

## Karakteristik Pembakaran Campuran Batubara dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Menggunakan Analisis Termogravimetri Deferensial Temperatur (TG-DTA)

Wiwie Chaeruni<sup>1✉</sup>, Hadiyanto<sup>2</sup>, Cahyadi<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Magister Energi, Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro, Indonesia

<sup>2</sup> Fakultas Teknik Kimia, Universitas Diponegoro, Indonesia

<sup>3</sup> Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Indonesia

### Informasi Artikel

#### Riwayat Artikel

**Diserahkan** : 05-06-2024

**Direvisi** : 08-06-2024

**Diterima** : 12-06-2024

#### Kata Kunci:

Pembakaran. Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS), Batubara, TG-DTA

#### Keywords :

*Combustion, Empty Fruit Bunches (EFB), Coal, TG-DTA*

### ABSTRAK

Komitmen pemerintah Indonesia untuk mengurangi emisi dan gas rumah kaca dengan memanfaatkan biomassa sebagai bahan bakar alternatif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengevaluasi karakteristik pembakaran menggunakan TG-DTA (*Thermo Gravimetric-Differential Thermal Analyzer*) dengan batubara, Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS), dan campurannya. Pengujian sampel dilakukan dengan empat variasi campuran antara TKKS dan batubara yaitu 10%, 20%, 30% dan 40% yang dilakukan pada media nitrogen dan udara pada laju pemanasan konstan 20 °C/menit dan aliran gas konstan. 20 ml/menit dan menghitung penurunan berat terhadap kenaikan temperatur sampai 900 °C. Hasil pembakaran TG – DTA diperoleh grafik profil pembakaran untuk memperoleh data turunan termogravimetri (DTG) sehingga diperoleh suhu inisiasi, suhu pembakaran, suhu pembakaran maksimum, dan aktivitas energi batubara. kenaikan rasio massa TKKS dalam campuran batubara, menaikkan temperature puncak dan energi aktivasi yang dihasilkan dapat meningkat 30% dengan penambahan komposisi TKKS sebanyak 40%.

### ABSTRACT

*The Indonesian government's commitment to reducing emissions and greenhouse gases by using biomass as an alternative fuel. This research aims to analyze and evaluate the combustion characteristics using TG-DTA (Thermo Gravimetric-Differential Thermal Analyzer) with coal, empty fruit bunches (EFB), and a mixture of EFB and coal. Sample testing was carried out with four variations of mixtures of EFB and coal, namely 10%, 20%, 30% and 40%, carried out in nitrogen and air media at a constant heating rate of 20 °C/minute and constant gas flow. 20 mL/minute and calculate the weight loss as the temperature increases to 900 °C. From the results of TG - DTA combustion, a combustion profile graph was obtained to obtain thermogravimetric (DTG) derivative data to obtain initiation temperature, combustion temperature, maximum combustion temperature and coal energy activity. increasing the mass ratio of EFB in the coal mixture, increasing the peak temperature and activation energy can increase by 30% with the addition of EFB composition is 40%.*

#### Corresponding Author :

Wiwie Chaeruni

Magister Energi, Program Pascasarjana, Universitas Diponegoro, Indonesia

Alamat Universitas : Jl. Imam Bardjo, SH No. 5, Pleburan, Semarang

Email: [wiwiechaeruni@students.undip.ac.id](mailto:wiwiechaeruni@students.undip.ac.id)

## PENDAHULUAN

Pemerintah Indonesia berkomitmen untuk menurunkan emisi gas rumah kaca. Komitmen ini tertuang dalam Dokumen *Nationally Determined Contribution* (NDC) yang merupakan tindak lanjut Paris Agreement dengan disahkan melalui Undang – Undang Nomor 16 Tahun 2016. Oleh karena itu diperlukan kajian pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar alternatif. Selain itu, Manfaat bahan bakar biomassa dapat mengurangi emisi gas rumah kaca yaitu gas karbon dioksida dan memberikan kontribusi dalam mengurangi efek pemanasan global. Pembakaran biomassa biasanya dengan melakukan campuran biomassa dengan batubara yang sering disebut *co-firing*, dengan cara ini dapat mengurangi emisi gas sulfur dioksida, karena kandungan sulfur yang rendah pada biomassa (Maskur & Nugroho, 2021). Dengan *co-firing* biomassa pada beberapa Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) juga dapat menekan laju investasi dibandingkan dengan investasi pembangunan pembangkit biomassa baru.

Potensi limbah biomassa di Indonesia salah satunya adalah limbah kelapa sawit. Produksi kelapa sawit setiap tahunnya mengalami peningkatan, yang menyebabkan adanya penambahan limbah kelapa sawit yang dihasilkan. limbah kelapa sawit ini berupa sisa tanaman kelapa sawit dari proses pengolahan kelapa sawit yang berupa cangkang, sabut dan tandan kosong. Dalam 1 ton kelapa sawit menghasilkan limbah berupa tandan kosong kelapa sawit sebanyak 23% (230 kg), cangkang sebanyak 6,5% (65 kg), sabut 13% (130 kg) (Ministry of Agriculture, 2022). Pada umumnya limbah kelapa sawit banyak mengandung bahan organik yang tinggi, apabila dalam penanganan limbahnya tidak optimal dapat menyebabkan pencemaran lingkungan sekitar. Limbah kelapa sawit yang jumlahnya sangat besar salah satunya adalah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). TKKS dapat digunakan sebagai bahan bakar langsung atau dapat membusuk jika dibiarkan terlalu lama sehingga dapat mengganggu ekosistem lingkungan sekitar. Oleh karena itu TKKS mempunyai potensi yang sangat besar untuk dijadikan sebagai bahan bakar alternatif.

Penggunaan TKKS sebagai bahan bakar alternatif perlu dilakukan analisis dan karakteristik dari kandungan TKKS itu sendiri. Oleh karena itu diperlukan analisis termogravimetri untuk mengkarakterisasi biomassa telah banyak digunakan tidak hanya untuk mengkonfirmasi analisis terdekat biomassa, tetapi juga untuk mempelajari kinetika dekomposisi dalam penentuan energi aktivasi nyata dan parameter kinetik pirolisis lainnya, berdasarkan pada prinsip bahwa kecepatan reaksi tergantung pada suhu (T), konversi (a), dan waktu (t) melalui data Termogravimetri Analisis (TGA) (Cahyadi et al., 2013; Xinjie et al., 2021). Dari analisis termal yang dilakukan pada temperatur 30°C hingga 1000 °C dapat diketahui adanya pengurangan berat dan perubahan fase. Perubahan massa sampel sepanjang temperatur (T) atau waktu (t) pada temperatur yang terprogram. Hasil pengujian disajikan dalam bentuk kurva TGA dengan sumbu horisontal menunjukkan temperatur (atau waktu) serta sumbu vertikal yang menampilkan persentase hilang massa ataupun massa sampel. Selama pemanasan, polimer umumnya menunjukkan kehilangan massa secara berjenjang (step-like)(Ottaway, 1982). Namun, hampir tidak mungkin untuk mendefinisikan semua reaksi dan mekanisme yang terjadi selama pirolisis biomassa, terutama karena komposisi kompleks karbohidrat alami seperti hemiselulosa dan selulosa, aromatik yang berasal dari lignin, dan juga berbagai mineral yang diserap dari tanah selama proses pirolisis pertumbuhannya.

Dalam penelitian ini diharapkan dengan adanya karakteristik dari sifat termal TKKS dalam pembakaran sehingga diperoleh komposisi yang optimum yang dapat digunakan dalam *co-firing* TKKS dengan batubara sehingga permasalahan dalam *co-firing* biomassa khususnya TKKS yang menyebabkan korosi dapat menurun, dengan adanya gambaran hasil pembakaran batubara dan TKKS secara termogravimetri analisis (TG – DTA). Dengan hasil pembakaran secara TG-DTA maka akan diperoleh temperature penyalaan, temperatur maksimal, dan energi aktivasi.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan Sampel batubara, dan tandan kosong, dari daerah Kalimantan Timur. Sebelum digunakan Sampel batubara kasar dihancurkan dan ditumbuk terlebih dahulu menggunakan mill skala laboratorium dan kemudian diayak pada penggetar ayakan yang telah lolos ayakan dengan dengan ukuran 0,25 – 0,125 mm atau 60 mesh menggunakan *Shieve Shaker*. Sedangkan untuk TKKS dilakukan pengecilan ukuran dengan menggunakan mesin pencacah yang kemudian dilakukan pengayakan dengan shieve shaker sampe ukurannya 0,25 – 0,125 mm atau 60 mesh. Setelah sampel sudah berukuran 60 mesh maka dapat dilakukan analisa termal menggunakan TG – DTA (Shimadzu DTG-60H). Metode TG – DTA ini digunakan untuk mengetahui profil pembakaran secara simultan dari profil TG, DTG dan DTA.

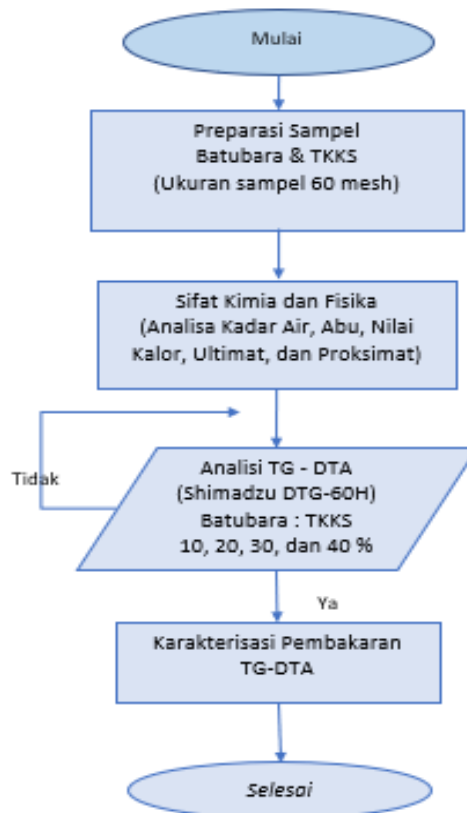


Gambar 1. Batubara dan TKKS



Gambar 2. *Shieve shaker* dan TG-DTA (Shimadzu DTG-60H)

Sampel batubara, TKKS, dan campuran keduanya dengan ukuran 60 mesh sebanyak 14 mg dimasukkan ke dalam *pan* titanium, dalam pencampuran batubara dan TKKS sesuai dengan komposisi 10%, 20%, 30%, dan 40%. Pencampuran dilakukan pada stacking dalam pan titanium dengan komposisi yang diinginkan. Selama uji pembakaran pada TG-DTA, dengan laju pemanasan 20°C/menit dari temperature ruang pembakaran sampai 900°C dalam menggunakan tabung udara tekan. Laju aliran gas dipertahankan pada 50 ml/menit. Hasil Analisis TGA juga dapat memperoleh suhu pembakaran untuk digunakan dalam mengkarakterisasi sifat pembakaran bahan bakar, diantaranya. Temperatur burnout adalah temperatur dimana laju penurunan berat bahan secara konsisten menurun hingga kurang dari 1%/menit, Temperatur puncak  $T_{max}$  adalah temperatur dimana laju pembakaran paling tinggi yang terjadi pada puncak kurva termogravimetri derivatif (DTG). Selain profil pembakaran dari penurunan berat hasil analisa TG-DTA dapat mengetahui energi aktivasi. Diagram penelitian karakteristik pembakaran batubara, TKKS dan campurannya pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

Energi aktivasi pembakaran adalah energi minimum yang digunakan agar reaksi pembakaran dapat berjalan. Energi aktivasi pembakaran biasanya ditentukan dari hasil analisis termogravimetri dimana analisis termogravimetri menggunakan sistem kendali yang mampu menghasilkan laju pemanasan konstan per satuan waktu (Himawanto, 2013). Perhitungan energi aktivasi pada proses pembakaran menggunakan perhitungan reaksi kinetik berorde satu. Penentuan energi kinetik sebagai berikut (Wang et al., 2018; Yan et al., 2019).

$$K(T) = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = A e^{-\frac{E}{RT}} (1-x)^n \quad (2)$$

Dimana, T adalah temperatur, R adalah konstanta gas ideal, A adalah faktor *pre – exponensial*, E adalah energi aktivasi reaksi, n adalah orde reaksi, dan  $\alpha$  adalah perubahan massa.

$$\alpha = (m_0 - m_t)/(m_0 - m_f) \quad (3)$$

Untuk konstanta laju pemanasan adalah  $\beta$  dimana  $\beta = dx/dt$ , maka :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx}{dt} x \frac{dt}{dT} = \frac{dx}{dt} x \frac{1}{\beta} \quad (4)$$

Subtitusikan persamaan 4 ke dalam ke persamaan 2, sehingga diperoleh :

$$\frac{dx}{dT} = \frac{A}{\beta} e^{-\frac{E}{RT}} (1-x)^n \quad (5)$$

Kemudian di integrasikan ke persamaan 5 sebagai berikut:

$$\ln \left[ \frac{-\ln(1-x)}{T^2} \right] = \ln \left[ \frac{AR}{\beta E} \left[ 1 - \frac{2RT}{E} \right] - \frac{E}{RT} \right] \quad (\text{untuk } n = 1)$$

Beberapa reaksi memiliki  $\frac{RT}{E} \gg 1$  dan  $1 - \frac{2RT}{E} = 1$ . Sehingga persamaannya menjadi:

$$\ln \left[ \frac{1-(1-x)^{1-n}}{T^2(1-n)} \right] = \ln \left[ \frac{AR}{\beta E} - \frac{E}{RT} \right] \quad (\text{untuk } n \neq 1)$$

$$\ln \left[ \frac{-\ln(1-x)}{T^2} \right] = \ln \left[ \frac{AR}{\beta E} - \frac{E}{RT} \right] \quad (\text{untuk } n = 1)$$

Untuk mendapatkan energi aktivasi (E) dan faktor pra-eksponensial (A), sisi kiri persamaan di atas diplot masing-masing, mengarah ke garis regresi sehingga diperoleh persamaan regresi. E dan A masing-masing dapat diperoleh dari kemiringan dan titik potong garis. Dari hasil diatas dapat ditarik persamaan regresi linier dimana  $1/T$  adalah nilai x.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Proksimat dan Nilai Kalor Batubara dan TKKS

Sebelum dilakukan pengujian untuk batubara dan TKKS menggunakan TG-DTA dilakukan pengujian analisa proksimat dan nilai kalor dengan hasil pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Analisa Sampel Batubara dan TKKS

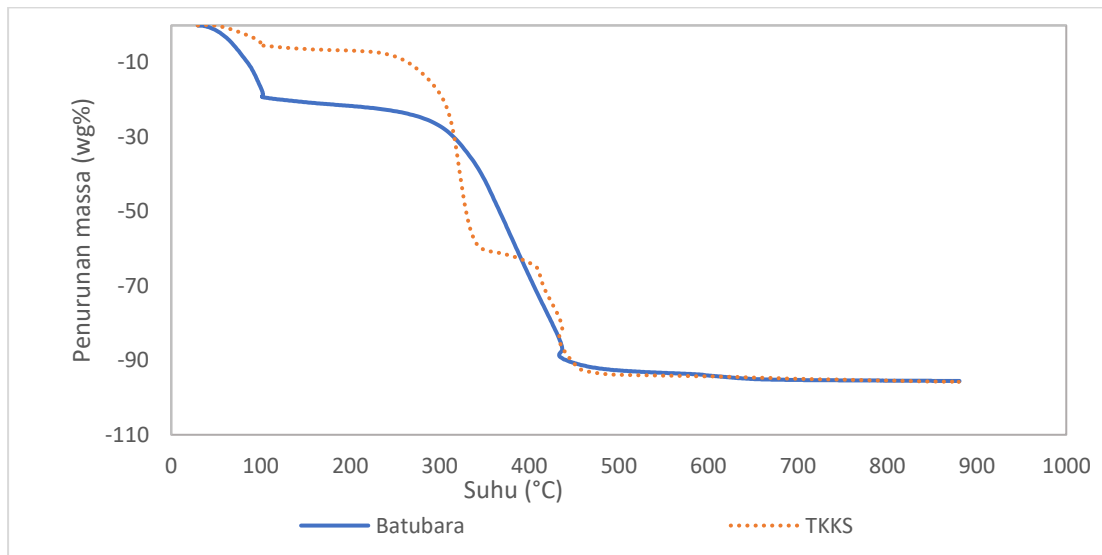
| Parameter                           | Satuan | Batubara | TKKS  |
|-------------------------------------|--------|----------|-------|
| <b>Analisis Proksimat (% Berat)</b> |        |          |       |
| Karbon                              | %      | 44,91    | 15,69 |
| Abu                                 | %      | 6,09     | 10,5  |
| Volatile Matter (VM)                | %      | 49,00    | 73,81 |
| <b>Analisis Ultimat (% Berat)</b>   |        |          |       |
| C                                   | %      | 68.67    | 54.01 |
| H                                   | %      | 5.45     | 7.52  |
| N                                   | %      | 1.29     | 1.04  |
| S                                   | %      | 0.86     | 0.04  |
| O                                   | %      | 23.72    | 37.4  |
| Nilai Kalor                         | MJ/Kg  | 21,88    | 18,07 |

Dari hasil pengujian proksimat yang terdiri dari kandunga volatile (VM), nilai karbon dan kandungan abu. Untuk sampel TKKS yang digunakan sebesar 73,81 % untuk kandungan volatile matter sedangkan batubara hanya 49 %. Untuk kandungan Volatile matter (VM) TKKS yang digunakan pada penelitian ini adalah 73,81 %, nilai ini hampir sama dengan penelitian sebelumnya yaitu 74,2 % dan 70,5% (Idris et al., 2012; Ninduangdee & Kuprianov, 2016) . Yang berarti untuk kandungan organik TKKS sangat dominan berada sekitar 70%.

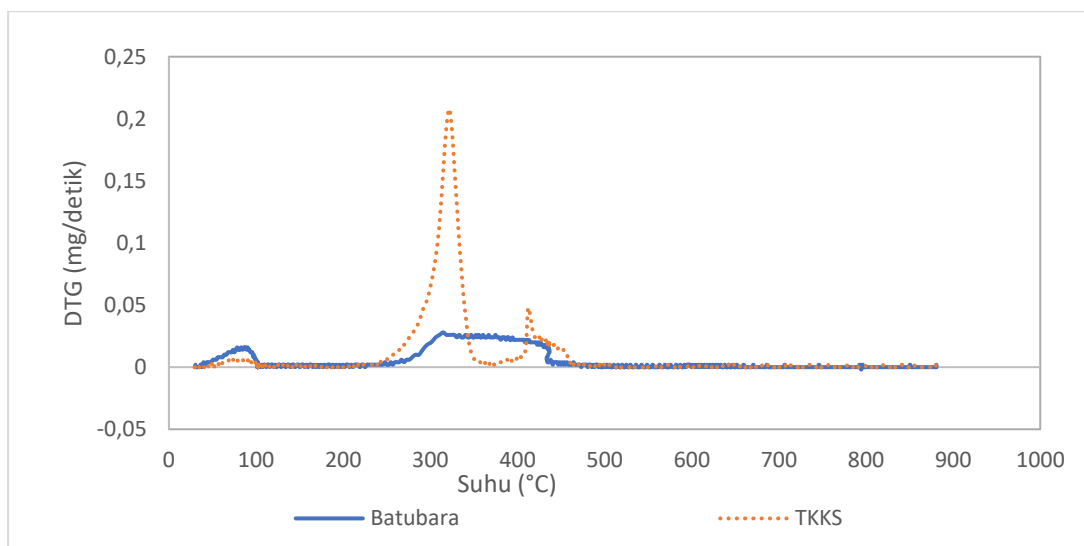
Hasil Analisa ultimat untuk mengetahui kandung karbon (C), hidrogen (H), nitrogen (N) dan sulfur (S). Hasil Analisa untuk kandungan Karbon pada batubara sebesar 68.67 % dan TKKS sebesar 54.01%. Tetapi, salah satu kelebihan dari TKKS mempunyai sulfur yang lebih rendah dibandingkan dengan batubara yaitu 0.04 %. Kandungan abu pada TKKS penelitian ini sangatlah besar sebesar 10% dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yaitu 4,5 % dan 4,8 (Idris et al., 2012; Ninduangdee & Kuprianov, 2016), hal ini menunjukkan kandungan abu semakin tinggi menunjukkan adanya kandungan alkali yang semakin besar. Untuk nilai kalor yang digunakan pada penelitian ini sebesar 18,07 MJ/Kg, nilai kalor ini tidak berbeda jauh dengan TKKS yang digunakan pada penelitian sebelumnya yaitu sebesar 18,4 MJ/Kg (Ninduangdee & Kuprianov, 2016) dan 16,8 MJ/Kg (Idris et al., 2012). Nilai kalor yang dihasilkan pada sampel TKKS ini mempunyai nilai kalor yang lumayan bagus sehingga bisa dijadikan bahan bakar.

### Hasil TG – DTA Sampel Batubara & TKKS

Karakteristik pembakaran yang diperoleh dari alat analisa TGA dapat digunakan sebagai panduan yang baik untuk membandingkan reaktivitas dan mudah terbakar bahan bakar yang akan digunakan pada ruang bakar (Varol et al., 2010). Pada analisa TG – DTA untuk sampel batubara dan TKKS sampai temperature 900 °C dengan laju pemanasan sebesar 20 °C/Min dan laju gas konstan pada 50 mL/min menggunakan udara dan nitrogen. Hasil TGA yang diperoleh adalah penurunan massa sampel dengan laju pemanasan konstan ditunjukkan pada Gambar 4. Grafik TG (Termogravimetri) merupakan fungsi penurunan massa terhadap kenaikan temperature (Mayasari & Yuniari, 2016). Grafik DTA untuk masing masing bahan bakar yang digunakan (Batubara dan TKKS) dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 4. Penurunan massa Batubara dan TKKS

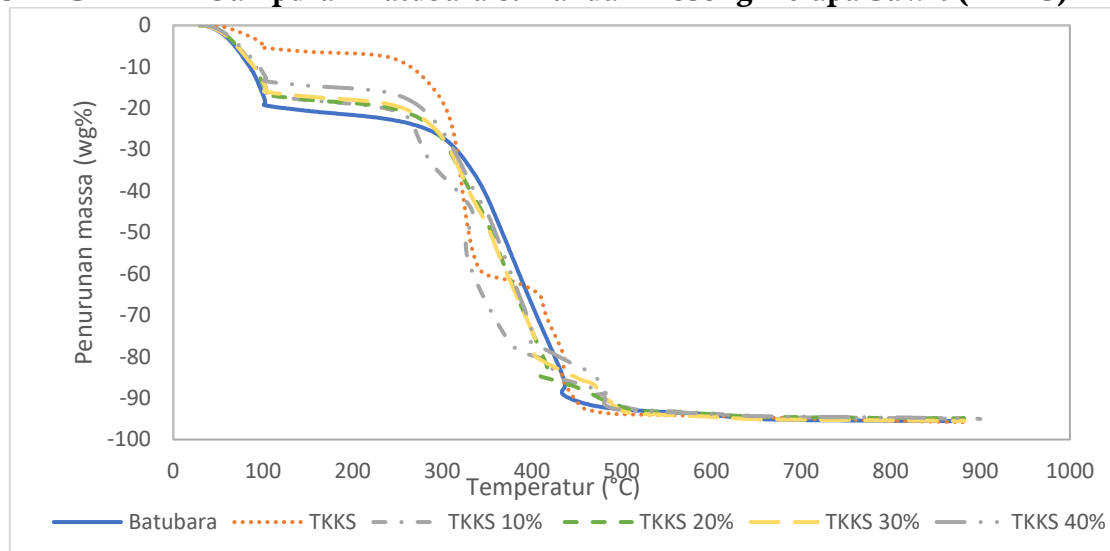


Gambar 5. DTG (%/Min) Batubara dan TKKS

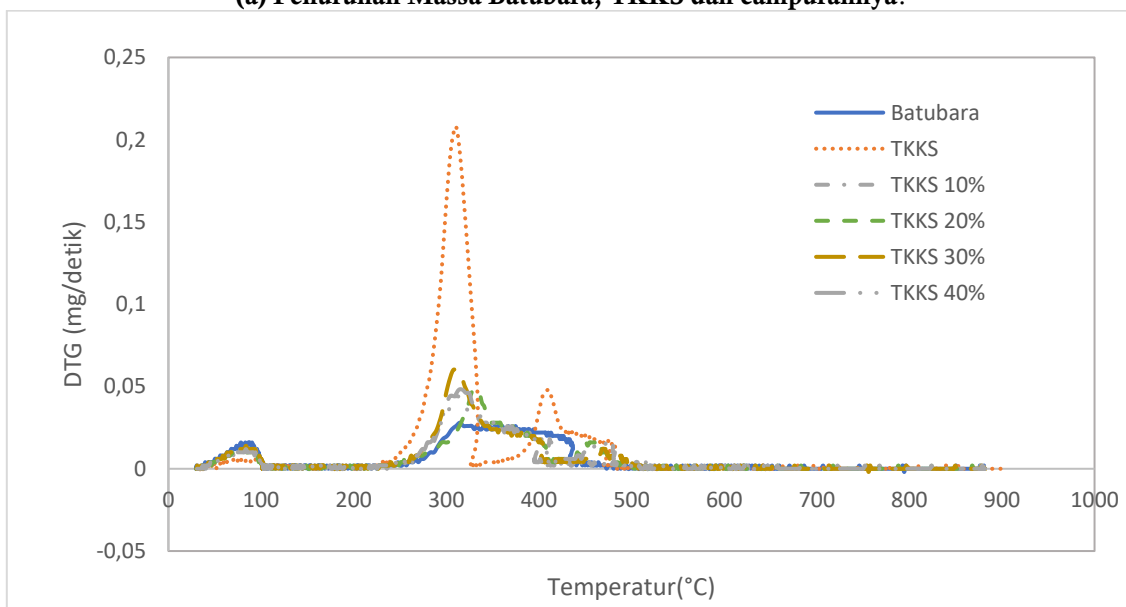
Gambar 4. Adalah grafik TG yang menunjukkan penurunan massa batubara dan TKKS dengan kurva yang terlihat berbeda pada tahap pembakaran untuk sampel TKKS dibandingkan dengan batubara, dapat dilihat penurunan massa TKKS pada temperature 300 °C sudah mencapai 38,66% dari berat total, sedangkan pada batubara penurunan massa pada temperatur 300 °C hanya mencapai 28,21 %. Hal ini dapat dikarenakan kandungan *volatile* TKKS lebih tinggi ini yang berarti berarti kandungan organik TKKS tinggi menyebabkan penurunan massa pada awal pembakaran lebih dominan (Varol et al., 2010).

Gambar 5. pada grafik DTG menerangkan bahwa untuk sampel TKKS terdiri dari 2 puncak sedangkan batubara hanya memiliki satu puncak. Adanya 2 puncak pada TKKS dikarenakan kandungan organik TKKS yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang menyebabkan TKKS mempunyai tiga tahapan degradasi pembakaran, yaitu pengeringan kadar air, devolatisasi utama dan kontinu devolatisasi. Pada devolatisasi utama merupakan degradasi hemiselulosa dan selulosa yang berada pada rentang temperature 180 – 300 °C, sedangkan kontinu devolatisasi ini komponen organik yang dapat terdegradasi pada suhu 400 °C yaitu lignin (Junga et al., 2020; Monir et al., 2018).

#### Hasil TG – DTA Campuran Batubara & Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)



(a) Penurunan Massa Batubara, TKKS dan campurannya.



(b) DTG Batubara, TKKS, dan campurannya

Gambar 6. (a) Penurunan Massa dan (b) DTG (%/min) Batubara, TKKS dan Campurannya

Pada penelitian ini hasil TG – DTG batubara dan TKKS pada Gambar 6. menunjukkan penurunan massa untuk batubara, TKKS, dan campuran keduanya. Adanya pencampuran TKKS dengan batubara dapat menurunkan temperatur puncak dikarenakan sifat dari batubara yang memiliki nilai karbon yang lebih besar dibandingkan dengan TKKS yaitu sebesar 44,91 %.

Selain itu dengan adanya pencampuran dapat menaikkan nilai temperatur penyalan yang ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2. Pembakaran TG-DTA Batubara dan TKKS**

| Parameter                  | Batubara, TKKS, dan Campurannya |              |             |             |             |             |
|----------------------------|---------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                            | Batubara<br>100%                | TKKS<br>100% | TKKS<br>10% | TKKS<br>20% | TKKS<br>30% | TKKS<br>40% |
| $dm/dt_{(max)}$ , %/menit  | 21,33                           | 29,98        | 20,98       | 25,19       | 27,20       | 29,85       |
| $dm/dt_{(mean)}$ , %/menit | 1,78                            | 1,84         | 1,79        | 1,82        | 1,82        | 1,80        |
| $T_{ignition}$ , °C        | 243,55                          | 228,87       | 232,61      | 235,83      | 238,38      | 239,02      |
| $T_{burnt\ out}$ , °C      | 880,09                          | 851,81       | 861,88      | 875,94      | 878,44      | 878,38      |
| $T_{max}$ , °C             | 314,75                          | 310,77       | 303,88      | 306,29      | 307,48      | 309,24      |

Hasil pencampuran batubara dan TKKS dengan variasi komposisi 10%, 20%, 30 % dan 40 % ini mengakibatkan adanya penurunan temperature puncak, yaitu 303,88 °C, 306,29 °C, 307,48 °C, dan 309,24 °C untuk campuran TKKS 10%, 20%, 30% dan 40% dengan kata lain adanya kenaikan ketinggian puncak berkorelasi dengan rasio massa TKKS dalam campurannya (Idris et al., 2012). Hal ini dapat terjadi semakin banyak kandungan TKKS, semakin meningkat kandungan volatile matter (VM). Sedangkan temperatur penyalan dengan adanya pencampuran semakin tinggi yang menandakan bahan bakar lebih mudah menyala. Dari Tabel 2. diperoleh temperatur penyalan sebesar 228.87 °C untuk TKKS, 232,61 °C, 235,83 °C, 238,38 °C dan 239,01 °C untuk campuran 10%,20%,30, dan 40% TKKS. Semakin besar campuran TKKS dengan batubara semakin banyak kandungan zat organik dimana mempermudah pembakaran (Cahyadi et al., 2012; Quan et al., 2009).

### Energi Aktivasi Pencampuran Batubara & TKKS

Hasil TG – DTA pada penelitian ini tidak hanya sifat termal dari pembakaran. Hasil TG-DTA dapat diperoleh energi aktivasi dari batubara, TKKS, dan campuran keduanya pada Tabel 3.

**Tabel 3. Energi aktivasi dari pencampuran batubara dan TKKS**

| Sampel    | Komposisi | $T_i$ (°C) | $T_b$ (°C) | Persamaan Reaksi        | Energi Aktivasi (kJ/mol) |
|-----------|-----------|------------|------------|-------------------------|--------------------------|
| Batubara  | 100:0     | 243,55     | 462,89     | $y = -5963,9x - 3,8585$ | 49,5764                  |
| 10% TKKS  | 90: 10    | 232,61     | 448,46     | $y = -5501,4x - 4,4199$ | 45,7353                  |
| 20 % TKKS | 80: 20    | 235,83     | 437,81     | $y = -5080,4x - 5,1427$ | 41,9890                  |
| 30% TKKS  | 70: 30    | 238,38     | 430,89     | $y = -4465,8x - 6,0737$ | 37,1253                  |
| 40% TKKS  | 60: 40    | 239,02     | 425,96     | $y = -4391,7x - 0,9764$ | 36,5126                  |
| TKKS      | 0:100     | 228,87     | 429,58     | $y = -3842,3x - 7,0871$ | 31,9449                  |

Pada penelitian ini energi aktivasi dari Batubara, TKKS dan campurannya yang ditetapkan berdasarkan grafik temperatur terhadap penurunan massa sehingga diperoleh persamaan regresi linear yang dapat digunakan untuk menghitung energi aktivasi. Energi aktivasi adalah energi minimum yang diperlukan untuk memulai suatu reaksi, reaktan akan sulit bereaksi jika mempunyai energi aktivasi yang kecil (Quan et al., 2009). Dari Tabel 3 diperoleh untuk energi aktivasi tertinggi pada batubara dibandingkan TKKS dan campuran batubara dengan TKKS. Energi aktivasi yang diperoleh TKKS sebesar 31,94 kJ/Mol sedangkan dengan ditambahkannya TKKS sebesar 40% dapat menaikkan energi aktivasi sebesar 30 % atau menjadi 45,73 kJ/mol. Energi aktivasi mencerminkan kandungan dari volatile matter (VM), Semakin tinggi energi aktivasi yang berarti semakin banyak kandungan volatile matter (VM), dan berlaku untuk sebaliknya energi aktivasi (Sidek et al., 2021).

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Penelitian ini adalah pengujian sampel batubara, TKKS dan campurannya dengan analisa TG-DTA, dimana sampel sebanyak 14 mg dengan laju pemanasan 20°C/menit dari temperatur ruang pembakaran sampai 900°C. Hasil penelitian ini adalah TKKS dapat dijadikan salah satu bahan bakar dengan mencampurkan batubara dengan TKKS. Adanya penambahan TKKS sampai 40% dapat meningkatkan mengakibatkan adanya penurunan temperature puncak, menaikkan temperatur penyalaan, dan adanya pencampuran batubara dengan TKKS dapat menaikkan energi aktivasi dari TKKS dari 31,94 kJ/Mol menjadi 45,73 kJ/Mol. Penambahan TKKS ke batubara meningkatkan reaktivitas pembakaran, pembakaran batubara meningkat seiring dengan menurunnya rasio bahan bakar (FC/VM) menunjukkan bahwa reaktivitas pembakaran batubara meningkat seiring dengan meningkatnya rasio campuran batubara.

### Saran

Hasil TG – DTA dapat memperoleh korelasi penurunan karbon yang tidak terbakar dan efisiensi pembakaran serta energi aktivasi dari pembakara, tetapi perlu dilakukan percobaan pembakaran pada skala tungku untuk memperoleh hasil yang lebih optimal.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian Konversi dan Konservasi Energi (PRKKE), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang telah memfasilitasi penelitian ini.

## REFERENSI

- Cahyadi, C., Surjosatyo, A., & Nugroho, Y. S. (2013). Predicting behavior of coal ignition in oxy-fuel combustion. *Energy Procedia*, 37, 1423–1434. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.018>
- Cahyadi, Surjosatyo, A., & Nugroho, Y. S. (2012). Behavior of pulverized coal combustion in air and in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> condition. *Applied Mechanics and Materials*, 229–231, 2804–2808. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.229-231.2804>
- Himawanto, D. A. (2013). Penentuan Energi Aktivasi Pembakaran Briket Char Sampah Kota Dengan Menggunakan Metoda Thermogravimetry Dan Isothermal Furnace. *Rotasi*, 15(3), 35. <https://doi.org/10.14710/rotasi.15.3.35-42>
- Idris, S. S., Rahman, N. A., & Ismail, K. (2012). Combustion characteristics of Malaysian oil palm biomass, sub-bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA). *Bioresourc Technology*, 123, 581–591. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.065>
- Junga, R., Pospolita, J., & Niemiec, P. (2020). Combustion and grindability characteristics of palm kernel shells torrefied in a pilot-scale installation. *Renewable Energy*, 147, 1239–1250. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.060>
- Maskur, Z., & Nugroho, A. (2021). Analisa Karakteristik Biomasa untuk Cofiring pada Pembangkit Batubara di Indonesia. *Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan I (SENASTITAN I)*, 394–402.
- Mayasari, H. E., & Yuniari, A. (2016). Karakteristik termogravimetri dan kinetika dekomposisi EPDM dengan bahan pengisi carbon black. *Majalah Kulit, Karet, Dan Plastik*, 32(2), 125. <https://doi.org/10.20543/mktp.v32i2.1591>

- Ministry of Agriculture. (2022). *Statistical of national leading estate crops commodity 2021-2023*.
- Monir, M. U., Abd Aziz, A., Kristanti, R. A., & Yousuf, A. (2018). Co-gasification of empty fruit bunch in a downdraft reactor: A pilot scale approach. *Bioresource Technology Reports*, 1, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.02.001>
- Ninduangdee, P., & Kuprianov, V. I. (2016). A study on combustion of oil palm empty fruit bunch in a fluidized bed using alternative bed materials: Performance, emissions, and time-domain changes in the bed condition. *Applied Energy*, 176, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.063>
- Ottaway, M. (1982). Use of thermogravimetry for proximate analysis of coals and cokes. *Fuel*, 61(8), 713–716. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(82\)90244-7](https://doi.org/10.1016/0016-2361(82)90244-7)
- Quan, C., Li, A., & Gao, N. (2009). Thermogravimetric analysis and kinetic study on large particles of printed circuit board wastes. *Waste Management*, 29(8), 2353–2360. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.03.020>
- Sidek, F. N., Saleh, S., & Abdul Samad, N. A. F. (2021). Kinetic parameter estimation for drying stage during gasification of empty fruit bunch. *Materials Today: Proceedings*, 51, 1338–1343. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.384>
- Varol, M., Atimtay, A. T., Bay, B., & Olgun, H. (2010). Investigation of co-combustion characteristics of low quality lignite coals and biomass with thermogravimetric analysis. *Thermochimica Acta*, 510(1–2), 195–201. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2010.07.014>
- Wang, P., Wang, G., Zhang, J., Lee, J. Y., Li, Y., & Wang, C. (2018). Co-combustion characteristics and kinetic study of anthracite coal and palm kernel shell char. *Applied Thermal Engineering*, 143, 736–745. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.009>
- Xinjie, L., Shihong, Z., Xincheng, W., Jinai, S., Xiong, Z., Xianhua, W., Haiping, Y., & Hanping, C. (2021). Co-combustion of wheat straw and camphor wood with coal slime: Thermal behaviour, kinetics, and gaseous pollutant emission characteristics. *Energy*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121292>
- Yan, Y., Wu, T., Lester, E., Tang, L., Meng, Y., Fang, Y., & Pang, C. H. (2019). The kinetics studies and thermal characterisation of biomass. *Energy Procedia*, 158, 357–363. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.115>