

## Karakteristik termogravimetri dan spektrometri massa (TG-DTG) pada pembakaran campuran (*co-firing*) batubara dan TKKS tertorefaksi

Amrul<sup>a,1</sup>, Ali Mustofa<sup>a</sup>, Muhammad Irsyad<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Lampung, Bandar Lampung

[amrul@eng.unila.ac.id](mailto:amrul@eng.unila.ac.id)

### ABSTRACT

The use of Oil Palm Empty Fruit Bunches (EFB) as fuel has a positive impact on efforts to reduce the use of coal for the continuation of environmental ecosystems because the use of biomass produces neutral carbon and low sulfur and nitrogen content so that it can reduce SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions during combustion. However, using biomass as the sole fuel, in general, can cause slagging and fouling problems because it contains a lot of alkali and alkaline earth metals. Thermodynamic analysis through thermogravimetric tests is a fairly simple and effective method for observing fuel combustion profiles. Thermogravimetric analysis (TGA) on the *co-firing* of coal and biomass shows that adding biomass to coal combustion can reduce the ignition temperature and increase the mass loss rate. In this research, thermogravimetric analysis will be carried out to assess the complexity of the thermal decomposition of materials on the kinetics of combustion. The results of the thermogravimetric analysis showed that sub-bituminous coal B experienced a high mass loss gradient at a temperature of 400-520°C worth 65 µg/minute, and torrefied EFB experienced a high mass loss gradient at a temperature of 200-400°C worth 473 µg/minute.

**Keywords:** Coal, oil palm empty fruit bunches (EFB), torrefaction, *co-firing*, thermogravimetric analysis (TGA)

**Received** 30 September 2023; **Presented** 5 October 2023; **Publication** 27 May 2024

### PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi biomassa semakin menarik minat karena kekhawatiran tentang terbatasnya pasokan bahan bakar fosil dan emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil menyebabkan pemanasan global dan perubahan iklim [1]. Emisi karbon batubara merupakan yang paling tinggi dan pelepasan unsur-unsur yang mencemari lingkungan dan berpotensi menyebabkan gangguan Kesehatan [1]. Lebih dari 60% pembangkit listrik di Indonesia masih menggunakan batubara [2]. Di level internasional, Indonesia menyumbang 35% dari total emisi gas rumah kaca (GRK) dunia [3] [4], [5]. Dalam kegiatan United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), Indonesia melalui Nationally Determined Contribution (NDC) berjanji untuk menurunkan emisinya sebesar 29% (atau 41% dengan bantuan internasional) pada tahun 2030 yaitu dengan mempromosikan bauran pasokan energi baru dan terbarukan (EBT) telah dinyatakan sebagai salah satu strategi untuk mencapai target [5]. Untuk mewujudkan komitmen NDC, Pemerintah Indonesia menargetkan penggunaan energi baru dan terbarukan setidaknya 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050 [6].

Indonesia memiliki potensi ketersediaan tandan kosong kelapa sawit (EFB) mencapai 22.262 juta ton/tahun (*air dry basis*) yang merupakan residu industri kelapa sawit dan belum dimanfaatkan secara maksimal. Dengan nilai kalor 14,8 MJ/kg basis kering, EFB dapat dihasilkan energi mencapai 3,294X10<sup>8</sup> MJ/tahun [7][8][9][10]. Selain itu, EFB merupakan bahan bakar karbon netral [11]. Penggunaan tandan kosong kelapa sawit (EFB) sebagai bahan juga memiliki kandungan sulfur dan nitrogen yang rendah sehingga dapat mengurangi pembentukan gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> selama pembakaran [12]. Namun, penggunaan biomassa sebagai bahan bakar tunggal mudah menimbulkan masalah *slagging* karena banyak mengandung logam alkali dan alkali tanah [13][14][10]. *Slagging* sangat merugikan bila terbentuk di pipa-pipa boiler karena resistansi perpindahan panas antara flue gas dengan boiler [10].

Banyak perhatian mengenai *co-firing* batubara dan biomassa dengan konsentrasi tertentu karena tidak hanya dapat mengurangi emisi polutan, tetapi juga secara efektif meminimalisasi pembentukan terak [15]. Sehingga penggunaan teknologi *co-firing* merupakan pilihan yang relatif lebih murah dan tidak memerlukan investasi unit baru. Tandan kosong kelapa sawit

(EFB) sangat potensial apabila dijadikan sebagai bahan bakar pendamping batubara, namun penggunaannya secara langsung perlu dipelajari lebih lanjut mengingat tandan kosong kelapa sawit memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan cangkang kelapa sawit. Tandan kosong kelapa sawit memiliki sifat densitas energi rendah, biodegradabilitas tinggi, kandungan air tinggi dan *grindability* rendah [8][16][17], sehingga perlu adanya perlakuan khusus dalam pemanfaatannya sebagai bahan bakar, salah satu metode yang dapat diterapkan yaitu torefaksi [18][19][17]. Torefaksi adalah metode termal untuk konversi biomassa yang beroperasi pada suhu 200-320 °C. Proses ini dilakukan pada kondisi atmosferis tanpa adanya oksigen. Tujuan dari proses torefaksi yaitu proses peluruhan kandungan selulosa dan hemiselulosa sehingga meningkatkan persentase kandungan lignin yang secara linear akan meningkatkan kualitas bahan bakar [8].

Selain pengujian pembakaran secara langsung, analisis termodinamika melalui uji termogravimetri merupakan metode yang dipandang paling mudah dan efektif untuk mengamati profil pembakaran bahan bakar [1][20]. Analisis termogravimetri yang dilakukan oleh [21][22] menemukan bahwa penambahan biomassa pada pembakaran batubara dapat menurunkan temperature pengapian. Jayaraman dan kawan-kawan [23] juga melakukan analisis termogravimetri batubara dan biomassa dan terkonfirmasi bahwa penambahan biomassa dapat meningkatkan laju kehilangan massa. Hasil-hasil ini membuat para peneliti mengevaluasi kinerja pembakaran bersama batubara dan biomassa yang komprehensif. Penelitian yang dilakukan oleh Paulo dan kawan-kawan mengatakan bahwa kombinasi pembakaran batubara dan biomassa merupakan alternatif yang layak untuk mengurangi emisi tanpa mengganggu efisiensi [24]. Namun penelitian lain menyebutkan efisiensi pembakaran batubara meningkat dengan meningkatnya penambahan biomassa kulit pinus [25]. Secara umum, praktik pembakaran bersama (co-firing) dapat mengurangi emisi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> dikarenakan menurunnya kandungan nitrogen dan sulfur bawaan bahan bakar [26] [14][27]. [28] dan [29] juga mengungkapkan bahwa terjadi pengurangan gas NO<sub>x</sub> ketika biomassa dibakar dengan batubara.

Mempertimbangkan faktor di atas, tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki karakteristik termogravimetri *co-firing* batubara sub-bituminous B dan tandan kosong kelapa

sawit yang telah ditorefaksi. Kondisi torefaksi dilakukan mengacu pada penelitian wahyudi dkk [7]. Uji proksimat dan ultimat digunakan untuk melihat kualitas batubara sub bituminous B dan tandan kosong kelapa sawit. Analisis termogravimetri dilakukan untuk melihat perilaku pembakaran bersama batubara sub bituminous B dan tandan kosong kelapa sawit.

## METODE PENELITIAN

### 1. Material

Tandan kosong kelapa sawit (EFB) diperoleh dari PT. Anaktuha Sawit Mandiri yang merupakan produk samping dari proses steam tandan buah segar. Ukuran Tandan kosong kelapa sawit (EFB) direduksi <11mm. Tandan kosong kelapa sawit (EFB) dikeringkan menggunakan sinar matahari hingga mencapai kadar air 12-14%. Batubara yang digunakan merupakan batubara sub-bituminous B yang berasal dari PT. Bukit Asam Persero dengan nilai kalor 5800 Kcal/kg.

### 2. Torefaksi

Proses dilakukan torefaksi EFB merujuk pada penelitian Wahyudi dan kawan-kawan [7]. Proses torefaksi dimulai dengan memasukkan tandan kosong kelapa sawit kering kedalam hopper reaktor, material tandan kosong akan terbawa putaran screw conveyor masuk kedalam reaktor. Reaktor dikondisikan pada temperature 275°C dengan sistem pemanas oil jacket hasil pemanasan menggunakan bahan bakar LPG. Tandan kosong kelapa sawit (EFB) akan mendapat kontak panas di dalam reaktor selama tinggal 30 menit dan akan keluar kedalam tabung pendingin. Tandan kosong kelapa sawit dilakukan pendinginan diruang tertutup untuk menghindari terjadinya pembakaran akibat suplai oksigen dari lingkungan. Skema kerja torefaksi ditunjukkan pada gambar 1. Hasil yang diperoleh menunjukkan nilai kalor kisaran 5035 Kcal/Kg [7] [17] setara dengan batubara sub-bituminous B.

### 3. Analisis Termogravimetri

Analisis termogravimetri (TGA) batubara sub-bituminous B yang selanjutnya disebut SBC dan tandan kosong kelapa sawit yang selanjutnya disebut EFBTRF dilakukan di Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi FMIPA Universitas Lampung. Ukuran sampel direduksi menjadi 200 mesh untuk keperluan analisis. Sampel dipanaskan dari suhu sekitar 25°C hingga 1000°C dengan laju aliran udara 100

mL/menit dan laju pemanasan 20-C/menit. Setiap tes diulang tiga kali untuk memastikan keakuratan hasil tes.

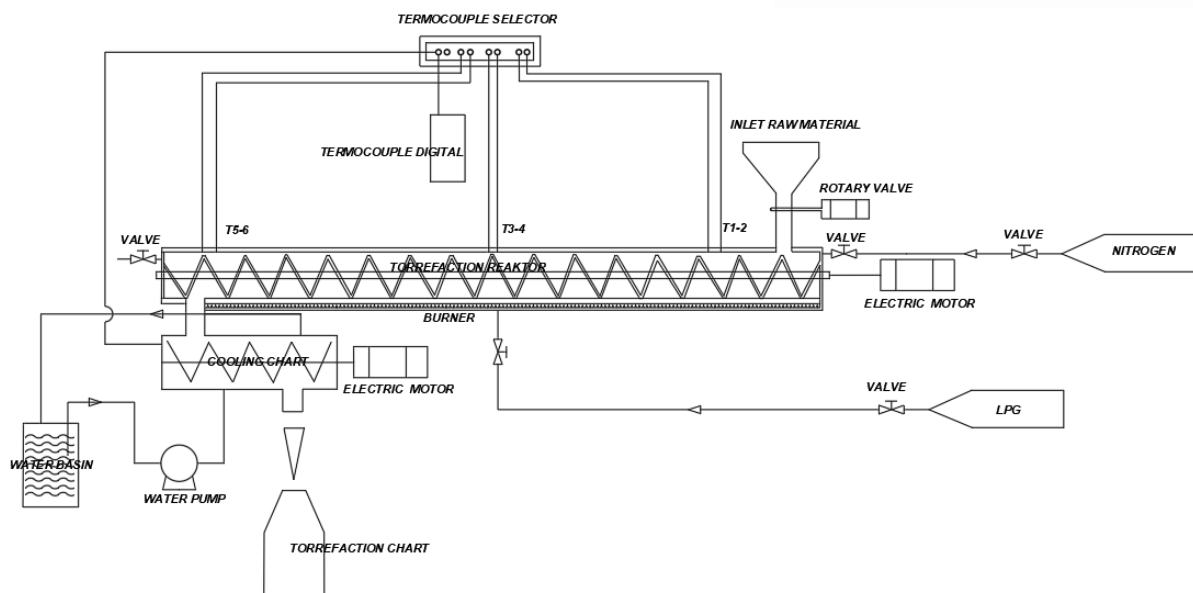
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Sifat SBC dan EFBTRF

Sifat-sifat yang berpengaruh terhadap kualitas batubara sub-bituminous B (SBC) dan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) seperti analisis proksimat, ultimat dan nilai kalor tersaji pada Tabel 1.

Data menunjukkan tandan kosong kelapa sawit yang telah mendapatkan perlakuan torefaksi (EFBTRF) pada temperatur 275°C dengan waktu tinggal 30 menit memiliki nilai kalor setara dengan batubara sub-bituminous B dengan nilai kalor kisaran 5000 kcal/Kg. Proses torefaksi ini meningkatkan nilai kalor dari sebelumnya 3300 kcal/kg dalam kondisi *dry basis* [10]. Namun jika dibandingkan dengan batubara

sub-bituminous B, tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) memiliki kandungan *fix carbon* (FC) lebih rendah sementara kandungan *volatile matter* (VM) jauh lebih tinggi. Selain itu, peningkatan rasio bahan bakar yang mudah menguap  $[VM/(VM+FC)]$  dapat meningkatkan sifat pengapian tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) [14]. Berdasarkan rasio atom O/C dan H/C, tandan kosong kelapa sawit (EFBTRF) memiliki rasio lebih tinggi dibandingkan dengan batubara. Ini menunjukkan bahwa tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) memiliki reaktivitas yang lebih tinggi dan mudah terbakar dibandingkan batubara sub-bituminous B (SBC) meskipun memiliki nilai kalor yang setara. Oleh karenanya, dengan melakukan pembakaran bersama batubara sub-bituminous B (SBC) dan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) dapat meningkatkan reaktivitas penyalanaan.



Gambar 1 Skema kerja reaktor torefaksi kontinu tipe tubular dengan pemanas *oil jacket*

Hasil pengujian menunjukkan kurva thermogravimetric (TG) batubara sub-bituminous B (SBC) dengan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) keseluruhan berbeda. Grafik thermogravimetric (TG) menunjukkan laju kehilangan hampir serupa terjadi di awal proses dan mulai terlihat jelas perbedaannya ketika memasuki temperatur >200°C. Sebagai acuan, kurva *thermogravimetric* (TG) dan *derivative thermogravimetric* (DTG) terbagi menjadi 4 tahap: dehidrasi (T lingkungan-200°C),

pelepasan zat volatil (200°C-400°C), pembakaran *fix carbon* biomassa (400°C-520°C) dan pembakaran *fix carbon* batubara (520°C-900°C). Pada tahap awal pada saat proses dehidrasi secara garis besar laju kehilangan massa hampir serupa namun apabila dipelajari lebih dalam, batubara sub-bituminous B (SBC) mengalami gradien penurunan massa lebih besar dibandingkan dengan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF). Artinya saat proses dehidrasi, batubara sub-bituminous B (SBC) mengalami kehilangan massa air yang

lebih besar dibandingkan dengan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF). Hasil ini konsisten dengan data yang disajikan pada Tabel 1 yang menunjukkan batubara sub-bituminous B

(SBC) memiliki *moisture content* lebih besar dibandingkan dengan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF).

Tabel 1 Proximate, Ultimate and Heating Value

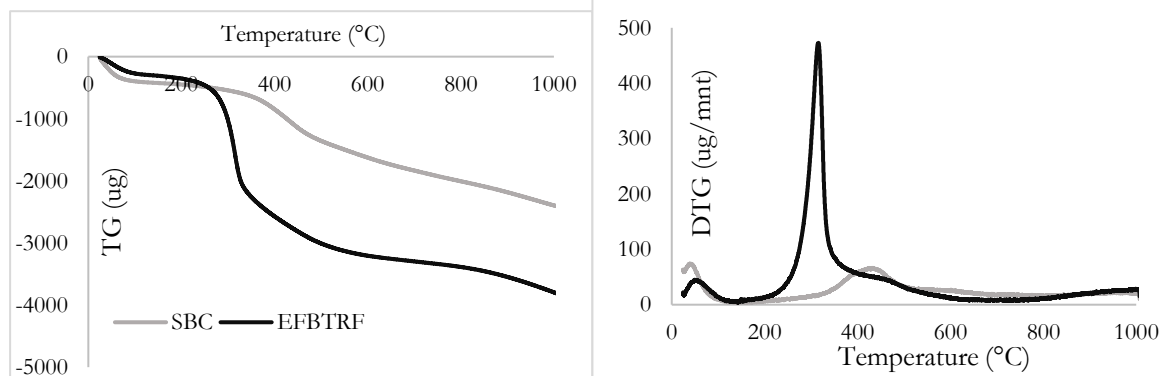
Sample	Ultimate (%)					Proximate (%)				Heating Value (Kcal/kg)
	N	C	H	O	S	MC	VM	FC	ASH	
SBC	4,91	60,74	6,17	27,33	0,52	15,41	40,64	39,41	4,34	5.820
EFB-TRF	1,58	52,78	5,89	39,79	-	6,33	65,77	20,9	7	5.035

Dengan menurunkan temperatur penyalaaan dapat mengurangi terjadinya pembentukan gas nitrogen oksida saat pembakaran. Kandungan sulfur tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) menunjukkan lebih rendah sehingga dapat mengurangi pembentukan sulfur oksida saat pembakaran

## 2. Perilaku Termogravimetri SBC dan EFBTRF

Hasil uji laboratorium untuk mengetahui perilaku termal batubara sub-bituminous B (SBC) yang diperoleh dari PT. Bukit Asam (Persero)

dan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) pada temperatur 275°C waktu tinggal 30 menit dan analisis campuran keduanya. Pengujian yang dilakukan yaitu dengan melakukan thermogravimetric analysis (TGA) yang meliputi thermogravimetric (TG) untuk mengetahui titik peluruhan bahan bakar terhadap fungsi temperatur selama pemanasan dan derivative thermogravimetric (DTG) untuk mengetahui laju kehilangan massa bahan bakar terhadap fungsi temperatur. Hasil pengujian tersaji pada Gambar 2.



Gambar 2 Kurva thermogravimetric (TG) dan derivative thermogravimetric (DTG) batubara sub-bituminous B (SBC) dan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF)

Setelah proses dehidrasi, laju kehilangan massa dan pembakaran mengalami perbedaan secara signifikan. Kurva derivative thermogravimetric (DTG) tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) tahap dua mengalami gradien kehilangan massa yang paling tinggi dan diikuti pada tahap tiga. Ini karena kandungan volatil yang dimiliki tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) merupakan kandungan tertinggi daripada kandungan *fix carbon*. Sebagai jenis biomassa, tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) memiliki banyak

kandungan selulosa dan hemiselulosa merupakan konstituen bahan bakar yang rentan terhadap temperatur penguraian dari 220-400°C. Oleh karena itu, tahap pembakaran pertama tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) adalah disebabkan oleh dekomposisi dan pembakaran hemiselulosa dan selulosa. Pada tahap tiga, kurva derivative thermogravimetric (DTG) tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) menunjukkan kurva yang lebih melandai namun tetap mengalami penurunan. Ini merupakan area pembakaran *fix carbon*



biomassa dan selanjutnya menurun pada tahap ke empat, Ini konsisten dengan penelitian yang dilakukan [14] yang menjelaskan hasil derivative thermogravimetric (DTG) area pembakaran bahan bakar biomassa terjadi pada tahap dua dan tiga.

Dalam kasus batubara sub-bituminous B (SBC), kurva thermogravimetric (TG) dan derivative thermogravimetric (DTG) memiliki rentang temperatur yang landai tanpa ada lembah dan puncak yang begitu terlihat. Kurva thermogravimetric (TG) dan derivative thermogravimetric (DTG, laju kehilangan massa yang tajam dan puncak oksidasi terjadi pada temperatur  $>300^{\circ}\text{C}$ - $500^{\circ}\text{C}$  yang artinya berada pada zona pembakaran zat volatil dan zona pembakaran fix carbon biomassa. Bila dikorelasikan dengan hasil uji proksimat, batubara sub-bituminous B (SBC) merupakan batubara jenis tipe menengah yang memiliki kandungan oksigen dan hidrogen yang relative besar. Hasil thermogravimetric (TG) dan derivative thermogravimetric (DTG) batubara berbeda ditunjukkan pada penelitian [14] yang menggunakan batubara tipe antrasit (batubara karbon tinggi). Hasil uji penelitiannya memperlihatkan batubara mengalami penurunan grafik thermogravimetric (TG) dan puncak kurva derivative thermogravimetric (DTG) pada tahap 4 yang merupakan area oksidasi karbon batubara. Dari perbandingan ini dapat disimpulkan bahwa temperatur pengapian dan tingkat pembakaran maksimum meningkat dengan meningkatnya kualitas batubara.

Jika dibandingkan kurva derivative thermogravimetric (DTG) batubara sub-bituminous B (SBC) dan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) mengalami proses pembakaran yang lebih cepat dibandingkan batubara sub-bituminous B (SBC). tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) mulai terbakar pada tahap 2 karena kandungan volatil tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) jauh lebih besar daripada kandungan karbon tetap dan kandungan volatil merupakan

kandungan tertinggi dengan laju kehilangan massa pembakaran  $473 \mu\text{g}/\text{menit}$ . Berbeda dengan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF), pembakaran batubara sub-bituminous B (SBC) mulai mengalami puncak pembakaran terjadi saat grafik derivative thermogravimetric (DTG) tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) turun dan melandai dengan laju kehilangan massa pembakaran  $65 \mu\text{g}/\text{menit}$  Artinya, karakteristik optimasi penyalaan batubara sub-bituminous B (SBC) lebih lambat dibandingkan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF). Dengan kedua perbedaan reaktivitas termal tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) yang lebih cepat diharapkan dapat meningkatkan reaktivitas pembakaran batubara sub-bituminous B (SBC) dan menurunkan temperatur operasi. Uji TGA, derivative thermogravimetric (DTG) dan hasil temperatur pembakaran telah dilakukan [14] dengan sampel batubara grade A dan biomassa pellet menunjukkan bahwa campuran keduanya memperlihatkan kurva yang terletak diantara masing-masing sampel. Kurva thermogravimetric (TG) menunjukkan penurunan massa campuran meningkat dengan meningkatnya persentase biomassa pellet pada temperatur yang sama. Dari hasil uji pembakaran yang dilakukan Guo dkk [30], dikonfirmasi bahwa dengan peningkatan persentase biomassa pada sistem *co-firing* telah meningkatkan reaktivitas pembakaran batubara dan menurunkan temperatur operasi pembakaran. Oleh karenanya, kehadiran tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) dalam sistem pembakaran batubara sub-bituminous B (SBC) diharapkan dapat meningkatkan optimasi kinerja penyalaan.

Berdasarkan literatur yang dilakukan Guo dkk [30], setelah diperoleh data derivative thermogravimetric (DTG) batubara sub-bituminous B (SBC) dan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) dilakukan penyelidikan interaksi keduanya dengan konsentrasi masing-masing menggunakan persamaan berikut:

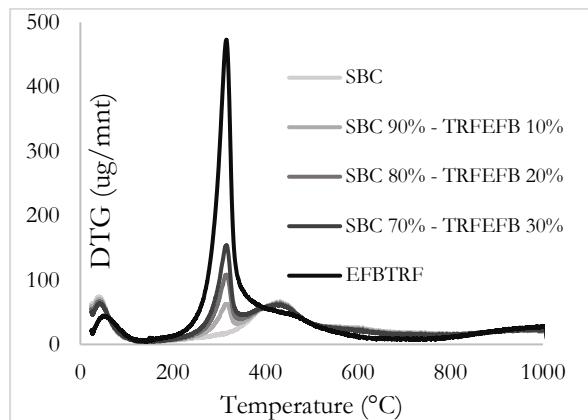
$$DTG_{\text{calculation}} = X_{\text{SBC}} * DTG_{\text{SBC}} + X_{\text{EFBTRF}} * DTG_{\text{EFBTRF}} \quad (1)$$

$DTG_{\text{SBC}}$  dan  $DTG_{\text{EFBTRF}}$  merepresentasikan tingkat penurunan massa batubara sub-bituminous B (SBC) tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF).  $X_{\text{SBC}}$  dan  $X_{\text{EFBTRF}}$  adalah

persentase batubara sub-bituminous B (SBC) dan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) merupakan proporsi mereka dalam *co-firing*. Hasil perhitungan interaksi batubara sub-

bituminous B (SBC) dan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) tersaji pada Gambar 3.

Kurva derivative thermogravimetric (DTG) prediksi interaksi campuran batubara sub-bituminous B (SBC) dan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) berdasarkan variasi persentase kehadiran tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi. Kurva tersebut menampilkan kehilangan massa pembakaran 2 langkah (tahap 2 dan tahap 3). Secara hasil perhitungan, dengan penambahan kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) telah meningkatkan reaktivitas pembakaran batubara sub-bituminous B (SBC) pada tahap 2. Pada tahap 2, berkaitan dengan



Gambar Kurva derivative thermogravimetric (DTG) SBC, EFBTRF dan campurannya.

Namun hasil eksperimen belum tentu menunjukkan data sama dengan hasil perhitungan teoritis, karena mekanisme pembakaran batubara dan biomassa selama pembakaran merupakan interaksi yang rumit. Ketidaksamaan perhitungan dengan hasil eksperimen bisa disebabkan terjadinya reaksi endotermis yang lebih cepat yang disebabkan kehadiran volatile yang lebih besar sehingga mendorong pembakaran partikel *fix carbon* batubara yang lebih cepat. Untuk memverifikasi pengaruh kehadiran biomassa dalam hal ini kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) terhadap reaktivitas pembakaran dan menurunkan temperatur operasi dapat dilakukan eksperimen pembakaran menggunakan metode pembakaran

## KESIMPULAN

Karakteristik termogravimetri dan spektrometri massa (TG-DTG) pada pembakaran Campuran

pelepasan dan pembakaran zat volatil yang ada dalam kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF). Pada tahap 3, terjadi penurunan reaktivitas pembakaran. Tahap ini berkaitan dengan zona pembakaran *fix carbon* biomassa. Dengan meningkatnya persentase massa kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF), grafik puncak pembakaran bersama terus mengalami peningkatan pada tahap 2 dan mengalami penurunan pada tahap 3. Peningkatan reaktivitas pembakaran tahap 2 dikarenakan meningkatnya persentase zat volatil dan penurunan reaktivitas pembakaran tahap 3 menurun karena kandungan kehadiran *fix carbon* kosong kelapa sawit tertorefaksi (EFBTRF) mengurangi persentase *fix carbon* batubara sub-bituminous B (SBC).

(*Co-Firing*) batubara sub bituminous B dan tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi. Dari hasil pembahasan dapat disimpulkan bahwa Hasil menunjukkan EFBTRF mengalami gradien puncak kehilangan massa pada zona pelepasan zat volatile (200°C-400°C) dengan nilai 473 µg/menit sedangkan batubara subbituminous B mengalami gradien puncak kehilangan massa pada zona pembakaran *fix carbon* biomassa (400°C-520°C) karena merupakan batubara grade menengah dengan laju nilai 66,178 µg/menit. Tandan kosong kelapa sawit mengalami dekomposisi massa jauh lebih cepat dibandingkan batubara sub-bituminous B. Dari hasil perhitungan menunjukkan bahwa dengan adanya sistem pencampuran bahan bakar batubara dan tandan kosong kelapa sawit dapat meningkatkan reaktivitas pembakaran batubara dan, dapat mempercepat reaksi pembakaran dan menurunkan temperatur operasi pembakaran.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis haturkan kepada rekan-rekan dari F-MIPA Universitas Lampung yang telah membantu melakukan pengujian TD-DTG dan rekan-rekan laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung yang membantu proses pembuatan arang tandan kosong kelapa sawit. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada civitas akademika Universitas Lampung terkhusus Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah memfasilitasi kegiatan penelitian ini. Semoga penelitian ini bisa bermanfaat dan dapat menjadi referensi keilmuan dan berguna bagi khalayak umum.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Yousaf *et al.*, “Systematic investigation on combustion characteristics and emission-reduction mechanism of potentially toxic elements in biomass- and biochar-coal co-combustion systems,” *Appl Energy*, vol. 208, no. October, pp. 142–157, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.059.
- [2] D. Arinaldo and J. C. Adiatama, “Dinamika Batu Bara Indonesia: Menuju Transisi Energi yang Adil,” *Institute for Essential Services Reform (IESR)*, pp. 1–12, 2019, [Online]. Available: <http://iesr.or.id/wp-content/uploads/2019/04/SPM-bahasa-lowres.pdf>
- [3] IRENA, *Renewable Energy Prospects: Indonesia*, no. March. 2017. [Online]. Available: <http://www.irena.org/remap>
- [4] A. Wijaya, H. Chrysolite, M. Ge, C. K. Wibowo, and A. Pradana, “Executive Summary,” *World Resources Institute*, no. September, 2017, [Online]. Available: [https://wri-indonesia.org/sites/default/files/WRI Layout Paper OCN v7.pdf](https://wri-indonesia.org/sites/default/files/WRI%20Layout%20Paper%20OCN%20v7.pdf)
- [5] KLHK, *Indonesia: First Nationally Determined Contribution*, no. November. 2016. [Online]. Available: [http://www4.unfccc.int/ndcregistry/PublishedDocuments/Indonesia First/First NDC Indonesia\\_submitted to UNFCCC Set\\_November 2016.pdf](http://www4.unfccc.int/ndcregistry/PublishedDocuments/Indonesia%20First/First%20NDC%20Indonesia_submitted%20to%20UNFCCC%20Set_November%202016.pdf)
- [6] PP No. 79, “PP No. 79 Thn 2014.pdf.” pp. 1–36, 2014.
- [7] R. Wahyudi, A. Amrul, and M. Irsyad, “Karakteristik Bahan Bakar Padat Produk Torefaksi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular,” *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi*, vol. 20, no. 2, pp. 1–8, Jun. 2020, doi: 10.24036/invotek.v20i2.706.
- [8] D. A. Iryani *et al.*, “Torrefaction upgrading of palm oil empty fruit bunches biomass pellets for gasification feedstock by using comb (counter flow multi-baffle) reactor,” *TAE 2019 - Proceeding of 7th International Conference on Trends in Agricultural Engineering 2019*, no. September, pp. 212–217, 2019.
- [9] BPS, “STATISTIK KELAPA SAWIT INDONESIA,” *Int J Hypertens*, vol. 1, no. 1, pp. 1–171, 2020, [Online]. Available: <http://etd.eprints.ums.ac.id/14871/%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.cell.2017.12.025%0Ahttp://www.depkes.go.id/resources/download/info-terkini/hasil-risk-esdas-2018.pdf%0Ahttp://www.who.int/about/licensing/%0Ahttp://jokeunila.com/wp-content/uploads/2016/12/Dea>
- [10] T. Madhiyanon, P. Sathitruangsak, S. Sungworagarn, S. Pipatmanomai, and S. Tia, “A pilot-scale investigation of ash and deposition formation during oil-palm empty-fruit-bunch (EFB) combustion,” *Fuel Processing Technology*, vol. 96, pp. 250–264, 2012, doi: 10.1016/j.fuproc.2011.12.020.
- [11] Z. Yildiz, H. Uzun, S. Ceylan, and Y. Topcu, “Application of artificial neural networks to co-combustion of hazelnut husk-lignite coal blends,” *Bioresour Technol*, vol. 200, pp. 42–47, 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2015.09.114.
- [12] J. Krzywanski, R. Rajczyk, M. Bednarek, M. Wesolowska, and W. Nowak, “Gas emissions from a large scale circulating fluidized bed boilers burning lignite and biomass,” *Fuel Processing Technology*, vol. 116, pp. 27–34, 2013, doi: 10.1016/j.fuproc.2013.04.021.
- [13] J. Lachman, M. Baláš, M. Lisý, H. Lisá, P. Milčák, and P. Elbl, “An overview of slagging and fouling indicators and their applicability to biomass fuels,” *Fuel Processing Technology*, vol. 217, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.fuproc.2021.106804.
- [14] F. Guo and Z. Zhong, “Co-combustion of anthracite coal and wood pellets: Thermodynamic analysis, combustion efficiency, pollutant emissions and ash slagging,” *Environmental Pollution*, vol. 239, pp. 21–29, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.envpol.2018.04.004.
- [15] J. Lu, B. Xu, Y. Lu, X. Deng, and E. Eddings, “Experimental studies on charging and electric field characteristics of biomass/coal co-combustion ash,” *Fuel*, vol. 203, no. x, pp. 478–487, 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2017.04.102.

- [16] Amrul, A. Apriyanto, I. Sanjaya, and Amrizal, "Experimental Study on Waste Biomass Torrefaction Using a Continuous Tubular Reactor," *PROSIDING Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin 2018 - SNTTM XVII*, pp. 304–309, 2018.
- [17] Amrul, I. Wijaya, and D. Amrizal, "Characteristics of Agricultural Residues Torrefaction Using a Tubular Type Continuous Reactor," *Suparyanto dan Rosad (2015)*, vol. 5, no. 3, pp. 248–253, 2019.
- [18] A. Apriyanto, A. Hamzah, and A. Nafis, "Rancang Bangun dan Analisis Unjuk Kerja Reaktor Torrefaksi Kontinu Tipe Tubular Dengan Sistem Pemanas Oil Jacket," *Mechanical*, vol. 9, no. 2, p. 54, 2018, doi: 10.23960/mech.v9.i2.201809.
- [19] A. Haryanto *et al.*, "Torrefaction to improve biomass pellet made of oil palm empty fruit bunch," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 749, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/749/1/012047.
- [20] K. Cong, F. Han, Y. Zhang, and Q. Li, "The investigation of co-combustion characteristics of tobacco stalk and low rank coal using a macro-TGA," *fuel*, vol. 237, no. June 2018, pp. 126–132, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2018.09.149.
- [21] J. Mundike, F. X. Collard, and J. F. Görgens, "Co-combustion characteristics of coal with invasive alien plant chars prepared by torrefaction or slow pyrolysis," *fuel*, vol. 225, no. February, pp. 62–70, 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.03.024.
- [22] P. Wang, G. Wang, J. Zhang, J. Y. Lee, Y. Li, and C. Wang, "Co-combustion characteristics and kinetic study of anthracite coal and palm kernel shell char," *Appl Therm Eng*, vol. 143, no. April, pp. 736–745, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.08.009.
- [23] K. Jayaraman, M. V. Kok, and I. Gokalp, "Thermogravimetric and mass spectrometric (TG-MS) analysis and kinetics of coal-biomass blends," *Renew Energy*, vol. 101, pp. 293–300, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.08.072.
- [24] P. R. Wander, F. M. Bianchi, N. R. Caetano, M. A. Klunk, and M. L. S. Indrusiak, "Cofiring low-rank coal and biomass in a bubbling fluidized bed with varying excess air ratio and fluidization velocity," *Energy*, vol. 203, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117882.
- [25] P. Gayan *et al.*, "Circulating fluidised bed co-combustion of coal and biomass," *fuel*, vol. 83, no. 3, pp. 277–286, 2004, doi: 10.1016/j.fuel.2003.08.003.
- [26] Z. Xue, Z. Zhong, and X. Lai, "Investigation on gaseous pollutants emissions during co-combustion of coal and wheat straw in a fluidized bed combustor," *Chemosphere*, vol. 240, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124853.
- [27] X. Wei *et al.*, "Wei et al Energy Fuels 2012, 26, 3117–3124.pdf," no. x, 2012.
- [28] Y. Sung *et al.*, "Synergistic effect of cofiring woody biomass with coal on NOx reduction and burnout during air-staged combustion," *Exp Therm Fluid Sci*, vol. 71, no. x, pp. 114–125, 2016, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2015.10.018.
- [29] C. Ndibe, S. Grathwohl, M. Paneru, J. Maier, and G. Scheffknecht, "Emissions reduction and deposits characteristics during cofiring of high shares of torrefied biomass in a 500 kW pulverized coal furnace," *Fuel*, vol. 156, pp. 177–189, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2015.04.017.
- [30] F. Guo, Y. He, A. Hassanpour, J. Gardy, and Z. Zhong, "Thermogravimetric analysis on the co-combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal," *Energy*, vol. 197, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117147.