

Analisis Termal *Macro-Thermobalance* Pembakaran Serbuk Gergaji dan Campurannya

Sudarno^{1*}, Dwi Aris Himawanto¹, dan Agustinus Sujono²

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Madiun
Jl. Serayu, Madiun 63133

² Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret
Jl. Ir. Sutami 36 A, Surakarta 57126

*Korespondensi penulis, e-mail: sudarno@unmer-madiun.ac.id

ABSTRAK

Serbuk gergaji merupakan limbah kayu olahan yang dapat dimanfaatkan energinya. Namun keberadaan limbah pada umumnya rentan tercampur dengan biomassa lain. Pada penelitian ini akan menyelidiki karakteristik pembakaran serbuk gergaji yang dicampur dengan sekam padi atau tongkol jagung dalam bentuk serbuk. Prosentase campuran sekam padi atau tongkol jagung ke dalam serbuk gergaji divariasikan mulai 0, 25, 50, 75, dan 100%. Analisis termal *macro-thermobalance* dengan laju kenaikan temperatur 20°C/menit dalam lingkungan udara digunakan dalam hal ini. Sedangkan berat sampel yang digunakan dalam pengujian tersebut sebesar 10g. Dari hasil menunjukkan bahwa grafik TG dari sampel campuran mengalami pergeseran ke kanan untuk ukuran serbuk 40+/60- *mesh*. Ini berarti dekomposisi mengalami keterlambatan atau terjadi di daerah temperatur yang lebih tinggi. Sedangkan untuk ukuran serbuk 20+/40- *mesh* grafik TG sampel campuran mengalami pergeseran ke kiri, yang artinya dekomposisi lebih awal terjadi atau terjadi pada temperatur yang lebih rendah. Rata-rata energi aktivasi pembakaran karbon serbuk gergaji, serbuk gergaji-sekam padi, dan serbuk gergaji-tongkol jagung berturut-turut 91,67 kJ/mol, 95,28 kJ/mol, dan 89,83 kJ/mol. Sedangkan dari grafik DTG puncak minimum rata-rata, lebih tinggi untuk serbuk gergaji-sekam padi dan lebih rendah untuk serbuk gergaji-tongkol jagung dibanding serbuk gergaji. Rata-rata kontanta laju reaksi pembakaran karbon serbuk gergaji, serbuk gergaji-sekam padi, dan serbuk gergaji-tongkol jagung berturut-turut 0,0071, 0,0047, dan 0,0073.

Kata kunci: Serbuk gergaji, sekam padi, tongkol jagung, *macro-thermobalance*

ABSTRACT

The Sawdust is a waste of sawmill industry which can be used for energy sources. However, the existences of wastes are generally susceptible to mixed with other biomass. This research will investigated the combustion characteristics of sawdust mixed with rice husks or corncobs in powder form. Percentage weight of a mixture of rice husks or corn cobs into sawdust be varied in the range 0, 25, 50, 75, and 100%. Thermal analysis of macro-thermo balance at heating rate 20°C/min in air environment is used in this case. While the samples with weight 10g to be applied in this experiment. The results showed that the graphics TG of the sample mixture has shifted to the right for the powder size 40+/60-mesh. It means the decomposition has been delayed or occur data higher temperature region. As for the powde rsize 20+/40- mesh graphics TG of the sample mixture shifted to the left, it means early decomposition occurred or occurs at a lower temperature. The average activation energy of carbon combustion from saw dust, saw dust-rice husk and saw dust-corn cobs respectively 91.67kJ/mole, 95.28kJ/mole, and 89.83kJ/mol. While the average minimum peak of the graphics DTG, mixture of sawdust-rice husk higher and sawdust-corn cobs lower than sawdust. The average reaction rate constants of carbon burning from sawdust, sawdust-rice husk and sawdust-corn cobs are 0.0071, 0.0047, and 0.007, respectively.

Keywords: Sawdust, rice husk, corn cobs, *macro-thermo balance*

PENDAHULUAN

PUSDATIN ESDM [1] menunjukkan bahwa pemakaian energi total nasional termasuk di-

dalamnya dari sumber biomassa meningkat dari tahun 2000 sampai 2011, yaitu sebesar 777.925.086 BOE menjadi 1.114.766.960 BOE. Sementara pasokan energi biomassa terhadap energi total

nasional dalam kurun waktu tersebut berkurang dari 27,02% menjadi 13,52%. Untuk itu perlu dilakukan upaya-upaya untuk meningkatkan pertumbuhan energi baru dan terbarukan khususnya dari biomassa padat dalam memenuhi kebutuhan energi yang selalu bertambah seiring bertambahnya jumlah penduduk.

Disisi lain, produksi kayu olahan secara nasional semakin berkurang sebagai akibat dari berkurangnya area hutan. Dari tahun 2004 sampai 2011 kayu hutan olahan berkurang dari 8.158.403 m³ menjadi 6.373.409 m³, sedangkan area hutan berkurang dari 21.412.319 Ha menjadi 20.558.706 Ha [2]. Hal ini turut mendorong untuk meningkatkan nilai tambah dari produksi kayu olahan dari sisi limbah serbuk gergaji yang dihasilkan menjadi sumber energi.

Biomassa yang lain adalah tanaman jagung. Produksi jagung nasional meningkat dari tahun 2008 sampai 2012 sekitar 7,47%. Pada tahun 2008 mencapai 16.317.251 ton dan pada tahun 2012 diprediksi mencapai 18.961.645 ton [2]. Tongkol jagung yang merupakan limbah ternyata juga memiliki nilai kalor yang tinggi, yaitu sebesar 4186,54 kkal/kg [3]. Sehingga merupakan sumber energi baru yang terbarukan yang perlu optimalkan pemanfaatannya juga.

Dari produksi padi tahun 2012 sebesar 69,05 juta ton Gabah Kering Giling atau mengalami kenaikan sebesar 3,29 juta ton (5%) dibanding tahun 2011. Kenaikan produksi tersebut terjadi di Jawa sebesar 2,12 juta ton dan di luar Jawa sebesar 1,17 juta ton. Kenaikan produksi terjadi karena peningkatan luas panen seluas 239,80 ribu hektar (1,82%) dan kenaikan produktivitas sebesar 1,56 kuintal/hektar (3,13%) [2]. Sekam padi mempunyai kandungan energi 14,5 MJ/kg, massa jenis 110 kg/m³ dan kadar abu sekitar 20% [4]. Selama ini pada umumnya digunakan untuk pembakaran batu bata dan media tanam.

Berbagai macam cara dilakukan untuk meningkatkan pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi. Diantaranya dengan mendalami karakteristik termal pembakarannya dengan termogravimetri. Dalam pengujian ini akan diperoleh profil dekomposisi dan parameter kinetiknya. Dalam penelitian ini akan dilakukan studi analisis mengenai pembakaran biomassa serbuk gergaji, sekam padi, tongkol jagung dan campurannya. Termal analisis yang digunakan jenis termogravimetri *macro-thermobalance*.

Permasalahan yang ada selama ini bahwa karakteristik pembakaran biomassa padat tidak bisa dibuat standar secara umum, mengingat banyaknya macam dan jenis biomassa. Karena secara definisi biomassa adalah massa yang dihasilkan dari proses metabolisme. Sementara proses tersebut bisa terjadi pada hewan, manusia maupun tumbuhan. Sehingga

dapat dibayangkan betapa banyak aneka ragam jumlah dan jenis biomassa yang ada.

Sedangkan biomassa yang berupa limbah hasil suatu proses produksi pada umumnya terbuang dan bercampur dengan limbah-limbah biomassa yang lain. Untuk itu dalam penelitian ini akan mengkaji permasalahan yang menyangkut pengaruh campuran biomassa dan perubahan karakteristik termal dari sampel. Campuran yang dimaksud adalah serbuk gergaji-tongkol jagung dan serbuk gergaji-sekam padi, dengan tujuan diperoleh profil dekomposisi, energi aktivasi (E_a) dan konstanta laju reaksinya.

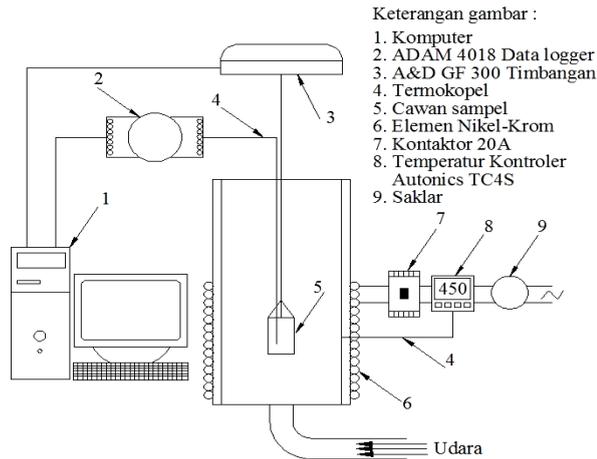
Setelah tujuan tersebut tercapai diharapkan diperoleh manfaat diantaranya memberikan pengetahuan tentang perubahan profil dekomposisi, energi aktivasi (E_a), dan konstanta laju reaksi (k), dapat memberi pertimbangan dalam rekayasa bahan bakar padat biomassa, dan menghasilkan parameter kinetik termal yang mendekati aplikasi nyata.

METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah biomassa berupa serbuk gergaji, tongkol jagung, dan sekam padi. Tongkol jagung dan sekam padi digiling untuk memperkecil ukuran partikel. Ketiga macam biomassa selanjutnya diayak menjadi dua ukuran serbuk yaitu 20+/40-*mesh* dan 40+/60-*mesh*. Untuk menyeragamkan dan menurunkan kadar air bahan sampel dioven pada suhu 50°C selama 2 jam. Setelah dilakukan pengovenan, untuk mendukung analisis termal, dilakukan uji proksimat terhadap ketiga bahan tersebut di laboratorium PAU Universitas Gadjah Mada.

Variasi campuran dibuat berdasarkan pada prosentase berat. Prosentase berat campuran sekam padi ke dalam serbuk gergaji divariasikan mulai 0, 25, 50, 75, dan 100% yang selanjutnya dinamakan SG100, SGSP7525, SGSP5050, SGSP2575, dan SP100. Demikian juga campuran tongkol jagung ke dalam serbuk gergaji divariasikan mulai 0, 25, 50, 75, dan 100% yang selanjutnya dinamakan SG100, SGSJ7525, SGSJ5050, SGSJ2575, dan SJ100.

Alat yang digunakan dalam pengujian ini jenis *macro-thermobalance* dengan skema rangkaian dan bagian yang terlihat pada Gambar 1. Alat ini mampu mencapai suhu maksimum 800°C. Langkah pengujian meliputi penimbangan sampel seberat 10g dan diletakkan ke dalam cawan. Kemudian suhu dinaikkan dari 30°C sampai 600°C dengan laju 20°C/menit dengan lingkungan udara sekitar. Perubahan massa dan temperatur akan terekam oleh komputer mulai awal hingga sampel terbakar menjadi abu.



Gambar 1. Skema Alat Macro-Thermobalance

Dari data perubahan massa sampel terhadap temperatur dan waktu diolah untuk mengetahui profil dekomposisi termal serta parameter kinetik yang terjadi. Dalam hal ini digunakan persamaan Arrhenius sebagai berikut [5]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = -k.f(\alpha), \quad (1)$$

dimana:

t = waktu (det)

α = Faktor konversi

$f(\alpha)$ = Model reaksi

k = Konstanta laju reaksi sebagai fungsi suhu

Faktor konversi α didefinisikan, sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{m_i - m_t}{m_i - m_f}, \quad (2)$$

dimana:

m_i = massa awal (gr)

m_f = massa akhir (gr)

m_t = massa aktual (gr)

Sedangkan konstanta laju reaksi sebagai fungsi temperatur, dinyatakan sebagai berikut:

$$k = Ae^{(-E_a/RT)}, \quad (3)$$

dimana:

A = faktor pre-eksponensial

E_a = energi aktivasi, (J/mol)

R = konstanta gas = 8,314 J/K.mol

Model reaksi $f(\alpha)$ dihitung berdasarkan:

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n, \quad (4)$$

dimana: n = adalah orde reaksi

Substitusi dari Persamaan 1, 3 dan 4 didapatkan persamaan:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A.(1 - \alpha)^n .e^{(-E_a/RT)}, \quad (5)$$

Dengan laju kenaikan temperatur sebesar

$$\beta = \frac{dT}{dt}, \text{ maka Persamaan 5 menjadi:}$$

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} .(1 - \alpha)^n .e^{(-E_a/RT)}, \quad (6)$$

Dengan mengintegrasikan Persamaan 6 akan diperoleh persamaan:

$$\frac{1 - (1 - \alpha)^{1-n}}{1 - n} = \frac{A}{\beta} \int_0^T e^{(-E_a/RT)} dT, \quad (9)$$

Karena $\int e^{(-E_a/RT)} dT$ bukan intergral eksak, dimana $e^{(-E_a/RT)}$ merupakan asimptot, sehingga untuk orde yang lebih tinggi dapat diabaikan. Dan Persamaan 9 menjadi:

$$\frac{1 - (1 - \alpha)^{1-n}}{1 - n} = \frac{ART^2}{\beta E_a} \left[1 - \frac{2RT}{E_a} e^{(-E_a/RT)} \right], \quad (10)$$

Penarikan logaritma Persamaan 10, diperoleh:

$$\ln \left[\frac{1 - (1 - \alpha)^{1-n}}{T^2(1 - n)} \right] = \ln \left[\frac{AR}{\beta E_a} \left[1 - \frac{2RT}{E_a} \right] \right] - \frac{E_a}{RT}, \quad (11)$$

untuk $n \neq 1$,

Jika diasumsikan $\frac{2RT}{E_a} \lll 1$, maka Persamaan

(11) menjadi:

$$\ln \left[\frac{1 - (1 - \alpha)^{1-n}}{T^2(1 - n)} \right] = \ln \left[\frac{AR}{\beta E_a} \right] - \frac{E_a}{RT}, \text{ untuk } n \neq 1, \quad (12)$$

Dengan asumsi orde reaksi sangat kecil, maka Persamaan (12) menjadi:

$$\ln \left| -\frac{\ln(1 - \alpha)}{T^2} \right| = \ln \left[\frac{AR}{\beta E_a} \right] - \frac{E_a}{RT}, \quad (13)$$

Dari Persamaan (12), (13) dan plotting data:

$$\ln \left| \frac{1 - (1 - \alpha)^{1-n}}{T^2(1 - n)} \right| \text{ dengan } \frac{1}{T}, \text{ untuk } n \neq 1, \text{ dan}$$

$$\ln \left| -\frac{\ln(1 - \alpha)}{T^2} \right| \text{ dengan } \frac{1}{T}, \text{ untuk } n = 1$$

Akan didapatkan garis lurus dengan kemiringan $\frac{E_a}{R}$ dan perpotongan sumbu vertikal di $\ln \left[\frac{AR}{\beta E_a} \right]$,

maka selanjutnya dapat diperhitungkan harga energi aktivasi dan pre-eksponensial.

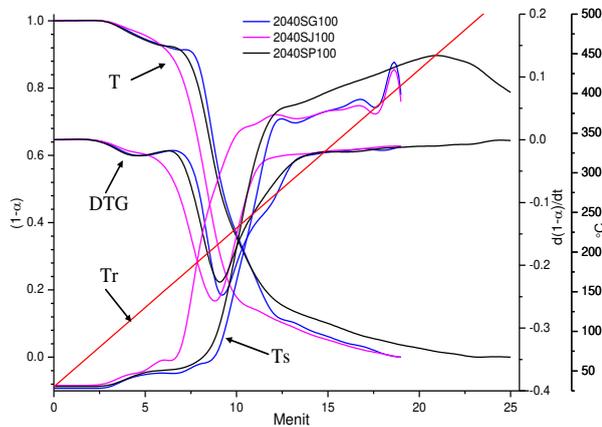
HASIL DAN PEMBAHASAN

Macro-thermobalance

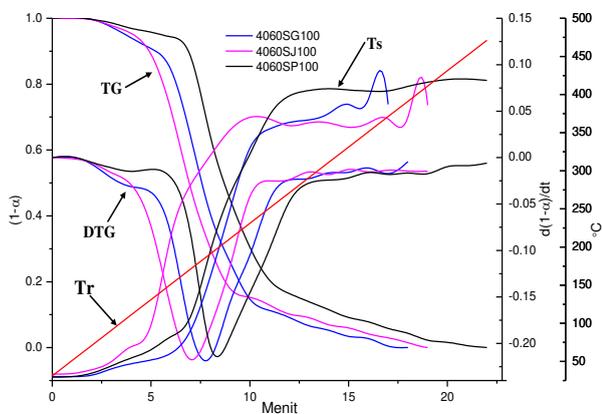
Profil dekomposisi selama proses pembakaran ditunjukkan pada Gambar 2 dan 3. Terlihat adanya penyimpangan antara temperatur reaktor (T_r) dan sampel (T_s) yang cukup signifikan. Hal ini juga terjadi pada analisis termal biomassa dengan menggunakan *macro-thermo balance* dengan meng-

gunakan sampel sebesar 39-60g [6]. Penggunaan sampel dalam jumlah yang besar menyebabkan temperatur sampel tidak homogen. Selain itu juga disebabkan adanya rekasi endotermis pada tahap pengeringan dan devolatilisasi serta reaksi eksotermis pada tahap oksidasi karbon. Pada saat reaksi endotermis T_r mendahului T_s kemudian pada saat reaksi eksotermis T_s mendahului T_r .

Pergantian tahap-tahap dekomposisi termal yaitu proses pengeringan, devolatilisasi, dan oksidasi karbon pada *macro-thermo balance* terlihat kurang jelas jika dibandingkan dengan pengujian TGA umumnya. Hal ini disebabkan pada massa sampel yang besar temperatur tidak homogen dibandingkan dengan sampel yang kecil, sehingga tahap reaksi berjalan secara bersamaan secara *overlap* atau paralel. Sementara pada sampel dengan jumlah yang kecil suhu lebih homogen dan tahap reaksi berjalan secara bergantian atau seri.



Gambar 2. *Macro-Thermobalance* Pembakaran Serbuk Gergaji, Serbuk Tongkol Jagung dan Serbuk Sekam Padi Ukuran Partikel 20+/40- Mesh dengan Laju Kenaikkan Temperatur 20 °C/menit



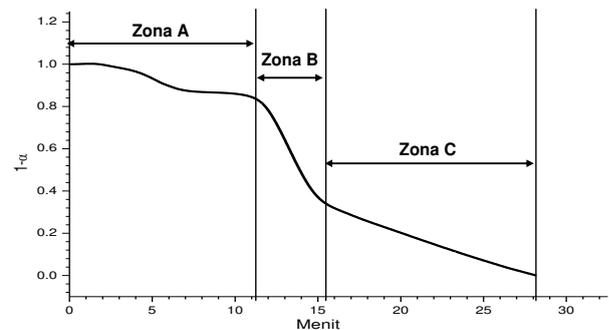
Gambar 3. *Macro-Thermobalance* Pembakaran Serbuk Gergaji, Serbuk Tongkol Jagung dan Serbuk Sekam Padi Ukuran Partikel 40+/60- Mesh dengan Laju Kenaikkan Temperatur 20 °C/menit

Dari grafik DTG terlihat pergantian tahap pengeringan ke tahap devolatilisasi hanya merupakan titik belok tidak sampai mendekati nol. Demikian juga dari tahap devolatilisasi ke oksidasi karbon tetap terdapat dua buah titik belok yaitu sebelum dan sesudah tahap devolatilisasi selesai. Titik belok pertama terbentuk karena adanya tahap devolatilisasi dan oksidasi karbon yang terjadi secara bersamaan. Beberapa titik belok ini juga muncul dari pembakaran campuran rami dan arang rami [7] dan pirolisis sampah kota dari campuran organik dan non organik [8]. Oleh karena itu semakin heterogen dan besar jumlah sampel, terlihat dekomposisi termal seakan mendekati satu tahap reaksi. Sehingga sangat sulit menentukan parameter kinetik masing-masing tahap reaksi, dikarenakan tahap tersebut berlangsung secara bersama-sama.

Dalam grafik *macro-thermobalance* dibagi menjadi tiga zona yaitu zona A, zona B, dan zona C seperti terlihat pada Gambar 4. Pembagian tersebut merujuk pada dekomposisi termal pembakaran campuran *oil-shale* dengan beberapa biomassa [9]. Zona A yaitu daerah dengan fraksi massa air terbesar, zona B yaitu daerah dengan fraksi massa volatil terbesar, dan zona C yaitu daerah dengan fraksi massa karbon terbesar. Meskipun pada masing-masing zona ada fraksi massa lain yang bereaksi, namun tidak dominan mempengaruhi bentuk umum grafik TG bio massa.

Profil Dekomposisi Termal

Hasil uji *proximate* ketiga macam biomassa ditunjukkan pada Tabel 1. Serbuk gergaji mempunyai kadar air dan karbon tetap tertinggi, sebesar 9,73 wt% dan 24,46 wt%. Sementara serbuk tongkol jagung mempunyai kadar volatil tertinggi sebesar 70,1 wt% dan kadar abu tertinggi pada serbuk sekam padi sebesar 20,44 wt%. Sehingga dalam sampel campuran antara serbuk gergaji dengan serbuk tongkol jagung atau serbuk sekam padi, sama halnya dengan meningkatkan kadar volatil atau kadar abu dalam serbuk gergaji.



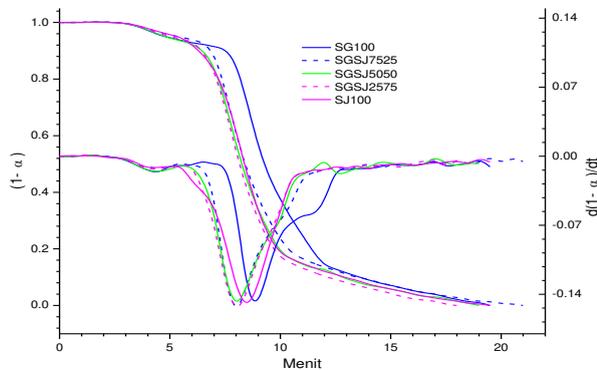
Gambar 4. Zona Penting dalam Dekomposisi Termal Biomassa

Tabel 1. Hasil Uji Proksimat

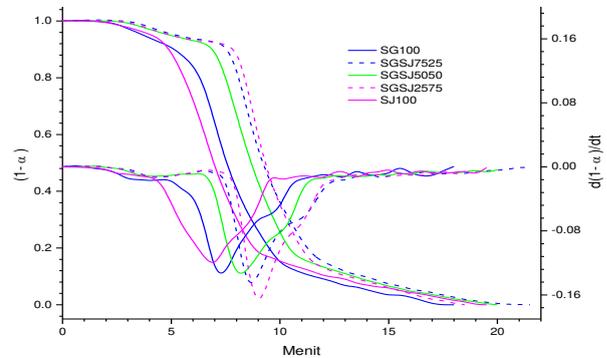
Bio-massa	Air	Volatil	Karbon tetap	Abu	Kalori (Kal/g)
	wt%	wt%	wt%	wt%	
Serbuk gergaji (SG)	9.73	64.01	24.46	1.80	4885.77
Serbuk tongkol jagung (SJ)	3.92	70.10	24.35	1.63	4444.26
Serbuk sekam padi (SP)	3.29	55.47	20.80	20.44	3573.21

Profil dekomposisi termal dari sampel biomassa campuran ditunjukkan pada Gambar 5, 6, 7, dan 8. Dimana setelah dilakukan pencampuran serbuk gergaji dengan serbuk tongkol jagung atau serbuk sekam padi maka zona A, B, dan C bergeser kekiri untuk ukuran serbuk 20+/40- mesh. Pergeseran terbesar terjadi pada komposisi campuran SGSJ2575 dan SGSP2575. Sedangkan untuk ukuran serbuk 40+/60- mesh zona A, B, dan C mengalami pergeseran kekanan. Pergeseran terbesar terjadi pada komposisi campuran yang sama yaitu SGSJ2575 dan SGSP2575. Hal ini disebabkan karena pada campuran dengan ukuran serbuk besar porositasnya lebih tinggi dibandingkan dengan ukuran serbuk yang kecil. Sehingga oksigen akan mudah berdifusi ke dalam sampel dan *self-cooling* atau *self-heating* antar partikel tidak terjadi dan begitu sebaliknya pada campuran dengan ukuran serbuk kecil. *Self-cooling* atau *self-heating* adalah peristiwa pendinginan atau pemanasan diri dalam sampel karena perbedaan temperatur antar partikel [10].

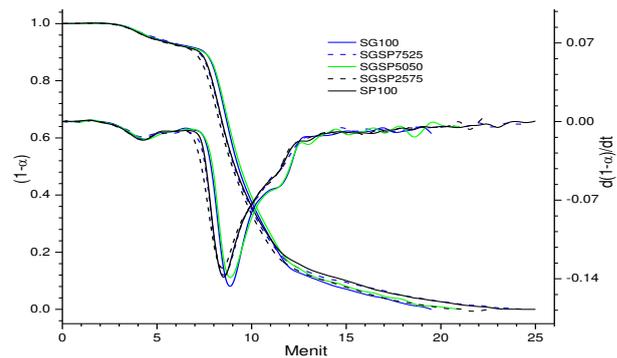
Pada kejadian *self-cooling* atau *self-heating* antar partikel ini akan menyebabkan zona A mempunyai jangkau waktu reaksi lebih lama. Karena dibutuhkan waktu transfer panas dari satu partikel ke partikel lain dalam sampel. Perbedaan temperatur partikel tersebut disebabkan adanya perbedaan panas jenis antara serbuk gergaji, serbuk tongkol jagung dan serbuk sekam padi. Terutama pada zona A yang didominasi oleh reaksi endotermis yaitu pengeringan dan sebagian kecil devolatilisasi. Perbedaan panas jenis dalam biomassa tersebut disebabkan oleh adanya perbedaan kadar air dan temperatur [11].



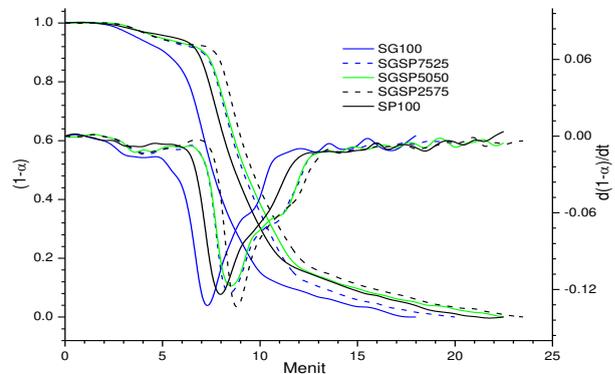
Gambar 5. Macro-Thermobalance Pembakaran Campuran Serbuk Gergaji dan Serbuk Tongkol Jagung dengan Ukuran Serbuk 20+/40- Mesh dengan Laju Kenaikkan Temperatur 20°C/menit



Gambar 6. Macro-Thermobalance Pembakaran Campuran Serbuk Gergaji dan Serbuk Tongkol Jagung dengan Ukuran Serbuk 40+/60- Mesh dengan Laju Kenaikkan Temperatur 20°C/menit



Gambar 7. Macro-Thermobalance Pembakaran Campuran Serbuk Gergaji dan Serbuk Sekam Padi dengan Ukuran Serbuk 20+/40- Mesh dengan Laju Kenaikkan Temperatur 20°C/menit



Gambar 8. Macro-Thermobalance Pembakaran Campuran Serbuk Gergaji dan Serbuk Sekam Padi dengan Ukuran Serbuk 40+/60- Mesh dengan Laju Kenaikkan Temperatur 20°C/menit

Sementara untuk zona B terjadi reaksi endo-termis dan eksotermis yaitu devolatilisasi oksidasi karbon tetap. Dimana pada saat devolatilisasi masih berlangsung pembakaran karbon mulai terjadi. Secara umum pada zona ini fraksi massa yang bereaksi berkurang, sebelum dicampur serbuk gergaji rata-rata mempunyai fraksi 76,35%, setelah dicampur turun menjadi 74,96%. Penurunan fraksi terbesar terjadi pada variasi sampel SGSJ7525 ukuran serbuk 20+/40- *mesh* sebesar 6,15%.

Dengan menambahkan serbuk tongkol jagung ke dalam serbuk gergaji waktu reaksi pada zona B berkurang 0,58 menit. Dan jika ditambahkan serbuk sekam padi waktu reaksi pada zona B bertambah 0,33 menit. Sehingga secara umum penambahan serbuk sekam padi atau tongkol jagung ke dalam serbuk gergaji menyebabkan berkurang 0,13 menit. Mengingat dalam daerah tersebut selain energi panas dari reaktor ada tambahan energi yang dilepaskan dari reaksi oksidasi karbon.

Dua parameter perubahan yaitu fraksi massa dan waktu reaksi ini tergambar dalam grafik DTG. Rata-rata sampel campuran akan menyebabkan puncak minimum DTG menjadi lebih rendah. Puncak minimum terendah terjadi pada campuran SGSJ2575 dengan ukuran serbuk 40+/60- *mesh*.

Selanjutnya untuk di daerah zona C fraksi massa rata-rata dari seluruh variasi campuran meningkat dari 14,72% menjadi 17,17%. Peningkatan tertinggi terjadi pada campuran SGSJ7525 dengan ukuran serbuk 20+/40- *mesh* yaitu dari 14,12% menjadi 23,45%. Hal ini dikarenakan karbon yang terbakar pada zona B sedikit dan menambah jumlah karbon sisa di zona C.

Awal terjadinya reaksi paralel antara tahap-tahap dekomposisi termal dari sampel ditunjukkan pada grafik DTG setelah mencapai puncak minimum. Dimana terlihat adanya titik belok sebelum masuk pada zona B maupun C. Pada zona A titik belok tersebut merupakan awal terjadinya devolatilisasi pada saat pengeringan masih berlangsung. Sedangkan pada zona B, titik belok tersebut merupakan awal pembakaran karbon tetap, sementara devolatilisasi sedang berlangsung.

Energi Aktivasi

Mengingat dalam pengujian *macro-thermobalance* reaksi terjadi secara bersamaan atau paralel, maka sulit menentukan awal terjadinya oksidasi karbon tetap. Oleh karena itu energi aktivasi pembakaran karbon tetap dalam hal ini didasarkan pada perhitungan proksimat. Energi aktivasi pembakaran karbon tetap serbuk gergaji dan sekam padi berturut-turut diperoleh 94.90 kJ/mol dan 93.32 kJ/mol. Sementara penelitian lain menemukan sebesar 32.77 kJ/mol dan 25.21 kJ/mol,

namun dalam pembakaran totalnya [12]. Energi aktivasi tertinggi didapatkan dari campuran SGSP5050 pada ukuran serbuk 40+/60- *mesh* yaitu sebesar $E_a = 118.73$ kJ/mol. Sedangkan yang terendah diperoleh dari campuran SGSJ5050 pada ukuran serbuk 20+/40- *mesh* sebesar $E_a = 48.86$ kJ/mol. Distribusi energi aktivasi selengkapnya tertuang dalam Tabel 2.

Dari rata-rata kedua ukuran serbuk diperoleh energi aktivasi tertinggi dicapai pada campuran SGSP5050 sebesar 101,40 kJ/mol. Sedangkan energi aktivasi terendah dicapai pada campuran SGSJ5050 sebesar 83,80 kJ/mol. Hal ini sebanding dengan pembakaran campuran antara batu bara dengan sekam padi atau serbuk gergaji. Energi aktivasi pembakaran turun dengan menambahkan sekam padi atau serbuk gergaji ke dalam batu bara dan unjuk kerja pembakaran terbaik pada campuran 50% [12].

Sedangkan jika ditinjau dari pengaruh ukuran serbuk terhadap energi aktivasi pembakaran karbon tetap. Ukuran serbuk 40+/60- *mesh* menyebabkan energi aktivasi naik dan tertinggi pada komposisi campuran 50% - 50% sebesar 113,85 kJ/mol. Sedangkan ukuran serbuk 20+/40- *mesh* menyebabkan energi aktivasi turun dan terendah pada komposisi campuran 50% - 50% sebesar 71,35 kJ/mol.

Rata-rata energi aktivasi pembakaran karbon tetap meningkat untuk campuran serbuk gergaji dan serbuk tongkol jagung atau serbuk sekam padi pada ukuran 40+/60- *mesh*. Jika ditinjau dari profil dekomposisi termal grafik TG bergeser kekanan. Hal ini berarti pembakaran karbon tertunda dan terbakar pada daerah temperatur yang lebih tinggi. Inilah yang menyebabkan energi aktivasi pembakaran meningkat [13].

Sebaliknya untuk ukuran serbuk 20+/40- *mesh*, rata-rata energi aktivasi pembakaran karbon turun, baik pada campuran serbuk gergaji dengan serbuk tongkol jagung maupun dengan serbuk sekam padi. Jika diperhatikan dalam grafik TG sampel campuran mengalami pergeseran ke kiri. Hal ini berarti karbon terbakar pada daerah temperatur yang lebih rendah.

Konstanta Laju Reaksi

Dengan menerapkan laju kenaikan temperatur 20°C/menit dijaga tetap dalam lingkungan udara sekitar, maka konstanta laju reaksi pembakaran karbon dari variasi campuran dapat dihitung seperti terangkum dalam Tabel 3. Konstanta laju reaksi tertinggi terjadi pada variasi sampel SGSJ5050 dengan ukuran serbuk 40+/60- *mesh* sebesar 0,0101. Sedangkan terendah terjadi pada variasi campuran SGSP7525 dengan ukuran serbuk 20+/40- *mesh* sebesar 0,0039.

Tabel 2. Energi Aktivasi Berdasarkan Campuran, Ukuran Serbuk dan Jenis Pengujian

Ukuran serbuk	K o m b i n a s i Biomassa	Nilai	Prosentase berat campuran				
			100-0%	75-25%	50-50%	25-75%	0-100%
20+/40- mesh	SG-SJ	Ea (kJ/mol)	94.90	83.65	48.86	85.89	91.03
		A	25.30	7.44	0.05	11.36	25.33
		Korelasi	0.75	0.74	0.66	0.71	0.80
	SG-SP	Ea (kJ/mol)	94.90	78.95	93.84	83.72	93.32
		A	25.30	2.97	27.42	6.38	17.48
		Korelasi	0.75	0.78	0.85	0.93	0.84
40+/60- mesh	SG-SJ	Ea (kJ/mol)	88.44	109.61	118.73	92.24	87.64
		A	15.79	289.41	673.95	27.01	19.76
		Korelasi	0.83	0.85	0.70	0.77	0.82
	SG-SP	Ea (kJ/mol)	88.44	95.54	108.96	110.65	92.71
		A	15.79	37.64	102.91	124.77	15.65
		Korelasi	0.83	0.96	0.92	0.93	0.77

Tabel 3. Konstanta Laju Reaksi *Macro-Thermobalance* Non-Isotermal

Ukuran serbuk	β (°C/min)	Konstanta laju reaksi (k)								
		SG 100	SJ 100	SP 100	SGSJ 7525	SGSJ 5050	SGSJ 2575	SGSJ 7525	SGSP 5050	SGSP 2575
20+ /40- mesh	20	0.0058	0.0076	0.0077	0.0061	0.0061	0.0081	0.0039	0.01	0.0086
40+ /60- mesh	20	0.0084	0.0054	0.0051	0.0063	0.0101	0.007	0.0073	0.0045	0.0047

Namun jika dirata-rata secara umum penambahan serbuk tongkol jagung ke dalam serbuk gergaji menyebabkan laju pembakaran karbon naik dari 0,0071 menjadi 0,0073 atau naik sebesar 2,58%. Sedangkan jika ditambahkan serbuk sekam padi ke dalam serbuk gergaji laju pembakaran karbon turun dari 0,0071 menjadi 0,0047 atau turun 33,8%. Hal ini disebabkan dalam pembakaran karbon tetap dipengaruhi oleh kadar abu. Abu yang tidak terbakar akan menghalangi difusi oksigen ke dalam karbon [14]. Semakin tinggi kadar abu, karbon tetap semakin sulit teroksidasi oleh oksigen, dan begitu sebaliknya. Dari perhitungan teoritis proksimat kadar abu serbuk gergaji turun dari 1,8% menjadi 1,72% dengan menambahkan serbuk tongkol jagung dan naik menjadi 11,12% dengan menambahkan serbuk sekam padi.

KESIMPULAN

Serbuk gergaji campuran menyebabkan terjadinya perubahan pada profil dekomposisi termalnya. Perubahan ini selanjutnya akan berpengaruh terhadap parameter kinetik yang dihasilkan. Penambahan sekam padi ke dalam serbuk gergaji akan meningkatkan energi aktivasi pembakaran karbon dari 91,67 kJ/mol menjadi 95,28 kJ/mol diiringi dengan penurunan konstanta laju reaksi dari 0,0071 menjadi 0,0047. Sebaliknya penambahan tongkol jagung dalam serbuk gergaji mengakibatkan energi aktivasi pembakaran karbon turun dari 91,67 kJ/mol menjadi 89,83 kJ/mol diiringi dengan naiknya konstanta laju reaksi dari 0,0071 menjadi 0,0073.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ESDM, *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia*, Jakarta, 2012.
- [2] Badan Pusat Statistik, *Statistik Indonesia*, Jakarta, 2012.
- [3] Suro, U.B., Peningkatan Kualitas Pembakaran Biomassa Limbah Tongkol Jagung sebagai Bahan Bakar Alternatif dengan Proses Karbonisasi dan Pembriketan, *Jurnal Rekayasa Proses*, Vol. 4, No.1, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Janabadra Yogyakarta, 2010.
- [4] Suyitno, Perumusan Laju Reaksi dan Sifat-Sifat Pirolisis Lambat Sekam Padi Menggunakan Metode Analisis Termogravimetri, *Jurnal Teknik Mesin UNS*, Vol. 11: 12–18, 2009.
- [5] Sait, H.H., Hussain, A., Salema, A.A., Ani, F.N., Pyrolysis and combustion kinetics of date palm biomass using thermogravimetric analysis, *Biore-source Technology* 118, pp.382–389, Elsevier, 2012.
- [6] Khalil, R.A. *et al.*, Thermal analysis of energy crops Part I: The applicability of a macrothermobalance for biomass studies, *Journal Anal. Appl. Pyrolysis* 81 (2008) 52–59, Elsevier, 2007.
- [7] Qiguo Yi, Fangjie Qi, Gong Cheng, Thermogravimetric analysis of co-combustion of biomass and biochar, *Journal Therm Anal Calorim*, DOI 10.1007/s10973-012-2744-1, Springer, 2012.
- [8] Aries, H.D., Indarto, Saptoadi, H., dan Rohmat, T.A., Karakteristik dan Pendekatan Kinetika Global pada Pirolisis Lambat Sampah Kota

- Terseleksi, *Reaktor*, Vol. 13 No. 3, Juni 2011, hal. 140-147, UNDIP, Semarang, 2011.
- [9] Qing Wang, Hao Xu, Hongpeng Liu, Chunxia Jia, Jingru Bai, Thermogravimetric Analysis of The Combustion Characteristics of Oil Shale Semi-Coke/Biomass Blends, *Oil Shale*, Vol. 28, No. 2, pp. 284–295, Estonian Academy Publishers, 2011.
- [10] Boris, L.V., *Thermal Decomposition of Solids and Melts*, Springer, 2007.
- [11] Prabir, B., *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*, Published by Elsevier Inc, 2010.
- [12] Sahu, S.G., Sarkar, P., Chakraborty, N., Adak, A.K., *Thermogravimetric assessment of combustion characteristics of blends of a coal with different biomass chars*, *Fuel Processing Technology*, 91 (2010) 369–378, Elsevier, 2009.
- [13] Brown, M.E., *Introduction of Thermal Analysis Techniques and Applications*, Chapman and Hall, USA, 1988.
- [14] Jayanti, S., Maheswaran, K. , Saravanan, V., Assessment of the effect of high ash content in pulverized coal combustion, *Applied Mathematical Modelling*, 31 (2007) 934–953, Elsevier, 2007.