

Analisis Termodinamika Pembakaran Pada Campuran Bahan Bakar Batubara Sub-Bituminous Dengan Limbah Tandan Kosong Sawit

Deaz Rangga Abi Sukma¹, Akhmad Faruq Alhikami², Cepi Yazirin³

Email: deazranggaabisukma@gmail.com

alhikami@unisma.ac.id

cepiyazirin10@unisma.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik termodinamika pembakaran campuran batubara *sub-bituminous* dengan limbah tandan kosong kelapa sawit (EFB) menggunakan metode *thermogravimetric analysis* (TGA). Sampel yang digunakan terdiri dari batubara murni (COAL 100%), campuran EFB 20%, dan EFB 40%. Analisis dilakukan terhadap parameter degradasi massa, perubahan *Free Gibbs Energy* (ΔG), *enthalpy* (ΔH), dan *entropy* (ΔS) pada masing-masing tahap degradasi *thermal*. Hasil menunjukkan bahwa campuran EFB 20% memiliki tingkat kehilangan massa tertinggi, mengindikasikan kemudahan degradasi *thermal* yang lebih baik. Penambahan EFB menyebabkan peningkatan ΔG pada tahap awal pembakaran, namun pada tahap kedua justru menurun drastis, menandakan reaksi yang lebih spontan. Nilai ΔH tertinggi terjadi pada tahap awal pembakaran EFB, sedangkan pada tahap kedua terjadi penurunan tajam yang mencerminkan efisiensi reaksi. Seluruh nilai ΔS tercatat negatif, menunjukkan arah reaksi menuju keteraturan, dengan batubara murni memiliki nilai ΔS paling negatif di tahap awal. Penambahan EFB ke dalam batubara meningkatkan variasi tahap degradasi dan efisiensi *thermal*, namun memerlukan perhatian khusus pada tahap akhir pembakaran karena keberadaan sisa karbon kompleks.

Kata kunci : *Pembakaran, Batubara Sub-Bituminous, EFB, Termodinamika, TGA, Cofiring.*

PENDAHULUAN

Pembakaran langsung merupakan salah satu metode utama dalam konversi energi biomassa dan telah dimanfaatkan sejak manusia pertama kali menemukan api (Chen dkk., 2021). Pada skala kecil, metode ini umum digunakan sebagai sumber energi utama di wilayah pedesaan, terutama dalam kegiatan rumah tangga seperti memasak, di mana biomassa digunakan dalam bentuk kayu bakar. Sementara itu, pada skala komersial yang lebih besar, meskipun masih berkembang, pembakaran langsung umumnya dimanfaatkan untuk kebutuhan seperti proses pengeringan dan pembangkit energi listrik. Baru-baru ini, setelah bumi mengalami pemanasan global, motivasi

penggunaan biomassa menggantikan bahan bakar fosil di pembangkit listrik tenaga uap, industri semen, dan pembuatan besi mengalami peningkatan. Hal ini didorong oleh persepsi bahwa biomassa merupakan bahan bakar karbon netral, memiliki rasio molar hidrogen terhadap karbon (H/C) yang tinggi, serta menghasilkan emisi CO₂ yang lebih rendah dibandingkan bahan bakar fosil dengan rasio H/C serupa (Ndibe dkk., 2015). Oleh karena itu, penggunaan biomassa dianggap mampu meminimalisir jejak karbon dari sektor-sektor industri tersebut.

Perbedaan signifikan dalam karakteristik pembakaran antara biomassa dan batubara menjadikan proses substitusi batubara dengan biomassa dalam jumlah besar sebagai tantangan yang tidak mudah. Sebagai solusi praktis yang dapat diterima adalah mengganti sebagian konsentrasi bahan bakar fosil dengan biomassa untuk mengurangi tingkat ketidakcocokan yang selanjutnya disebut *co-firing* (Guo & Zhong, 2018).

Ketertarikan terhadap teknologi *co-firing* biomassa terus meningkat seiring dengan urgensi untuk segera menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK) dari pembangkit listrik skala besar. *Co-firing* dianggap sebagai solusi jangka pendek yang paling layak karena telah terbukti secara teknis dan lebih ekonomis dalam konteks pengurangan emisi GRK pada pembangkit listrik berbahan bakar batubara (Xue dkk., 2020). Meskipun penelitian terkait teknologi *carbon capture and storage* (CCS) terus berkembang dan banyak negara telah menginvestasikan dana besar untuk pembangunan fasilitas uji coba, implementasi CCS secara komersial dalam skala luas masih sulit terwujud dalam waktu dekat. Namun jika tantangan teknis CCS dapat diatasi, biaya pembangkit listrik diperkirakan tetap akan tinggi.

MATERIAL

Batubara merupakan batuan sedimen yang bersifat heterogen secara kimia dan fisika, dengan kandungan utama berupa unsur karbon, hidrogen, dan oksigen, serta sejumlah kecil unsur tambahan seperti belerang dan nitrogen. Selain itu, batubara juga mengandung senyawa anorganik pembentuk abu (*ash*), yang tersebar dalam bentuk partikel mineral di seluruh struktur batubara. Secara

umum, batubara dapat didefinisikan sebagai batuan padat yang mudah rapuh, berwarna coklat tua hingga hitam, bersifat mudah terbakar, dan terbentuk melalui proses perubahan kimia dan fisika dari material tumbuhan.

Berdasarkan kualitasnya, batubara memiliki beberapa jenis dan kelas (*grade*) yang secara umum diklasifikasikan menjadi empat kelas utama menurut standar ASTM atau lima kelas yaitu: *Gambut/Peat*, *Lignit*, *Subbituminous/Bitumen*, *Menengah*, *Bituminous*, dan *Antrasit*. Komponen kimia dalam batubara dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama, yaitu unsur organik dan anorganik. Unsur organik terdiri dari karbon (C), yang dapat berbentuk struktur *aromatik* maupun *alifatik*; hidrogen (H), yang umumnya ditemukan dalam gugus metil ($-CH_3$) dan *metilena* (CH_2-); serta oksigen (O), yang hadir dalam berbagai gugus fungsional seperti *hidroksil* ($-OH$), *karboksil* ($-COOH$), *karbonil* ($=C=O$), dan *eter* ($-O-$). Selain itu, unsur nitrogen (N), sulfur (S) yang terdapat dalam bentuk gugus *thiolik* ($R-SH$) dan *alifatik sulfida* ($R-S-R$), serta fosfor (P) juga termasuk dalam komponen organik. Sementara itu, unsur anorganik dalam batubara umumnya berupa logam yang berasal dari mineral pengotor, seperti silika (Si), aluminium (Al), besi (Fe), kalsium (Ca), dan magnesium (Mg.) (Deng dkk., 2019) (Shi dkk., 2013) (Qiu dkk., 2022).

Salah satu sumber biomassa terbesar berasal dari sektor perkebunan kelapa sawit. Indonesia memiliki potensi kelapa sawit yang sangat besar dan tersebar luas di berbagai wilayah, khususnya di Pulau Sumatera dan Kalimantan. Produksi minyak sawit nasional mengalami

peningkatan dari 21.390.326 ton pada tahun 2009 menjadi 22.899.109 ton pada tahun 2011. Salah satu limbah padat yang dihasilkan, yaitu tandan kosong kelapa sawit (TKKS), merupakan hasil samping dari proses perebusan dan perontokan buah sawit. TKKS memiliki kadar air yang tinggi, sekitar 65%, sehingga dalam kondisi tersebut belum memungkinkan untuk langsung digunakan sebagai bahan bakar campuran dalam proses pembangkit listrik tenaga uap atau aplikasi termal lainnya (Maryudi, 2014).

TERMOGRAVIMETRI ANALISIS

Thermogravimetry Analysis (TGA), didasari pada perubahan berat akibat pemanasan (Klančnik dkk., 2010). Termogravimetri merupakan teknik untuk mengukur perubahan berat dari suatu senyawa sebagai fungsi dari suhu ataupun waktu, dengan hasil berupa kurva kontinu yang merepresentasikan tahapan dekomposisi secara skematik. TGA bermanfaat untuk menganalisis material yang mengalami perubahan massa, baik penurunan maupun peningkatan, yang disebabkan oleh proses dekomposisi, oksidasi, atau hilangnya komponen volatil seperti air. Penurunan massa dapat terjadi karena proses dekomposisi (pemutusan ikatan kimia), evaporasi (penguapan senyawa volatil akibat kenaikan suhu), reduksi (reaksi dengan agen pereduksi), dan desorpsi (pelepasan zat yang teradsorpsi). Sebaliknya, peningkatan massa biasanya disebabkan oleh proses oksidasi, yakni interaksi material dengan oksidator, serta adsorpsi, yaitu penyerapan zat dari lingkungan sekitar oleh permukaan material.

Prinsip kerja dari Analisis Termogravimetri (TGA) dimulai dengan pemilihan sampel dalam bentuk serbuk yang kemudian ditempatkan ke dalam cawan kecil berbahan platina, alumina, atau teflon. Pemilihan jenis cawan disesuaikan dengan karakteristik sampel, dengan pertimbangan agar tidak terjadi reaksi antara sampel dan material cawan, serta mencegah sampel melekat saat proses pemanasan. Prosedur analisis juga membutuhkan bahan standar sebagai acuan dan penyeimbang timbangan mikro, di mana alumina sering digunakan untuk tujuan ini. Baik bahan standar maupun sampel dimasukkan ke dalam cawan dan kemudian dipasang ke dalam instrumen TGA. Selanjutnya, suhu dalam sistem TGA dapat diatur sesuai dengan laju pemanasan yang diinginkan. Selama proses pemanasan, perubahan massa sampel diamati hingga suhu mencapai titik akhir. Untuk menjaga kestabilan suhu dan mencegah reaksi sampel dengan udara, gas inert dialirkan ke dalam sistem. Gas ini kemudian dibuang melalui saluran keluaran yang dikenal sebagai exhaust (Coats & Redfern, 1963).

METODE COATS-REDFERN

Metode Coats-Redfern merupakan salah satu pendekatan yang digunakan untuk menentukan mekanisme dekomposisi material berdasarkan pemanasan dengan satu laju pemanasan tetap. Metode ini dipilih karena dinilai efisien, mengingat hanya memerlukan satu kecepatan pemanasan dalam proses analisisnya. Namun demikian, metode ini tergolong lebih kompleks karena memerlukan penggunaan ekspresi aljabar $g(\alpha)$ secara menyeluruh dalam perhitungannya. Oleh sebab itu, Coats-

Redfern dikenal pula sebagai metode *model fitting* (Li dkk., 2023).

TERMODINAMIKA PEMBAKARAN

Termodinamika merupakan cabang ilmu kimia yang membahas tentang fenomena perpindahan kalor dalam suatu reaksi kimia. Kajian utama dalam termodinamika meliputi besarnya energi kalor yang dihasilkan oleh sejumlah tertentu zat pereaksi, serta metode yang digunakan untuk mengukur energi kalor tersebut. Termodinamika pembakaran adalah cabang termodinamika yang mempelajari proses konversi energi kimia dalam bahan bakar menjadi energi termal melalui reaksi pembakaran. Proses ini melibatkan reaksi oksidasi eksotermik antara bahan dan oksigen, menghasilkan panas, gas dan terkadang produk padat (seperti abu).

Free Gibbs Energy

Energi Bebas Gibbs merupakan salah satu bentuk potensial termodinamika yang digunakan untuk menghitung besar maksimum kerja *reversible* yang dapat dilakukan oleh suatu sistem termodinamika pada kondisi suhu dan tekanan tetap (*isothermal* dan *isobaric*).

$$\Delta G = Ea + R \times Tm \times \ln\left(\frac{Kb \times T}{hA}\right)$$

Enthalpy

Entalpi merupakan besaran dalam termodinamika yang merepresentasikan total energi suatu sistem, yaitu gabungan antara energi internal dan energi yang digunakan untuk melakukan kerja terhadap lingkungannya. Dalam praktiknya, entalpi biasanya dinyatakan dalam bentuk

perubahan entalpi (ΔH) untuk mengukur energi yang terlibat dalam suatu proses.

$$\Delta H = Ea - R \times T$$

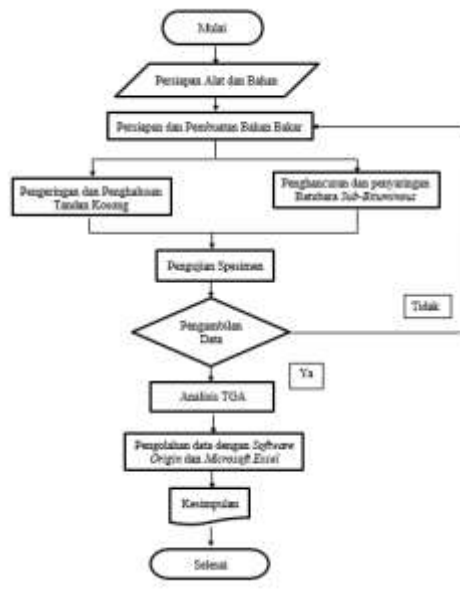
Entropy

Entropi merupakan besaran termodinamika yang menggambarkan tingkat ketidakteraturan sistem serta jumlah energi dalam sistem yang tidak tersedia untuk melakukan kerja pada suatu temperatur tertentu.

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{Tm}$$

METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode penelitian eksperimental yang berupa kajian teoritis. Pengolahan data pada penelitian ini menggunakan metode eksperimental (*experimental research*). Pengamatan pada benda yang akan di uji yaitu dilakukan pengujian pembakaran secara aktual terhadap batubara *sub-bituminous* dengan *co-firing* tandan kosong dengan variasi tekanan dan temperatur dengan skala laboratorium dengan metode *Coats-Redfern*.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian berikut ialah :

1. Blender adalah mesin yang Digunakan untuk menghaluskan bahan baku.



Gambar 2. Mesin Blender

2. Ayakan digunakan untuk menyaring bahan baku yang telah dihaluskan untuk mendapatkan tekstur yang lebih lembut.



Gambar 3. Ayakan

3. *Alumunium Foil* digunakan sebagai alas untuk menampung bahan hasil ayakan.



Gambar 4. *Alumunium Foil*

4. Loyang digunakan sebagai wadah untuk pengayakan.



Gambar 5. Loyang

5. Timbangan Analitik digunakan untuk menimbang bahan baku yang akan diproses



Gambar 6. Timbangan Analitik

6. *Batubara Sub-Bituminous*



Gambar 7. *Batubara Sub-Bituminous*

7. Tandan Kosong Kelapa Sawit



Gambar 8. Tandan Kosong Kelapa Sawit

Langkah-langkah penelitian:

- Dimulai dengan studi pendahuluan untuk mengetahui sistem kerja dan informasi pendukung yang dibutuhkan dan literatur yang digunakan untuk pemecah masalah.
- Mempersiapkan bahan yang akan di uji.
- Melakukan pengujian bahan bakar.
- Mengambil dan mengolah data yang telah dikumpulkan.
- Melakukan analisis data.
- Menarik kesimpulan dan saran terhadap pemecah masalah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil Degradasi Massa

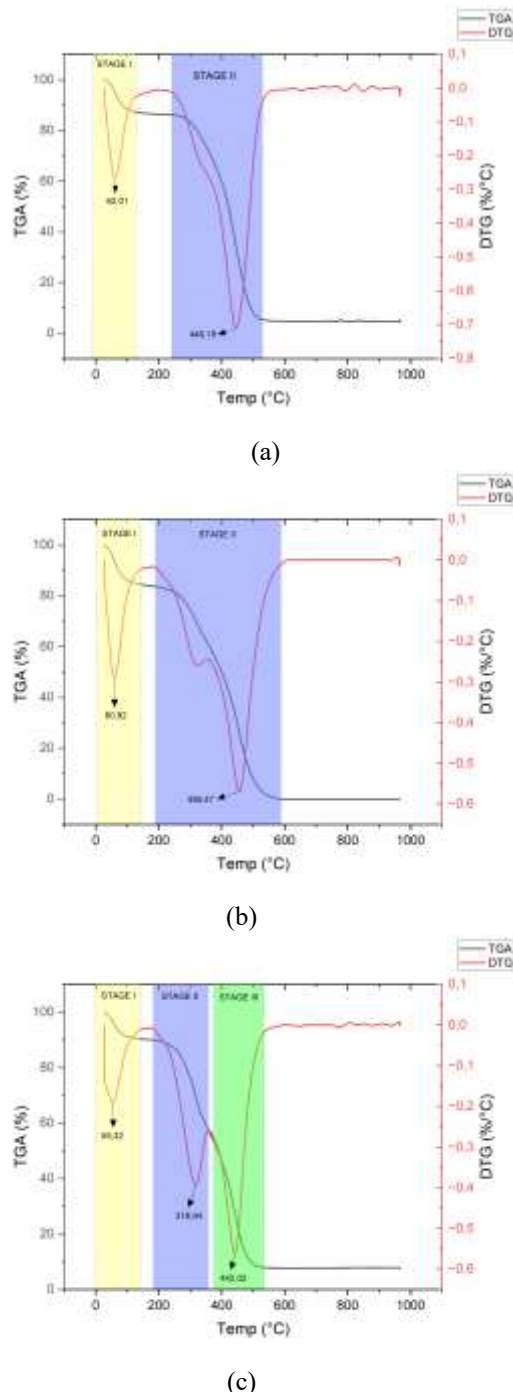
Tabel 1. Profil Degradasi Massa

Material	Weight Loss %	STAGE 1 °C	STAGE 2 °C	STAGE 3 °C
COAL 100%	95	27,81 – 128,78	240,21 – 531,04	
EFB 20%	99	27,63 – 146	192 – 587,12	
EFB 40%	92	28,17 – 141,61	182,99 – 358,63	374,58 – 535,27

Pada table 1 menunjukkan data kehilangan massa (*weight loss*) dan rentang suhu pada tiga tahap (*stage*) degradasi *thermal* dari tiga jenis material yang berbeda, yaitu batubara *sub-bituminous* murni (*COAL* 100%), campuran batubara dengan 20% EFB (*Empty Fruit Bunch*), dan campuran batubara dengan 40% EFB. Pada material *COAL* 100%, total kehilangan massa mencapai 95%, dengan proses degradasi terjadi pada dua tahap. *Stage* pertama berlangsung pada suhu 27,81°C

hingga 128,78°C, yang menandai dekomposisi penguapan air bebas dan kelembaban. *Stage* kedua terjadi pada suhu 240,21°C hingga 531,04°C, menunjukkan fase akhir dari degradasi *thermal* batubara dan menandakan terjadinya pembakaran utama dari senyawa-senyawa organik kompleks dalam batubara, terutama yang tersusun dari ikatan karbon (C) dan hidrogen (H). Pada rentang suhu ini, terjadi pemutusan ikatan kimia C-H dan C-C yang menghasilkan pelepasan gas-gas *volatile* seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), dan metana (CH₄), serta menghasilkan residu berupa arang (*char*). Pada material dengan campuran EFB 20%, kehilangan massa meningkat menjadi 99%, menunjukkan bahwa bahan ini lebih mudah terdegradasi secara *thermal*. *Stage* pertama terjadi pada suhu 27,63°C hingga 146°C, yang menandakan dekomposisi air atau penguapan kelembaban. *Stage* kedua berlangsung pada suhu yang lebih luas, yaitu 192°C hingga 587,12°C, menunjukkan dekomposisi yang lebih intensif dibandingkan *COAL* 100%, bahwa komponen dalam campuran ini lebih reaktif dan terdegradasi secara bertahap dalam kisaran suhu yang panjang. Sementara itu, pada campuran EFB 40%, kehilangan massa sedikit lebih rendah, yakni 92%. *Stage* pertama terjadi antara 28,17°C hingga 141,61°C, seperti dengan sampel sebelumnya. *Stage* kedua berlangsung antara 182,99°C hingga 358,63°C, dengan rentang suhu yang lebih sempit dibandingkan dua material sebelumnya. Pada material ini menunjukkan adanya *stage* ketiga pada suhu 374,58°C hingga 535,27°C, yang menandakan degradasi sisa karbon dalam campuran EFB dan batubara. Secara keseluruhan, peningkatan persentase EFB dalam campuran

mempengaruhi rentang suhu degradasi dan total kehilangan massa, menunjukkan bahwa EFB memiliki karakteristik degradasi *thermal* yang berbeda dibandingkan batubara murni.



Gambar 9. Profil Degradasi Massa (a) COAL 100%, (b) EFB 20%, (c) EFB 40%

Pada Gambar 9 memperlihatkan profil degradasi massa dari tiga jenis

material : COAL 100%, EFB 20%, dan EFB 40%. Untuk COAL 100%, kurva TGA menunjukkan tiga tahap degradasi. *Stage* pertama terjadi antara suhu 27,81°C hingga 128,78°C, yang menggambarkan penguapan air bebas dan *volatile*, penurunan massa di tahap ini terlihat cukup landau. *Stage* kedua, dengan rentang suhu 240,21°C hingga 531,04°C, menunjukkan penurunan massa yang besar di kurva TGA serta puncak jelas pada kurva DTG, menandakan dekomposisi senyawa ikatan karbon (C) dan hidrogen (H) di dalam batubara. Pada EFB 20%, kurva TGA memperlihatkan pola degradasi yang lebih kompleks dan cepat dibandingkan COAL 100%. *Stage* pertama (27,63°C – 146°C) menandai dekomposisi air atau penguapan, dan kurva DTG menunjukkan puncak kecil pada rentang ini. *Stage* kedua (192°C – 587,12°C) memperlihatkan puncak DTG yang tinggi, yang menandai degradasi pada komponen senyawa organik dan sisa karbon dalam campuran EFB dan batubara. Sementara itu, EFB 40% menunjukkan karakteristik degradasi *thermal* yang lebih luas dan bertahap. Grafik mencatat tiga tahap degradasi yang sangat jelas, dan ini didukung oleh kurva TGA yang memperlihatkan penurunan massa bertahap serta tiga puncak berbeda pada kurva DTG. *Stage* pertama (28,17°C – 141,61°C) menandakan hilangnya air atau penguapan. *Stage* kedua (182,99°C – 358,63°C) menunjukkan degradasi cepat senyawa organik seperti selulosa dan hemiselulosa, dan *stage* ketiga (374,58°C – 535,27°C) merepresentasikan degradasi komponen sisa karbon. Ini menunjukkan bahwa peningkatan kandungan EFB memberikan kontribusi signifikan terhadap pembentukan tahap ketiga, yang tidak

terlalu terlihat pada *COAL* 100% dan EFB 20%.

Dengan demikian, kombinasi data tabel dan grafik ini secara menyeluruh menunjukkan bahwa semakin tinggi proporsi EFB dalam campuran, maka semakin kompleks dan meluas rentang degradasi termalnya, serta memunculkan tahapan degradasi tambahan yang tidak tampak pada batubara murni.

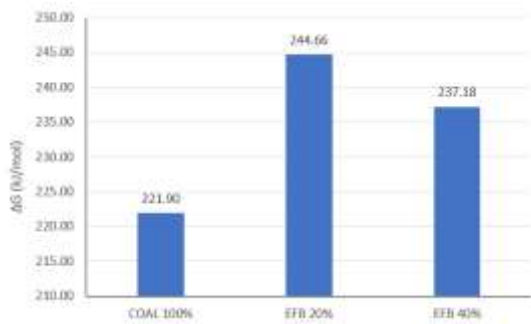
Gibbs Free Energy

Tabel 2. Gibbs Free Energy

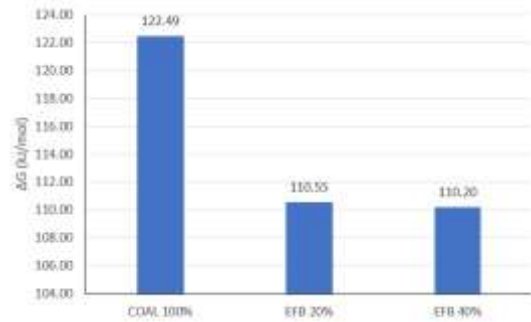
STAGE 1						
Material	T_p	E_a	A	K_h	h	ΔG
Units		kJ/mol	min ⁻¹			kJ/mol
COAL 100%	444.97	139.466	1931	1.38E-23	6.63E-34	221.90
EFB 20%	454.75	162.477	3406	1.38E-23	6.63E-34	244.66
EFB 40%	441.35	159.344	5577	1.38E-23	6.63E-34	237.18
STAGE 2						
Material	T_p	E_a	A	K_h	h	ΔG
Units		kJ/mol	min ⁻¹			kJ/mol
COAL 100%	444.97	46.13	9977	1.38E-23	6.63E-34	122.49
EFB 20%	454.75	27.565	2753	1.38E-23	6.63E-34	110.55
EFB 40%	441.35	36.431	16933	1.38E-23	6.63E-34	110.20
STAGE 3						
Material	T_p	E_a	A	K_h	h	ΔG
Units		kJ/mol	min ⁻¹			kJ/mol
COAL 100%						
EFB 20%						
EFB 40%	441.35	73.011	11003908	1.38E-23	6.63E-34	123.02

Tabel 2 menampilkan nilai *Gibbs Free Energy* (ΔG) pada tiga tahap degradasi *thermal* untuk tiga jenis material : batubara *sub-bituminous* murni (*COAL* 100%), campuran dengan 20% EFB, dan campuran dengan 40% EFB. Nilai ΔG memberikan gambaran mengenai spontanitas termodinamika dari proses degradasi, semakin tinggi nilai ΔG , semakin tidak spontan reaksi tersebut. *Stage* pertama, pada tahap awal ini, yang umumnya mencerminkan penguapan air

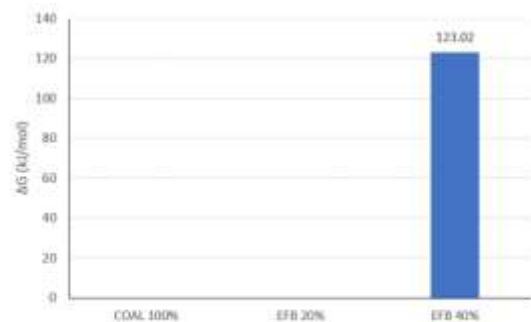
dan pelepasan senyawa *volatile* ringan, *COAL* 100% memiliki nilai ΔG sebesar 221,90 kJ/mol. Sementara itu, campuran EFB 20% dan EFB 40% menunjukkan nilai ΔG yang lebih tinggi, yaitu masing-masing 244,66 kJ/mol dan 237,18 kJ/mol. Peningkatan nilai ΔG pada campuran EFB ini menunjukkan bahwa proses awal degradasi menjadi lebih tidak spontan secara termodinamika ketika biomassa ditambahkan ke batubara. Hal ini disebabkan oleh komposisi EFB yang mengandung lebih banyak senyawa polar dan air terikat, sehingga membutuhkan lebih banyak energi untuk menginisiasi proses degradasi. *Stage* kedua adalah tahap utama pembakaran, nilai ΔG menurun secara signifikan pada semua sampel, mencerminkan peningkatan spontanitas reaksi *thermal*. Nilai terendah dimiliki oleh campuran EFB 40% sebesar 110,20 kJ/mol, diikuti oleh EFB 20% sebesar 110,55 kJ/mol, dan batubara murni sebesar 122,49 kJ/mol, menandakan bahwa reaksi yang terjadi pada tahap ini berlangsung lebih spontan dibanding tahap sebelumnya. Karena pada *Stage* kedua umumnya berlangsung proses dekomposisi utama senyawa karbon dan hidrogen, terutama pada batubara *sub-bituminous* dan komponen utama biomassa EFB (seperti selulosa dan hemiselulosa). *Stage* ketiga, tahap akhir degradasi ini terkait dengan degradasi struktur kompleks seperti karbon tetap. Pada EFB 40% menunjukkan nilai sedikit lebih tinggi yaitu 123,02 kJ/mol. EFB 40% menunjukkan kenaikan nilai ΔG , yang mengindikasikan bahwa kelebihan biomassa dapat memperlambat spontanitas reaksi.



(a)



(b)



(c)

Gambar 10. Grafik Gibbs Free Energy (a) COAL 100%, (b) EFB 20%, (c) EFB 40%

Pada Gambar 10 menampilkan grafik batang yang menggambarkan nilai *Gibbs Free Energy* (ΔG) pada tiga tahapan proses degradasi *thermal* untuk tiga jenis material : batubara *sub-bituminous* murni (COAL 100%), campuran batubara dengan 20% EFB, dan batubara dengan 40% EFB. Pada *Stage* pertama, grafik menunjukkan bahwa ΔG untuk COAL 100% adalah yang paling rendah, yaitu sebesar 221,90 kJ/mol, dibandingkan dengan campuran EFB 20% (244,66 kJ/mol) dan EFB 40% (237,18 kJ/mol). Hal ini menandakan bahwa proses awal degradasi *thermal* lebih spontan

terjadi pada batubara murni. Peningkatan nilai ΔG seiring penambahan EFB menunjukkan bahwa kehadiran biomassa menghambat spontanitas reaksi awal, kemungkinan karena kandungan kelembaban dan *volatile* tinggi pada EFB yang memerlukan energi lebih besar untuk dilepaskan. Pada *Stage* kedua, terjadi penurunan signifikan pada nilai ΔG di semua sampel, mencerminkan bahwa reaksi menjadi lebih spontan. Coal 100% menunjukkan ΔG sebesar 122,49 kJ/mol, sedangkan EFB 20% dan EFB 40% masing-masing memiliki nilai 110,55 kJ/mol dan 110,20 kJ/mol. Penurunan ini menunjukkan bahwa *Stage* kedua merupakan fase utama pembakaran, di mana terjadi dekomposisi besar-besaran dari komponen utama biomassa dan batubara, sehingga menghasilkan energi dalam jumlah besar dan membuat reaksi berjalan lebih cepat. Pada *Stage* ketiga, untuk EFB 40%, dengan nilai ΔG sebesar 123,02 kJ/mol, menunjukkan bahwa pada tahap akhir, reaksi menjadi sedikit kurang spontan. Hal ini bisa dikaitkan dengan proses pembakaran sisa padatan seperti karbon residu yang memerlukan lebih banyak energi dan menghasilkan reaksi yang lebih lambat.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis termogravimetri dan perhitungan termodinamika, dapat disimpulkan bahwa penambahan limbah *Empty Fruit Bunch* (EFB) dalam campuran bahan bakar batubara *sub-bituminous* berpengaruh signifikan terhadap karakteristik pembakaran sebagai berikut:

1. Dari aspek degradasi massa, campuran dengan EFB 20% menunjukkan kehilangan massa tertinggi (99%), mengindikasikan

bahwa material ini paling mudah terdegradasi. Sementara EFB 40% menghasilkan pola degradasi lebih kompleks dengan munculnya tahap ketiga, yang menunjukkan karakter pembakaran yang lebih bertahap.

2. Dari sudut pandang *Gibbs Free Energy* (ΔG), penambahan EFB meningkatkan nilai ΔG pada tahap awal, yang berarti proses awal pembakaran menjadi lebih tidak spontan. Namun pada tahap kedua, nilai ΔG menurun drastis untuk semua jenis bahan bakar, terutama pada campuran EFB, menunjukkan bahwa pembakaran utama berlangsung lebih spontan dibandingkan batubara murni. Tahap ketiga yang hanya terlihat pada EFB 40% menunjukkan nilai ΔG yang mulai meningkat kembali, mengindikasikan reaksi akhir yang kurang spontan karena sisa karbon kompleks.
3. Berdasarkan hasil termodinamika, campuran batubara *sub-bituminous* dengan EFB 20% menunjukkan performa pembakaran yang paling seimbang, baik dari sisi efisiensi degradasi massa dan kestabilan reaksi. Oleh karena itu, disarankan untuk mengutamakan penggunaan campuran dengan kadar EFB 20% dalam implementasi *co-firing* skala industri, guna mencapai efisiensi energi yang maksimal tanpa mengorbankan kestabilan proses pembakaran.

SARAN

1. Karena EFB memiliki kandungan mineral dan *volatile* yang tinggi,

disarankan agar penelitian selanjutnya tidak hanya fokus pada aspek energi dan termodinamika, tetapi juga memperhatikan karakter abu dan komposisi emisi gas buang. Hal ini penting untuk memastikan bahwa pemanfaatan EFB sebagai bahan bakar campuran tidak menimbulkan dampak lingkungan baru.

2. Mengingat karakteristik degradasi massa dan termodinamika EFB yang berbeda dari batubara murni, sistem pembakaran seperti *burner* atau *furnace* perlu disesuaikan agar mampu mengakomodasi volatilitas tinggi dan tahapan pembakaran bertingkat yang ditimbulkan oleh biomassa. Desain ruang bakar yang mendukung pembakaran bertahap akan meningkatkan efisiensi dan menurunkan potensi pembentukan emisi yang tidak diinginkan.
3. Melihat potensi EFB sebagai bahan bakar alternatif yang terbarukan dan terjangkau, disarankan agar teknologi *co-firing* batubara-biomassa terus dikembangkan dan diterapkan secara lebih luas pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), terutama sebagai upaya dekarbonisasi sektor energi dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.

Dengan kesimpulan dan saran ini, diharapkan penelitian dapat memberikan kontribusi nyata terhadap pengembangan teknologi pembakaran berbasis *co-firing*. Khususnya dalam memanfaatkan limbah EFB (*Empty Fruit Bunch*) sebagai bahan

bakar alternatif yang efisien dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, C., Bi, Y., Huang, Y., & Huang, H. (2021). Review on slagging evaluation methods of biomass fuel combustion. Dalam *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* (Vol. 155). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105082>
- Coats, A. W., & Redfern, J. P. (1963). Thermogravimetric analysis. A review. *The Analyst*, 88(1053), 906–924.
<https://doi.org/10.1039/AN9638800906>
- Deng, J., Song, J. J., Zhao, J. Y., Zhang, Y. N., Zhang, Y. X., & Shu, C. M. (2019). Gases and thermal behavior during high-temperature oxidation of weathered coal. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138(2), 1573–1582.
<https://doi.org/10.1007/s10973-019-08103-0>
- Guo, F., & Zhong, Z. (2018). Co-combustion of anthracite coal and wood pellets: Thermodynamic analysis, combustion efficiency, pollutant emissions and ash slagging. *Environmental Pollution*, 239, 21–29.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.004>
- klančnik, G., Medved, jožef, & Mrvar, P. (2010). *Differential thermal analysis (DTA) and differential scanning calorimetry (DSC) as a method of material investigation* Diferenčna termična analiza (DTA) in diferenčna vrstična kalorimetrija (DSC) kot metoda za raziskavo materialov (Vol. 57, Nomor 1).
- Li, B. Y., Tee, M. Y., Nge, K. S., Ng, A. K. L., Chong, W. W. F., Ng, J. H., & Mong, G. R. (2023). Comparison Kinetic Analysis between Coats-Redfern and Criado's Master Plot on Pyrolysis of Horse Manure. *Chemical Engineering Transactions*, 106, 1273–1278.
<https://doi.org/10.3303/CET23106213>
- Maryudi. (2014). *Karakteristik Torrefaksi dan Densifikasi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit*. 1(2), 77–84.
- Ndibe, C., Grathwohl, S., Paneru, M., Maier, J., & Scheffknecht, G. (2015). Emissions reduction and deposits characteristics during cofiring of high shares of torrefied biomass in a 500 kW pulverized coal furnace. *Fuel*, 156, 177–189.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.017>
- Qiu, S., Reddy, R. G., Huang, X., Yin, C., & Zhang, S. (2022). Relationships between Combustion Behavior in Air and the Chemical Structure of Bituminous Coal during Combustion Processes. *Energies*, 15(14).
<https://doi.org/10.3390/en15145154>
- Shi, L., Liu, Q., Guo, X., Wu, W., & Liu, Z. (2013). Pyrolysis behavior and bonding

information of coal — A TGA study. *Fuel Processing Technology*, 108, 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.06.023>

Xue, Z., Zhong, Z., & Lai, X. (2020). Investigation on gaseous pollutants emissions during co-combustion of coal and wheat straw in a fluidized bed combustor. *Chemosphere*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124853>