Ea	R ²
0,4	147,65664	0,9687	149,780078	0,9717
0,5	168,632862	0,9457	169,908876	0,9514
0,6	223,496948	0,9418	222,262725	0,9466
Rata-rata	161,57289		162,951554	

Tabel 3. Hasil Perhitungan Ea Campuran Sekam Padi dan Tongkol Jagung 1:1

CAMPURAN 1:1				
α	KAS		FWO	
	Ea	R ²	Ea	R ²
0,1	178,368556	0,994	178,210226	0,9946
0,2	151,248288	0,9998	152,602537	0,9998
0,3	147,881118	0,9999	149,566615	0,9999
0,4	155,72122	0,9975	157,180139	0,9978
0,5	168,574664	0,9908	169,568916	0,9918
0,6	200,500424	0,9555	200,133697	0,9595
Rata-rata	167,049045		167,877022	

Mekanisme Reaksi Dominan (Coats-Redfern)

Analisis mekanisme reaksi dominan menggunakan metode Coats-Redfern menunjukkan bahwa seluruh biomassa dalam penelitian ini mengikuti mekanisme reaksi difusi tiga dimensi (*diffusion* 3D). Hal ini dikarenakan hasil regresi linier dari perhitungan Coats-Redfern menunjukkan kecocokan yang tinggi dengan model difusi 3D. Model ini mengindikasikan bahwa reaksi pirolisis dominan dikendalikan oleh difusi produk degradasi melalui matriks padatan biomassa.

Mekanisme ini relevan dengan sifat fisik biomassa yang memiliki struktur berpori sehingga proses degradasi termal tidak hanya dikendalikan oleh reaksi kimia tetapi juga secara signifikan oleh perpindahan massa produk reaksi melalui pori-pori material. Dengan demikian, mekanisme reaksi difusi 3D sangat sesuai untuk menjelaskan proses pirolisis yang terjadi pada biomassa lignoselulosa.

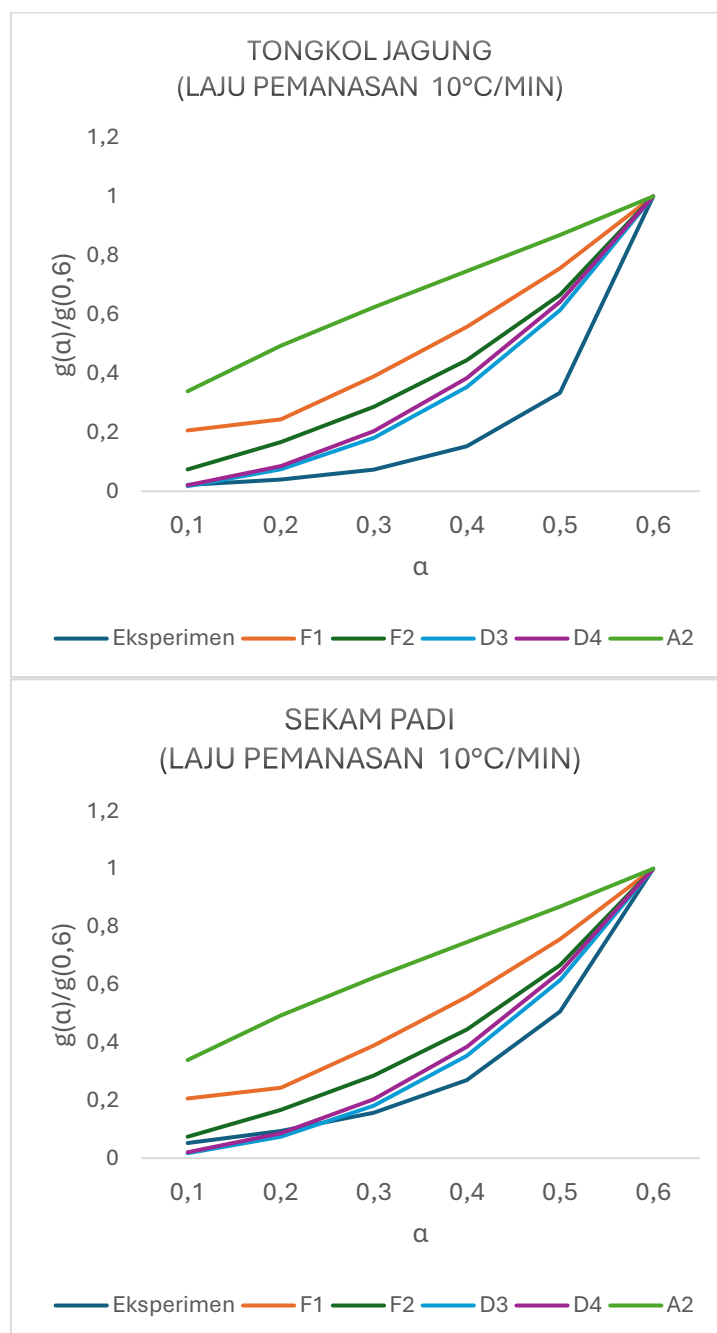
Validasi Hasil Perhitungan

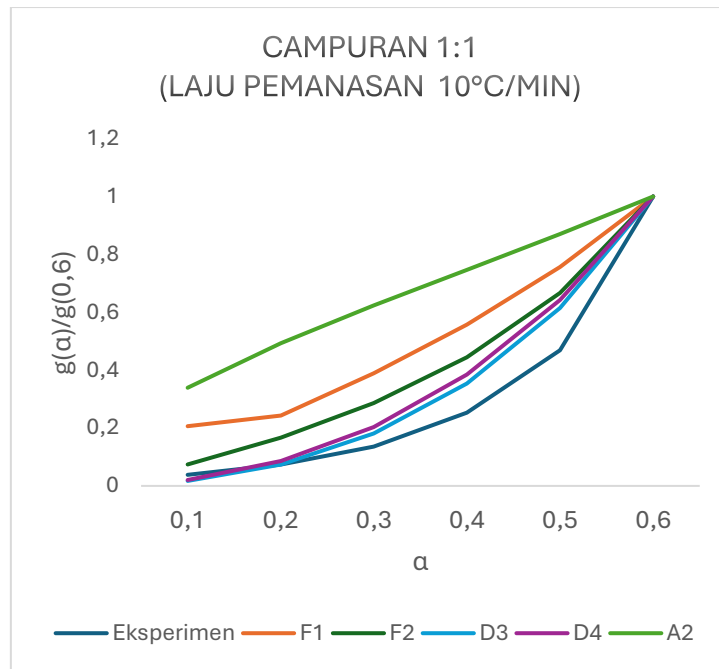
Hasil-hasil perhitungan parameter kinetika di atas perlu divalidasi dan dibahas keterkaitannya dengan penelitian terdahulu maupun tujuan penelitian. Secara umum, nilai Ea yang diperoleh sejalan dengan rentang yang dilaporkan dalam literatur untuk biomassa sejenis. Sebagai contoh, Dong dkk. (2018) melaporkan Ea pirolisis sekam padi 155–160 kJ/mol (metode KAS), dan Jayaraman & Gökalp (2015) mendapatkan Ea ~159,7 kJ/mol dengan pendekatan serupa – sangat dekat dengan Ea ~162 kJ/mol untuk sekam padi dalam penelitian ini. Untuk tongkol jagung, Agrawal dkk. (2020) dan Singh & Sawarkar (2021) melaporkan Ea dalam kisaran lebih lebar 180–240 kJ/mol (tergantung metode dan rentang konversi). Namun demikian, nilai Ea ~179 kJ/mol untuk tongkol jagung kita masih berada dalam batas wajar kisaran tersebut. Konsistensi dengan data literatur ini memberikan kepercayaan bahwa metode perhitungan kita akurat.

Pemilihan model mekanisme reaksi pada metode Coats-Redfern dilakukan berdasarkan grafik linieritas terbaik dari hasil plot $\ln[g(\alpha)/T^2]$ vs $1/T$. Berbagai fungsi mekanisme telah diuji (orde-1 (F1), orde-2 (F2), difusi 3D Jander (D3), difusi 3D Ginstling-Brounshtein (D4), dan nukleasi dua-dimensi (A2)) dengan membandingkan kurva master plot eksperimen terhadap kurva teoretis masing-masing model. Hasil pemetaan master plot untuk ketiga biomassa (sekam padi, tongkol jagung, dan campuran 1:1) menunjukkan bahwa model difusi 3D (D3) memberikan kecocokan terbaik dengan data eksperimen pada rentang fraksi konversi $\alpha = 0,1–0,4$.

Namun, kurva master plot D3 tidak sepenuhnya tumpang tindih dengan data eksperimen. Deviasi mulai tampak jelas pada $\alpha > 0,4$, di mana kurva eksperimen cenderung menyimpang ke atas dibandingkan model D3. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun D3 adalah model paling representatif secara relatif dibanding model lain, tidak ada satu model pun yang sepenuhnya sesuai di seluruh rentang konversi.

Dengan demikian, model D3 dapat dianggap sebagai mekanisme dominan pada tahap awal hingga pertengahan pirolisis, yang kemungkinan besar dikontrol oleh hambatan difusi gas volatil melalui matriks padat. Pada konversi tinggi ($\alpha > 0,5$), mekanisme dapat bergeser menuju kontrol reaksi kimia atau difusi sekunder yang lebih kompleks, sebagaimana umum terjadi pada pirolisis biomassa multikomponen. Oleh karena itu, penggunaan model D3 sebagai pendekatan satu-langkah untuk pemodelan global tetap dapat diterima, tetapi perlu disertai catatan bahwa validitasnya terbatas pada rentang konversi menengah. Hal ini penting diperhatikan dalam penerapan model untuk prediksi atau simulasi reaksi pada kondisi riil di reaktor.

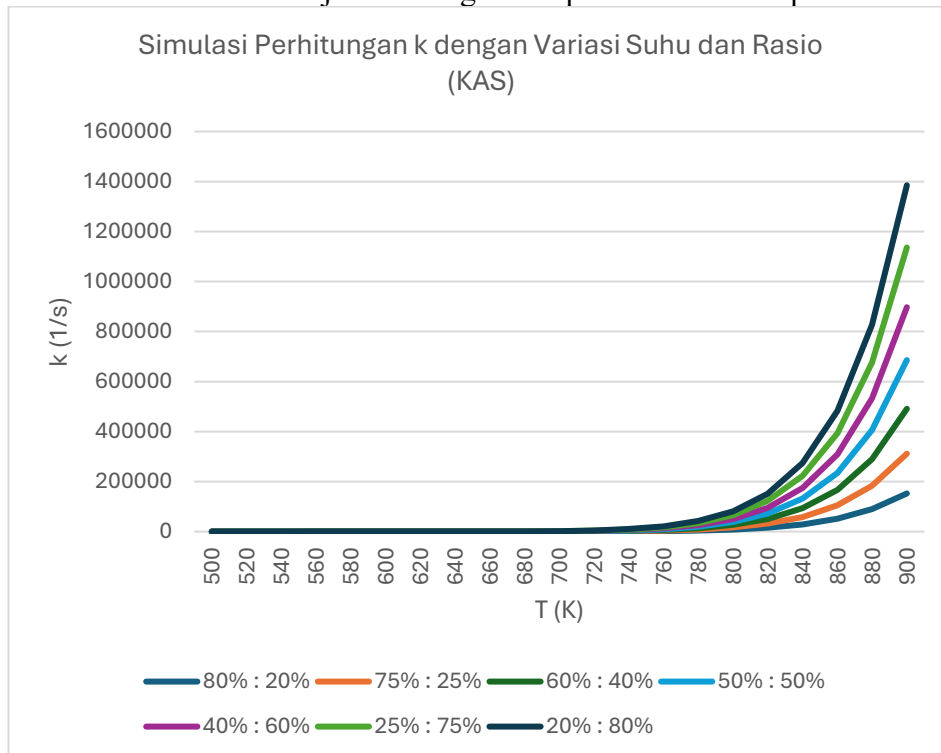


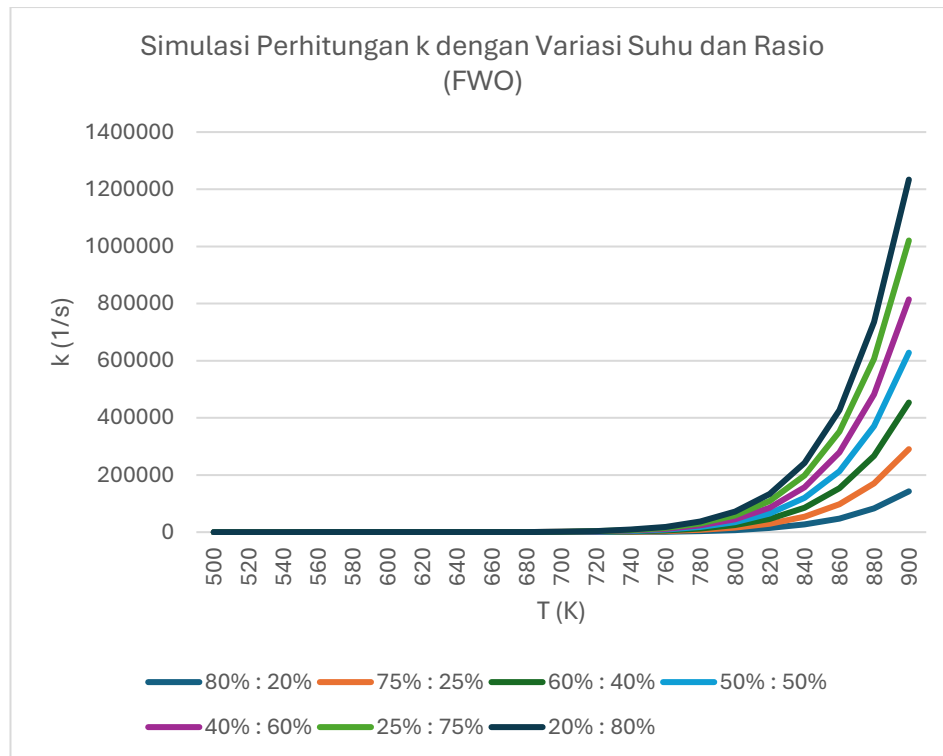


Gambar 4. Masterplot $g(\alpha)/g(0,6)$ vs α

Pengaruh Temperatur terhadap Laju Reaksi Pirolisis

Laju reaksi pirolisis campuran sangat dipengaruhi oleh temperatur proses. Berdasarkan simulasi model kinetika (dengan parameter E_a dan A yang telah diperoleh), kenaikan temperatur secara signifikan mempercepat laju reaksi. Hal ini sesuai dengan ekspektasi dari persamaan Arrhenius: konstanta laju k meningkat eksponensial terhadap kenaikan T .





Gambar 5. Kurva k vs T dengan Variasi Komposisi Tongkol Jagung : Sekam Padi

Pengaruh Komposisi Campuran terhadap Laju Reaksi

Variabel berikutnya adalah rasio campuran biomassa. Meskipun simulasi dasar dilakukan untuk campuran 50:50, menarik untuk mengeksplorasi bagaimana perubahan proporsi sekam padi dan tongkol jagung memengaruhi laju pirolisis. Dengan pendekatan kinetika paralel (asumsi masing-masing komponen terurai independen), disimulasikan beberapa komposisi ekstrim: 100% sekam (0% tongkol), 100% tongkol (0% sekam), dan komposisi campuran di antaranya (misal 25:75, 50:50, 75:25). Gambar 5 menggambarkan kurva DTG simulasi untuk empat komposisi berbeda pada laju pemanasan tetap (misal 10 °C/menit). Untuk memudahkan, kurva 100% sekam dan 100% tongkol juga ditampilkan sebagai acuan. Dari grafik tersebut, diperoleh pola sebagai berikut:

Komposisi didominasi sekam padi (75% sekam : 25% tongkol): Kurva DTG memiliki puncak utama pada suhu lebih rendah (~300 °C) mirip dengan sekam murni, dengan intensitas besar, disertai bahu (puncak sekunder) di ~330 °C akibat sedikit kontribusi tongkol. Laju awal reaksi cukup tinggi karena fraksi sekam yang mudah terurai lebih banyak.

Komposisi seimbang 50% : 50%: Kurva DTG menampilkan dua puncak yang relatif seimbang: puncak pertama (sekitar 300 °C) dan puncak kedua (sekitar 330 °C) tingginya hampir sama. Pola ini sesuai dengan hasil eksperimen campuran, menandakan masing-masing biomassa memberikan kontribusi laju degradasi yang sebanding.

Komposisi didominasi tongkol jagung (25% sekam : 75% tongkol): Kurva DTG mendekati karakter tongkol murni. Puncak utama bergeser ke ~330 °C (mirip tongkol), dengan bahu kecil di ~300 °C dari sedikit kandungan sekam. Laju dekomposisi maksimum terjadi sedikit lebih lambat dan puncaknya sedikit lebih rendah dibanding komposisi yang lebih banyak sekam, karena mayoritas fraksi membutuhkan suhu lebih tinggi untuk terurai.

Secara umum, semakin tinggi fraksi sekam padi dalam campuran, pirolisis mulai pada suhu lebih rendah dan berlangsung lebih cepat di tahap awal (karena sekam lebih reaktif pada suhu rendah). Sebaliknya, semakin dominan tongkol jagung, laju maksimum bergeser ke suhu lebih tinggi dan reaksi cenderung sedikit lebih lambat di awal. Meskipun demikian, penting

dicatat bahwa total yield (konversi akhir) tetap proporsional dengan jumlah masing-masing komponen, artinya tidak tampak adanya efek sinergis istimewa – perilaku campuran mendekati penjumlahan linier komponen. Hal ini mengindikasikan sifat aditif kinetika campuran sekam–tongkol tanpa efek interaksi kimia yang signifikan. Apabila ada efek sinergis (misal katalisis oleh mineral sekam terhadap degradasi tongkol), seharusnya tampak pergeseran kurva tongkol ke suhu lebih rendah atau perubahan bentuk kurva yang menyimpang dari prediksi aditif. Pada model dan data kita, fenomena tersebut minimal. Temuan ini konsisten dengan laporan bahwa perilaku pirolisis campuran biomassa cenderung merupakan penjumlahan dari komponen individunya (tidak menunjukkan deviasi besar dari linearitas). Dengan demikian, pendekatan kinetika paralel sederhana cukup valid untuk kasus sekam–tongkol ini. Dari perspektif operasional, hasil di atas berarti komposisi umpan dapat diubah sesuai kebutuhan tanpa mengubah mekanisme secara drastis. Misalnya, jika reaktor beroperasi pada suhu relatif rendah dan diinginkan reaksi tetap cepat, meningkatkan porsi sekam (yang lebih mudah terurai) dapat membantu mempercepat laju awal pirolisis. Sebaliknya, jika mampu beroperasi pada suhu tinggi, porsi tongkol yang lebih banyak tidak menjadi masalah dan justru dapat mengurangi residu abu (karena abu tongkol relatif rendah). Jadi, ada fleksibilitas komposisi bahan baku untuk mengatur laju reaksi, selama parameter kinetiknya telah dipahami.

Simulasi Laju Alir Biomassa

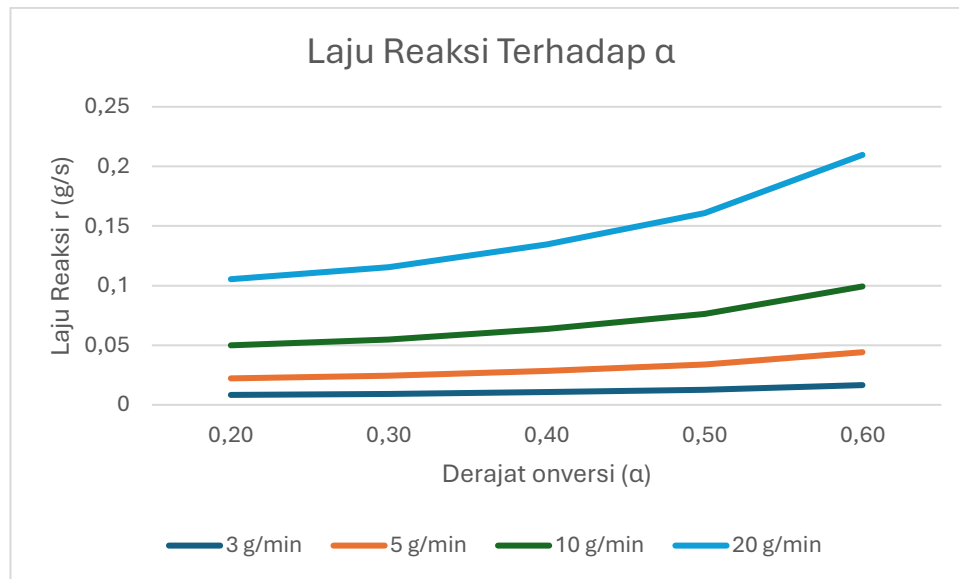
Variasi laju alir biomassa umpan (3 g/menit hingga 20 g/menit) tidak mengubah kinetika intrinsik, namun berdampak linear pada laju reaksi total (dalam satuan massa per waktu). Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan parameter kinetika tetap, apabila laju umpan dinaikkan, laju pembentukan produk volatil (g/s) meningkat proporsional. Sebagai ilustrasi, pada α tertentu (misal $\alpha = 0,5$) dan temperatur konstan, laju reaksi untuk laju umpan 20 g/menit sekitar empat kali lipat lebih besar daripada laju reaksi pada 5 g/menit. Hal ini karena jumlah biomassa yang terurai per satuan waktu bertambah seiring laju masukan yang lebih tinggi.

Tabel 4. Simulasi Laju Reaksi dengan Variasi Laju Alir

α	T (K)	k(T) (1/s)	f(α)	r(T, α) (g/s)			
				3 g/min	5 g/min	10 g/min	20 g/min
0,20	556,33351	0,009229112	18,0332106	0,0083215	0,0138692	0,02773842	0,05547684
0,30	566,61096	0,0173015	10,5495315	0,0091261	0,0152102	0,03042056	0,06084113
0,40	576,59797	0,03118724	6,81539347	0,0106276	0,0177127	0,03542556	0,07085112
0,50	586,70061	0,05545846	4,58043236	0,0127011	0,0211686	0,04233729	0,08467458
0,60	598,67825	0,10700999	3,09401510	0,0165545	0,0275908	0,05518176	0,11036352

Hasil simulasi memperlihatkan kurva laju reaksi terhadap fraksi konversi (r vs. α) untuk berbagai laju alir saling terpisah, menegaskan sifat linear antara r dengan laju alir massa. Namun, dalam praktiknya, peningkatan laju alir biomassa dapat memengaruhi distribusi panas dan waktu tinggal uap produk dalam reaktor, yang akhirnya bisa memengaruhi *yield* produk (misalnya, pada laju umpan sangat tinggi, kemungkinan terjadi pendinginan kurang sempurna sehingga tar dapat *ter-crack* menjadi gas).

Meskipun analisis ini menggunakan pendekatan kinetika homogen sederhana, penting mempertimbangkan bahwa pada skala reaktor nyata, keterbatasan perpindahan panas atau difusi dapat muncul jika laju umpan terlalu tinggi, sehingga kinetika teramati bisa tampak lebih lambat dari prediksi. Akan tetapi, selama kita beroperasi di rezim kinetika-terbatas (bukan difusi-terbatas), hasil simulasi ini valid: menaikkan *throughput* meningkatkan total laju produksi gas dan minyak secara linier, tanpa mengubah konversi fraksional pada kondisi operasi tertentu. Dengan kata lain, persen konversi pada suhu tertentu tidak tergantung pada laju umpan, tetapi jumlah absolut produk yang dihasilkan per menit meningkat sesuai kenaikan laju umpan.



Gambar 6. Kurva Laju Reaksi vs. α dengan Variasi Laju Alir Biomassa

Pengaruh Suhu Akhir Pirolisis terhadap Distribusi Produk

Selain mempengaruhi laju reaksi, suhu akhir pirolisis (suhu puncak yang dicapai reaktor) sangat menentukan distribusi produk yang dihasilkan, yaitu fraksi padatan karbon (biochar), cairan kondensat tar (bio-oil), dan gas non-kondensable. Tren umum menunjukkan bahwa peningkatan suhu akhir akan mengurangi yield padatan dan meningkatkan yield gas, dengan yield cair mencapai maksimum pada suhu menengah. Untuk ilustrasi, Tabel IV.2 menyajikan contoh distribusi produk (dalam % berat) dari pirolisis campuran sekam-tongkol (50:50) pada skala laboratorium (reaktor batch) dengan waktu tinggal cukup lama, pada tiga suhu akhir berbeda (400, 500, 600 °C). Meskipun angka absolut dapat bervariasi antar sistem, tren perubahannya jelas terlihat: ketika suhu dinaikkan dari 400 °C ke 600 °C, yield char menurun signifikan (dari ~30% menjadi ~15%), sementara yield gas meningkat drastis (dari ~10% menjadi ~40%). Yield bio-oil cair mengalami sedikit penurunan saat suhu naik: dari ~60% pada 400 °C turun menjadi ~55% pada 500 °C, lalu sekitar 45% pada 600 °C. Penurunan bio-oil ini menunjukkan bahwa pada suhu sangat tinggi sebagian besar tar terus ter-cracking menjadi gas. Tren di atas konsisten dengan teori pirolisis biomassa: pada suhu rendah, banyak volatil yang belum terlepas sempurna atau terkondensasi menjadi tar cair berat sehingga char tinggi; pada suhu moderat (~500 °C), keluaran bio-oil biasanya maksimum karena volatil terlepas cukup banyak namun degradasi tar menjadi gas belum berlebihan; pada suhu tinggi, tar yang terbentuk segera terurai lanjut menjadi gas sehingga fraksi gas dominan, bio-oil menurun dan char minimal. Penelitian lain melaporkan hal serupa. Misalnya, ketika suhu pirolisis dinaikkan dari 400 ke 600 °C, char yield bisa turun dari sekitar 60% menjadi 35%, sementara gas naik proporsional. Bahkan, pada suhu sangat tinggi (misal 800 °C), gas dapat menjadi produk terbesar (hingga ~75–80%) sedangkan char tinggal <10%. Ini karena pada suhu tinggi hampir seluruh komponen volatile terlepas dan tar mengalami secondary cracking menghasilkan gas-gas ringan, menyisakan char sangat sedikit. Sebaliknya, pada suhu rendah (~400 °C), banyak material volatil tertahan sebagai tar cair (atau belum terevolusi), sehingga char yang tertinggal relatif lebih tinggi. Dalam konteks campuran sekam–tongkol, tingginya kandungan volatile terutama dari tongkol (~80% volatile matter) menyebabkan pada 400 °C saja bio-oil yang dihasilkan sudah cukup tinggi (~60%). Namun char masih 30%, mengindikasikan belum terdevolatilisasi sempurna (banyak komponen tinggal sebagai char) dan kemungkinan terbentuknya char sekunder dari polimerisasi tar (mekanisme repolymerization). Saat suhu ditingkatkan ke 600 °C, devolatilisasi berlangsung lebih lengkap

dan char sekunder pun ter-crack, sehingga yield char turun ke 15%. Char yang tersisa pada 600 °C diduga terutama berupa abu dan karbon inert (sisa lignin/arang yang sangat stabil), menandakan konversi mendekati tuntas. Sementara itu, penurunan bio-oil dari 55% (500 °C) ke 45% (600 °C) menunjukkan sebagian tar dipecah lebih lanjut menjadi gas (CO, CO₂, CH₄, H₂, dll) pada suhu lebih tinggi. Peningkatan yield gas dengan suhu tinggi adalah konsekuensi dari reaksi cracking sekunder tar yang semakin intensif pada suhu tersebut. Selain kuantitas, kualitas komposisi produk juga dipengaruhi suhu. Biochar yang dihasilkan pada suhu lebih tinggi umumnya memiliki kandungan karbon fiks lebih tinggi, porositas lebih berkembang, dan kandungan volatil lebih rendah – cocok untuk aplikasi seperti karbon aktif atau briket bahan bakar berkarbon tinggi. Bio-oil dari suhu rendah cenderung mengandung banyak senyawa berberat molekul tinggi (aspal, gula terpolimerisasi, dll) sehingga lebih kental/berat; sedangkan bio-oil pada suhu tinggi lebih ringan (lebih kaya fraksi fenolik dan aromatik sederhana hasil pemecahan senyawa kompleks). Gas yang dihasilkan pada suhu tinggi juga lebih kaya akan gas-gas bernilai kalor tinggi (seperti H₂, CO) karena cracking tar menghasilkan molekul kecil yang energetik. Implikasi praktis: jika target utama operasi adalah produksi biochar, sebaiknya pirolisis pada suhu agak rendah agar yield char maksimal; jika menargetkan bio-oil maksimum, dipilih suhu moderat (~500 °C); sedangkan untuk menghasilkan lebih banyak fuel gas, diperlukan suhu sangat tinggi. Dengan demikian, pemahaman ini menghubungkan parameter kinetika dan kondisi operasi dengan output produk yang diharapkan.

KESIMPULAN

Pada skala laboratorium (misal TGA), sebelumnya telah diamati efek laju pemanasan pada profil laju reaksi (kurva DTG bergeser). Namun, pengaruhnya terhadap yield akhir produk juga penting. Beberapa literatur mencatat tren berikut: peningkatan laju pemanasan menurunkan yield char dan meningkatkan yield tar/gas. Alasannya, pada pemanasan yang sangat cepat, material mengalami “explosive volatilization” – molekul volatil terlepas begitu cepat sehingga kurang sempat berpolimerisasi/berkondensasi menjadi char padat, alhasil lebih banyak terbawa menjadi uap tar atau gas. Sebaliknya, pada pemanasan lambat, volatil keluar bertahap sehingga sebagian dapat mengalami reaksi sekunder (kondensasi, repolimerisasi) di dalam matriks biomassa, membentuk char tambahan (proses karbonisasi lanjutan). Dengan demikian, slow pyrolysis biasanya menghasilkan char lebih tinggi (karena volatil sempat membentuk char), sedangkan fast/flash pyrolysis menghasilkan tar dan gas lebih tinggi (karena volatil lepas dengan cepat). Tren ini selaras dengan tujuan praktis: teknologi fast pyrolysis memang dirancang untuk memaksimalkan bio-oil, sementara slow pyrolysis untuk menghasilkan char (arang) sebagai produk utama. Oleh karena itu, pengaturan laju pemanasan menjadi salah satu kendali untuk mengarahkan distribusi produk sesuai kebutuhan.

REFERENSI

- Al-Ghussain, L. (2019). Global warming: review on driving forces and mitigation. In *Environmental Progress and Sustainable Energy* (Vol. 38, Issue 1). <https://doi.org/10.1002/ep.13041>
- Bhavanam, A., & Sastry, R. C. (2015). Kinetic study of solid waste pyrolysis using distributed activation energy model. *Bioresource Technology*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.028>
- Cai, J., Wu, W., Liu, R., & Huber, G. W. (2013). A distributed activation energy model for the pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Green Chemistry*, 15(5). <https://doi.org/10.1039/c3gc36958g>

- Diffenbaugh, N. S., & Burke, M. (2019). Global warming has increased global economic inequality. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(20). <https://doi.org/10.1073/pnas.1816020116>
- Feng, Y., Qiu, K., Zhang, Z., Li, C., Rahman, M. M., & Cai, J. (2022). Distributed activation energy model for lignocellulosic biomass torrefaction kinetics with combined heating program. *Energy*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122228>
- Hansen, J. E., Sato, M., Simons, L., Nazarenko, L. S., Sangha, I., Kharecha, P., Zachos, J. C., von Schuckmann, K., Loeb, N. G., Osman, M. B., Jin, Q., Tselioudis, G., Jeong, E., Lacis, A., Ruedy, R., Russell, G., Cao, J., & Li, J. (2023). Global warming in the pipeline. *Oxford Open Climate Change*, 3(1). <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgad008>
- Haruna, Moh. F. (2020). Analisis Biomasa Dan Potensi Penyerapan Karbon Oleh Tanaman Pohon Di Taman Kota Luwuk. *Jurnal Pendidikan Glasser*, 4(2). <https://doi.org/10.32529/glasser.v4i2.742>
- Haryanti, P. W. M. T. A. &. (2022). Strategi Penanggulangan Pemanasan Global. *E-Jurnal.Iaipd-Nganjuk.Ac.Id*, 9(2).
- Ji, G., Raheem, A., Wang, X., Fu, W., Qu, B., Gao, Y., Li, A., Zhao, M., Dong, W., & Zhang, Z. (2020). Kinetic analysis of algae gasification by distributed activation energy model. *Processes*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/PR8080927>
- Kumar, A. (2018). Global warming, climate change and greenhouse gas mitigation. *Biofuels: Greenhouse Gas Mitigation and Global Warming: Next Generation Biofuels and Role of Biotechnology*, 1–16.
- Leu, B. (2021). Dampak pemanasan global dan upaya pengen-daliannya melalui pendidikan lingkungan hidup dan pendidikan islam. *AT-TADBIR: Jurnal Manajemen Pendidikan Islam*, 1(2), 1–15.
- Niapele, S. (2013). Estimasi biomassa dan karbon tegakan dipterocarpa pada ekosistem hutan primer dan LOA (Log Over Area) di PT. Sari Bumi Kusuma (SBK) Kalimantan Tengah. *Agrikan: Jurnal Agribisnis Perikanan*, 6(1). <https://doi.org/10.29239/j.agrikan.6.1.29-36>
- Pandebesie, E. S., & Kartini, A. M. (2016). PRODUKSI BIOETANOL dari BATANG Sorghum bicolor (L.) Moench dengan Saccharomyces cerevisiae dan KONSORSIUM S. cerevisiae-Pichia stipitis. *Jurnal Purifikasi*, 16(2). <https://doi.org/10.12962/j25983806.v16.i2.43>
- Papilo, P., Kunaifi, K., Hambali, E., Nurmiati, N., & Pari, R. F. (2016). Penilaian Potensi Biomassa Sebagai Alternatif Energi Kelistrikan. *Jurnal PASTI (Penelitian Dan Aplikasi Sistem Dan Teknik Industri)*, 9(2).
- Parinduri, L., Yusmartato, Y., & Parinduri, T. (2018). Kontribusi Konversi Mobil Konvensional Ke Mobil Listrik Dalam Penanggulangan Pemanasan Global. *JET (Journal of Electrical Technology)*, 3(2), 116–120.
- Sayyidati, A. (2017). Isu Pemanasan Global dalam Pergeseran Paradigma Keamanan pada Studi Hubungan Internasional. *Jurnal Hubungan Internasional*, 6(1), 38–45.
- Sindhuwati, C., Mustain, A., Rosly, Y. O., Aprijaya, A. S., Mufid, M., Suryandari, A. S., Hardjono, H., & Rulianah, S. (2021). Review: Potensi Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Bahan Baku Pembuatan Bioetanol dengan Metode Fed Batch pada Proses Hidrolisis. *Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan*, 5(2). <https://doi.org/10.33795/jtkl.v5i2.224>