

PENGARUH RASIO PERSENTASE UDARA PEMBAKARAN ANTARA UDARA PRIMER DAN SEKUNDER TERHADAP EFISIENSI PEMBAKARAN SERAT BUAH SAWIT (MESOCARP) PADA REAKTOR PEMBAKARAN *FIXED-BED*

Bagus Giri Yudanto¹⁾, Ilmi Abdullah¹⁾, Farel H. Napitupulu¹⁾, dan Tulus¹⁾

Abstrak Kajian tentang proses pembakaran serat buah kelapa sawit (mesocarp) skala laboratorium telah dilakukan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi rasio persentase udara pembakaran antara udara primer (PA) dan udara sekunder (SA) terhadap kualitas pembakaran serat buah kelapa sawit. Secara berurutan perbandingan udara pembakaran (PA:SA) divariasikan pada rasio (20:80), (35:65), (50:50), (65:35) dan (80:20). Kegiatan eksperimen dilakukan dengan menggunakan reaktor pembakaran *fixed-bed*. Pengontrolan variasi laju aliran udara pembakaran menggunakan *anemometer*, pengukuran suhu digunakan *thermocouple* tipe K, dan pengukuran emisi gas buang digunakan *gas analyzer*. Hasil karakteristik pembakaran serat buah kelapa sawit (mesocarp) dengan metode *thermogravimetry* (TGA) pada laju pemanasan 5°C/menit menunjukkan bahwa proses pengeringan serat dari kadar air berlangsung hingga suhu 168°C, proses devolatilisasi pada suhu 298°C dan pembakaran arang terjadi pada suhu 311°C. Energi aktivasi proses pembakaran serat sebesar 17 kJ/mol.K dengan nilai faktor pre-eksponensial 9,40 mg/s. Berdasarkan hasil eksperimen diketahui bahwa ada pengaruh cukup signifikan pengaturan jumlah rasio udara pembakaran antara udara primer dan udara sekunder terhadap suhu dan efisiensi pembakaran.

Kata Kunci: rasio udara, udara pembakaran, biomasa, serat, udara primer, udara sekunder.

Penulis yang tidak disertai dengan catatan kaki instansi adalah peneliti pada Pusat Penelitian Kelapa Sawit

Bagus Giri Yudanto (✉)
Pusat Penelitian Kelapa Sawit
Jl. Brigjen Katamso No. 51 Medan, Indonesia
Email: bagusgiri@yahoo.com

¹⁾ Staf Pengajar di Sekolah Pascasarjana
Program Studi Teknik Mesin Universitas Sumatera Utara (USU)

Abstract A study on the process of burning the oil-palm fibers (mesocarp) in a laboratory scale has been done. The purpose of this study was to find out the influence of the variation of percentage ratio of the combustion air between primary air (PA) and secondary air (SA) on the combustion quality of oil palm fibers. The comparison between PA and SA (PA: SA) was respectively varied in the ratios of (20:80), (35:65), (50:50), (65:35), and (80:20). The experimental activities were done by using *fixed-bed* combustion reactor. The variation of combustion air flow rate was controlled by using an *anemometer*, type-K *thermocouple* was used to measure the temperature, and *gas analyzer* was used to measure the exhaust gas emissions. The result of the characteristics of mesocarp burning through *thermogravimetry* (TGA) method at the heat flow of 5°C/minute showed that the process of drying the fibers from the water content lasted to 168°C, devolatilization process was done at 298°C and the charcoal burning occurred at 311°C. The activation energy of mesocarp burning was 17kJ/mol.K with the value of pre-exponential factor of 9.40 mg/s. based on the result of the experiment; it was find out that there was an adequately significant influence of the setting of combustion air ratio amount between primary air and secondary air on the combustion temperature and efficiency.

Keywords: Air fuel ratio, combustion air, biomass, fiber, secondary air, primary air.

PENDAHULUAN

Proses pembakaran di beberapa boiler pabrik kelapa sawit (PKS) di Indonesia masih banyak mengalami kendala. Salah satunya adalah efisiensi pembakaran relatif rendah yang diindikasikan dengan faktor kehilangan bahan bakar yang ikut keluar bersama



gas buang relatif tinggi. Bahan bakar yang tidak terbakar dan ikut keluar bersama gas buang melalui cerobong asap tersebut dapat diidentifikasi dengan munculnya asap berwarna hitam atau putih pekat selama proses pembakaran berlangsung (TSI, 2004). Pada umumnya, faktor penyebab utama penurunan efisiensi pembakaran jenis bahan bakar padat (biomassa) disebabkan oleh proses pencampuran antara udara pembakaran (oksidator) dengan bahan bakar di dalam ruang pembakaran tidak berlangsung dengan baik (Culp, 1991). Untuk mengoksidasi bahan bakar padat di ruang pembakaran boiler dibutuhkan pasokan udara dari dua arah, yaitu aliran udara dari bagian bawah dan atas bahan bakar.

Aliran udara pembakaran dari bagian bawah bahan bakar adalah udara primer (*primary air*, PA). Udara primer berfungsi untuk mengoksidasi karbon tetap (*fixed carbon*, FC) yang terdapat dalam bahan bakar dan mendinginkan pelat penahan tempat dudukan bahan bakar agar tidak cepat mengalami deformasi plastis akibat radiasi panas dari proses pembakaran bahan bakar. Aliran udara pembakaran dari bagian atas bahan bakar adalah udara sekunder (*secondary air*, SA). Udara sekunder berfungsi untuk mengoksidasi senyawa pembentuk bahan bakar dalam berat molekul yang ringan seperti hidrogen, oksida dari karbon dan metana dalam bentuk gas (*volatile matter*, VM) (Hallett, 2005). Dengan demikian jelas ada perbedaan antara fungsi udara primer dan sekunder dalam proses pembakaran bahan bakar padat di ruang pembakaran boiler.

Sampai dengan saat ini, boiler di PKS menggunakan teknologi konvensional yang mengadopsi boiler berbahan bakar batu bara dengan model tungku tetap (*fixed bed*), sehingga penentuan rasio pengaturan jumlah udara pembakaran antara PA dan SA mengikuti pengalaman empirik pembakaran batu bara, yaitu 65:35 (%). Adopsi persentase rasio udara pembakaran antara PA dan SA tersebut pada proses pembakaran serat buah kelapa sawit (*mesocarp*) di ruang pembakaran boiler dianggap kurang tepat, karena tidak mempertimbangkan karakteristik bahan bakar sehingga diduga kuat menjadi faktor pemicu munculnya asap hitam di cerobong asap boiler PKS.

Secara inheren, bahan bakar biomassa memiliki kandungan VM lebih tinggi dibanding unsur FC, yaitu sekitar 65% (Santos de Souza, 2004). Ini artinya bahwa pada saat proses dekomposisi bahan bakar,

komponen volatil yang terbentuk jumlahnya relatif lebih banyak yang terurai menjadi gas (sekitar 65%) dibanding kandungan FC. Sementara itu, batu bara cenderung memiliki kandungan FC relatif lebih tinggi dibanding VM, yaitu sekitar 70% (Santos de Souza, 2004).

Sampai dengan saat ini, belum ada riset yang mengkaji tentang pengaruh jumlah persentase rasio udara pembakaran antara PA dan SA, terutama pada proses pembakaran bahan bakar biomassa serat buah kelapa sawit. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah mencari rasio udara pembakaran yang representatif antara udara primer (PA) dan udara sekunder (SA) agar diperoleh efisiensi pembakaran relatif lebih baik.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah serat buah kelapa sawit (*mesocarp*) yang diperoleh dari PT Perkebunan Nusantara (PTPN) IV di PKS Adolina dengan kadar air rata-rata 35,32% dan kadar minyak 4,5%. Serat diambil dari keluaran alat dan mesin kempa yang terletak di stasiun pengepresan di PKS. Tabel 1 dan 2 menunjukkan karakteristik bahan bakar serat buah kelapa sawit yang telah dianalisis dengan metode proksimasi dan ultimasi. Analisis bahan bakar tersebut telah dilakukan di Pusat Penelitian Teknologi Mineral dan Batu Bara di Bandung.

Setup Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah reaktor pembakaran *fixed bed* yang dilengkapi dengan saluran udara primer dan udara sekunder. Laju aliran udara pembakaran yang melewati saluran udara primer dan sekunder diukur dengan alat digital anemometer merk Kanomax model 6701. Suhu pembakaran reaktor yang berjumlah 9, diukur dengan termometer jenis K yang dapat mengukur suhu hingga 1.370°C. Termometer tersebut kemudian dihubungkan dengan piranti pemasukan data secara otomatis merk Graphtec tipe midi Logger GL800.

Timbangan yang digunakan untuk pengukuran massa serat buah kelapa sawit bermerek *Lion Star* dengan beban maksimum adalah 4,95 kg dan ketelitian 25 gr. Untuk mengukur jumlah emisi gas

buang yang dihasilkan dari setiap kali eksperimen pembakaran serat buah kelapa sawit digunakan alat pengukur konsentrasi gas secara otomatis merk Kane May tipe 9106. Sebelum digunakan, alat pengukur gas diatur ulang konstantanya sesuai buku petunjuk penggunaan terutama dalam penentuan konstanta K1g, K1n, K2, K3 dan K4 untuk analisa bahan bakar berbasis biomasa.

Tabel 1. Hasil analisis proksimasi serat buah kelapa sawit.

Komponen	Massa (%) d.b
Kandungan air	9,35
Volatile matter	71,47
Fixed Carbon	31
Abu	3,87
Nilai Kalor Tinggi	4.278 (Cal/gr)

Tabel 2. Hasil analisis ultimasi serat buah kelapa sawit.

Komponen	Massa (%) d.b
Karbon (C)	44,97
Hidrogen (H)	6,99
Nitrogen (N)	0,45
Sulfur (S)	0,14
Oksigen (O)	43,58

Penentuan Karakteristik Pembakaran

Karakterisasi proses pembakaran serat buah kelapa sawit dilakukan dengan cara dekomposisi termal. Proses dekomposisi termal untuk mengetahui karakteristik pembakaran serat dilakukan secara *thermogravimetry* (TGA) dengan laju pemanasan 5°C/menit dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Alat TGA yang digunakan untuk proses dekomposisi termal adalah METTLER TOLEDO TGA tipe DSC-1. Seperti diketahui bahwa proses pembakaran merupakan reaksi eksotermal, dimana ketika proses oksidasi tersebut berlangsung akan mengeluarkan sejumlah energi atau menghasilkan sejumlah kalor dengan suhu panas tertentu, kemudian energi tersebut digunakan untuk proses pembakaran secara simultan. Seperti diketahui bahwa suhu pembakaran sangat mempengaruhi laju reaksi proses pembakaran. Oleh karena itu, dalam penelitian ini juga akan dicari hubungan antara suhu

pembakaran di dalam reaktor berdasarkan rasio pengaturan udara pembakaran dengan laju reaksi pembakaran. Berdasarkan pengalaman empiris, untuk menentukan laju reaksi pembakaran dapat ditentukan dengan persamaan Arrhenius;

$$\frac{dY}{dt} = Ae^{-E/RT} \dots\dots\dots(1)$$

Di mana;

- Y : Fraksi massa = m(t)/mi
- mi : Massa awal
- m(t) : Perubahan massa terhadap waktu
- dY : Penurunan fraksi massa
- dt : Perubahan waktu (dt)
- A : Faktor pre-eksponensial (%/s)
- e : Bilangan natural (2,72)
- E : Energi aktivasi bahan (J/mol)
- R : Konstanta gas (8,31 J/mol K)
- T : Suhu pembakaran (K)

Data hasil analisis TGA juga akan digunakan untuk menentukan energi aktivasi (E) proses pembakaran serat buah kelapa sawit. Energi aktivasi dalam proses pembakaran biomassa (pers.1) selanjutnya dapat diubah menjadi;

$$\ln \frac{dY}{dt} = \ln A - \frac{E}{RT} \dots\dots\dots(2)$$

Data yang diperoleh dari hasil TGA kemudian dibuat hubungan antara dY/dt dan 1/T. Persamaan linier yang diperoleh dari hubungan ln [dY/dt] dan 1/T tersebut dimasukkan ke dalam persamaan (2), sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut;

$$y = ax - c \rightarrow \ln \frac{dY}{dt} = - \frac{E}{R} \frac{1}{T} - \frac{\ln A}{c} \dots\dots\dots(3)$$

Dengan demikian energi aktivasi dapat diperoleh dari persamaan berikut ini;

$$E = -aR \dots\dots\dots(4)$$



Sementara itu nilai faktor pre-eksponensial (A) diperoleh dengan cara meneruskan grafik $y = ax - c$ hingga memotong sumbu y atau ($1/T = 0$), dimana;

$$\ln \frac{dY}{dt} = \ln A - \frac{E}{RT} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$A = \frac{dY}{dt} \Big|_{\frac{1}{T}=0} \quad \dots\dots\dots(6)$$

Penentuan Udara Pembakaran

Udara pembakaran yang diperlukan untuk proses oksidasi serat buah kelapa sawit dibedakan menjadi dua, yaitu udara pembakaran teoritis dan udara pembakaran aktual. Penentuan udara pembakaran teoritis dihitung berdasarkan kandungan senyawa pembentuk bahan bakar dengan persamaan berikut (Djokosetyardjo, 2003);

$$U_{og} = \frac{100}{23,1} \times (2,67C + 8H - O + S) \quad \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:

- U_{og} : Udara pembakaran teoritis (%)
- C : Jumlah karbon di dalam serat buah kelapa sawit (%)
- H : Jumlah Hidrogen di dalam serat buah kelapa sawit (%)
- O : Jumlah Oksigen di dalam serat buah kelapa sawit (%)
- S : Jumlah Sulfur di dalam serat buah kelapa sawit (%)

Berdasarkan hasil perhitungan diketahui bahwa jumlah udara pembakaran teoritis yang diperlukan untuk oksidasi bahan bakar dengan mempertimbangkan jumlah senyawa pembentuk serat buah kelapa sawit adalah 5,74 kg udara/kg bahan bakar. Pada saat eksperimental digunakan serat buah kelapa sawit sebanyak 2,20 kg, sehingga total kebutuhan udara pembakaran teoritis sekitar 12,63 kg. Dengan mempertimbangkan densitas udara berdasarkan suhu udara luar maka jumlah laju aliran volumetrik massa udara pembakaran sekitar 11,15 m³/h.

Setelah diketahui jumlah udara pembakaran teoritis, tahap berikutnya adalah proses pembakaran serat buah kelapa sawit sebanyak 2,20 kg dengan laju aliran volumetrik udara pembakaran 11,15 m³/h pada reaktor pembakaran *fixed bed*. Selama proses pembakaran berlangsung, dilakukan pengambilan data emisi terutama unsur oksigen yang terdapat di dalam gas buang (O_{2,m}) dengan menggunakan pengukur gas sebanyak 6 kali. Hasil pengukuran emisi gas O_{2,m} tersebut digunakan sebagai dasar penentuan penambahan udara berlebih (*excess air*, EA) pada reaktor pembakaran *fixed bed* yang dihitung dengan persamaan berikut (Keison, 2007);

$$EA = \left[\frac{20,9\%}{20,9\% - O_{2,m}\%} - 1 \right] \times 100\% \quad \dots\dots\dots (8)$$

Berdasarkan hasil proses pembakaran bahan bakar serat buah kelapa sawit diketahui jumlah O₂ yang terdapat di dalam emisi gas buang (O_{2,m}) sekitar 19,8%, sehingga jumlah EA yang ditambahkan ke dalam udara pembakaran sebanyak 18% dari udara pembakaran teoritis (11,15 m³/h) atau sekitar 2,007 m³/h. Dengan demikian untuk oksidasi bahan bakar sebanyak 2,20 kg dibutuhkan udara sekitar 14,89 kg dengan laju aliran massa udara sekitar 13,16 m³/h. Dengan mempertimbangkan rasio bahan bakar dan udara, maka nilai rasio udara bahan bakar (*air fuel ratio*, AFR) pembakaran bahan bakar serat buah kelapa sawit adalah 1/6,77 atau 15%.

Penentuan Efisiensi Pembakaran

Untuk menentukan efisiensi pembakaran dilakukan dengan mempertimbangkan faktor kehilangan kalor pada gas buang kering (*dry flue gas loss*) dan faktor kehilangan kalor pada gas buang basah (*wet loss*). Dimana, faktor kehilangan kalor pada gas buang kering ditentukan oleh parameter nilai kalor rendah bahan bakar (*Low Heating Value*), kadar CO₂ teoritis, kadar oksigen di dalam gas buang dan suhu gas buang. Sementara itu, faktor kehilangan kalor pada gas buang basah (*wet loss*) ditentukan oleh parameter kerugian panas akibat kandungan air dan suhu gas buang (UNEP, 2006).

Tabel 3. Rancangan penelitian.

Variabel Bebas	Rasio Antara PA : SA (%)				
	(80:20)	(65:35)	(50:50)	(35:65)	(20:80)
Karbon dioksida (CO ₂)	CO ₂ (80:20)	CO ₂ (65:35)	CO ₂ (50:50)	CO ₂ (35:65)	CO ₂ (20:80)
Oksigen (O ₂ m)	O ₂ (80:20)	O ₂ (65:35)	O ₂ (50:50)	O ₂ (35:65)	O ₂ (20:80)
Suhu Pembakaran (RT)	RT (80:20)	RT (65:35)	RT (50:50)	RT (35:65)	RT (20:80)
Efisiensi Pembakaran (EP)	EP (80:20)	EP (65:35)	EP (50:50)	EP (35:65)	EP (20:80)

Penentuan jumlah kehilangan bahan bakar yang ikut keluar bersama emisi gas buang dan efisiensi pembakaran dapat dihitung dengan persamaan 3 dan 4 berikut (Keison: 2007);

$$U_{ff} = \left[\frac{65 \times CO\%}{CO\% + CO_2\%} - 1 \right] \dots\dots (3)$$

Keterangan:

- U_{ff} : Kehilangan bahan bakar tak terbakar (%)
- CO : Jumlah karbon monoksida di gas buang (%)
- CO₂ : Jumlah karbon dioksida di gas buang (%)

$$G_f = 100 - \frac{20,9 \times K1g \times (T_{net})}{K2 \times (20,9 - \%O_2m)} + \dots\dots (4)$$

$$(K3 \times (1 + 0,001 \times T_{net}))$$

Keterangan:

- G_f : Efisiensi bruto (%)
- K1g : Konstanta nilai kalor bahan basis perhitungan LHV
- K2 : Jumlah karbon dioksida teoritis (CO₂ max) (%)
- K3 : Kerugian panas akibat kandungan air (%)
- T_{net} : Suhu gas buang – suhu udara masuk

Disain Penelitian

Kegiatan eksperimen dilakukan ber-dasarkan rancangan penelitian seperti disajikan pada Tabel 3. Setiap perlakuan dilakukan 2 kali replikasi pengambilan data.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Pembakaran Serat Buah Kelapa Sawit (Mesocarp)

Analisis *thermogravimetry* (TGA) digunakan untuk mengamati karakteristik degradasi material melalui dekomposisi termal. Analisis tersebut didasarkan pada pengukuran kehilangan massa material yang merupakan fungsi dari suhu. Analisis TGA menunjukkan perubahan massa awal yang diperlihatkan oleh suatu grafik secara kontinyu yang diperoleh ketika suatu substansi (materi) dipanaskan secara seragam dalam suatu reaktor pembakaran sesuai laju pemanasan yang diberikan oleh tungku pembakaran dengan suhu yang dijaga agar tetap konstan mengikuti pengaturan suhu.

Pada kegiatan riset ini, kenaikan suhu pada reaktor TGA diatur secara konstan pada kondisi laju pemanasan (*heat flow*) 5°C/menit. Proses dekomposisi termal biomassa sawit dengan menggunakan metode TGA, pada dasarnya sama dengan proses pembakaran yang terjadi pada bahan bakar padat yang mengikuti aturan zona pengeringan, devolatilisasi, pembakaran dan pembentukan abu. Pada kegiatan eksperimen ini, jumlah bahan bakar serat buah sawit yang didekomposisi memiliki massa awal 4,20 mg dan suhu kamar reaktor 20°C.

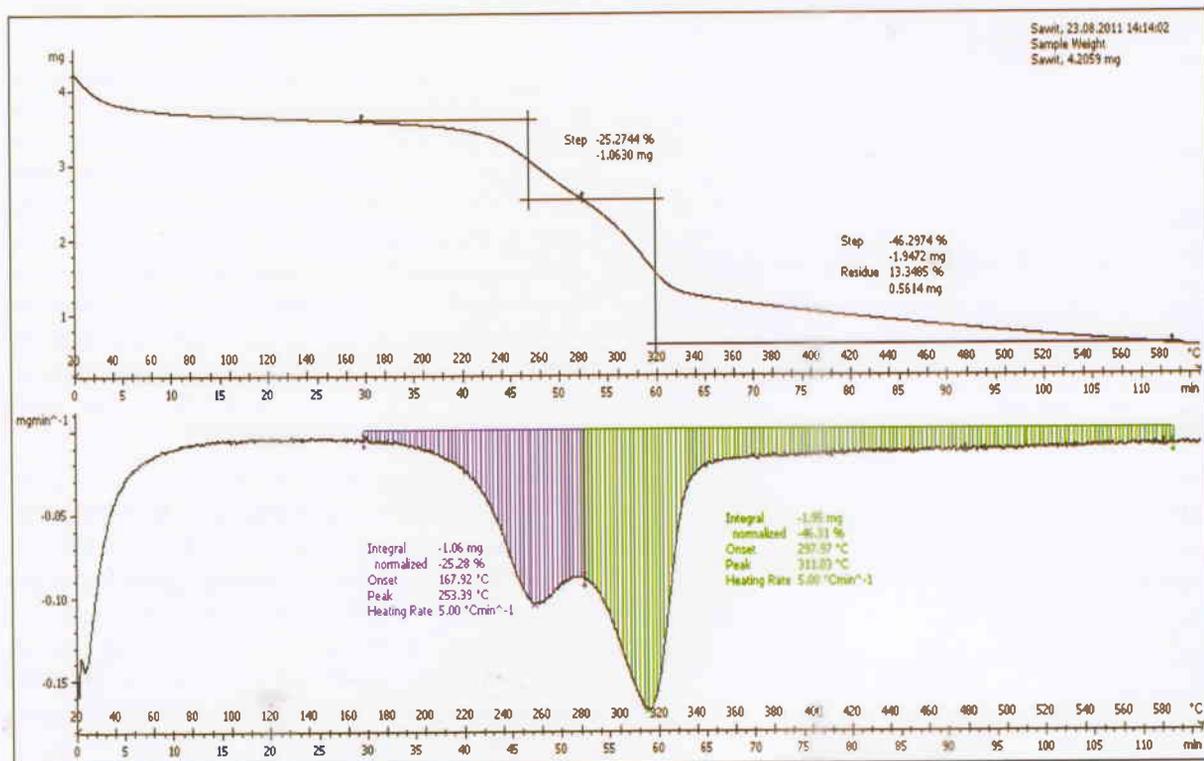
Gambar 1 menunjukkan grafik karakteristik pembakaran serat buah kelapa sawit melalui proses dekomposisi termal. Proses pembakaran tersebut diawali dengan tahap pengeringan yang ditunjukkan oleh garis kurva pada sumbu absis sebelah kiri. Dimana, garis kurva bagian atas merupakan laju degradasi massa serat buah kelapa sawit yang cenderung bergerak turun ke kanan mengikuti

kenaikan suhu pembakaran yang diatur secara bertahap pada laju pemanasan 5°C/menit. Pada kondisi tersebut laju pergerakan degradasi massa bahan bakar terjadi secara lambat pada suhu pengeringan (*drying*) mencapai 167,92°C dengan penurunan massa sebesar 15,08%. Proses *drying* bahan bakar serat buah kelapa sawit yang memiliki kadar air sekitar 35,32% tersebut membutuhkan waktu sekitar 29 menit.

Tahap berikutnya adalah proses devolatilisasi atau pelepasan unsur-unsur pembentuk bahan bakar yang mudah menguap (*volatile*). Karena sifatnya yang mudah menguap apabila bersinggungan dengan suhu

yang relatif tinggi maka proses tersebut berlangsung secara cepat dengan diikuti laju penurunan massa yang sangat cepat. Proses devolatilisasi terjadi setelah proses pengeringan yang dimulai pada suhu 167,92°C dan berakhir pada suhu 297,97°C dengan penurunan massa hingga mencapai 25,27 % dan lama waktu proses sekitar 23 menit (akhir proses devolatilisasi pada periode waktu 52 menit).

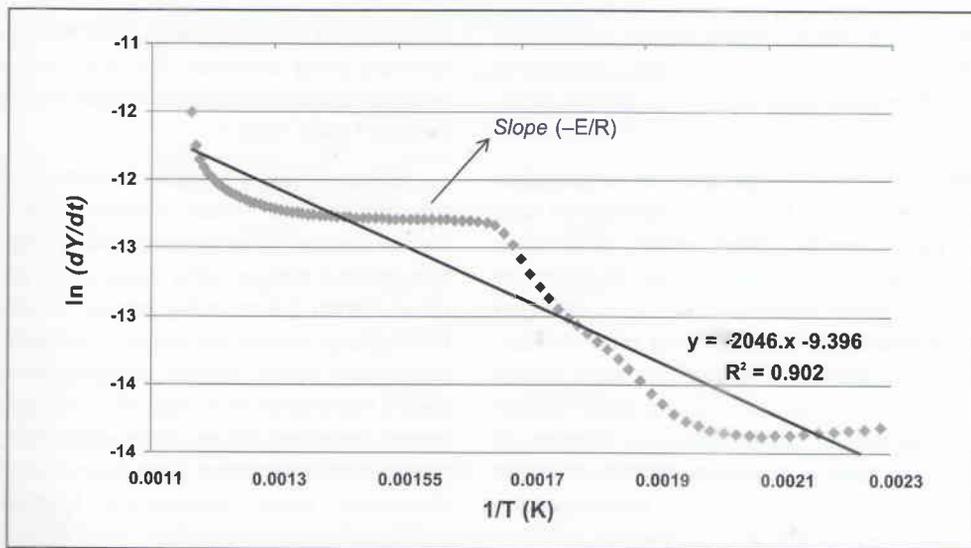
Setelah proses devolatilisasi, dekomposisi bahan bakar serat buah kelapa sawit dilanjutkan dengan proses pembakaran arang. Zona pembakaran arang ditandai dengan kelanjutan penurunan massa setelah berakhirnya proses devolatilisasi. Proses pembakaran



Gambar 1. Grafik dekomposisi termal mesocarp dengan metode TGA.

Tabel 4. Laju penurunan massa mesocarp berdasarkan zona, waktu dan suhu pirolisis.

Zona	Tserat (°C)	Tserat (K)	dY/dt (mg/s)	1/T (1/K)	ln (dY/dt) (mg/s)	E (kJ/mol)	A (mg/s)
<i>Drying</i>	167,92	441	0,0057	0,0023	-13,82		
<i>Devolatilisasi</i>	297,97	571	0,1140	0,0018	-12,91	17	9,40
<i>Char Burning</i>	311,03	584	0,1560	0,0017	-12,67		



Gambar 2. Hubungan antara $\ln [dY/dt]$ dengan $1/T$.

arang berlangsung pada suhu 297,97°C hingga 600°C dengan penurunan massa sebesar 46,30% dan lama waktu proses sekitar 63 menit (berakhir pada menit ke 115). Akhir dari proses dekomposisi termal ini akan menyisakan residu sebesar 13,35%.

Berdasarkan hasil pengamatan karakteristik pembakaran pada bahan bakar ampas serat buah kelapa sawit dengan metode TGA, diketahui bahwa temperatur awal pembakaran pada unsur mudah menguap atau suhu awal devolatilisasi (*Initiation Temperature Volatile Matter*, ITVM) adalah 167,92°C. ITVM merupakan besarnya suhu pembakaran, dimana massa sampel uji mulai berkurang secara drastis. Pada pengujian ini ITVM berlangsung hingga suhu mencapai 299,97°C. Sementara itu, suhu pembakaran paling tinggi atau *peak temperature* (PT) dibedakan menjadi dua, yaitu zona devolatilisasi dan pembakaran arang. PT merupakan besarnya suhu ruang bakar yang menghasilkan laju penurunan massa sampel uji terbesar. PT pada zona devolatilisasi adalah 253,39°C dengan jumlah pengurangan massa 1,06 mg atau sebesar 25,27%. PT pada zona pembakaran arang adalah 311,03°C dengan jumlah pengurangan massa 1,95 mg atau sebesar 46,30% dan laju penurunan massa sampel uji terbesar adalah 0,17 mg/menit.

Dengan memasukkan nilai hasil pengujian TGA serat sawit ke dalam persamaan Arrhenius, maka akan diperoleh energi aktivasi dari proses pembakaran

serat buah kelapa sawit. Hubungan antara $\ln [dY/dt]$ dengan $1/T$ dari hasil analisis TGA akan membentuk suatu garis linier. Dimana, garis miring (*slope*) yang dihasilkan dari hubungan keduanya tersebut adalah energi aktivasi dari proses pembakaran serat buah sawit. Adapun jumlah energi aktivasi yang dibagi ke dalam tiga zona pembakaran disajikan pada Tabel 4.

Energi aktivasi (E) merupakan perkalian antara gradien dari linieritas dengan konstanta gas ($R=8,31$ J/mol). Untuk menentukan faktor pre-eksponensial dapat dicari dengan cara meneruskan garis linieritas (*slope*) hingga memotong sumbu ordinat ($1/T=0$).

Berdasarkan data hasil TGA diperoleh informasi bahwa nilai energi aktivasi (E) dari proses pembakaran serat buah kelapa sawit adalah 17 kJ/molK dan nilai faktor pre-eksponensialnya (A) adalah 9,40 mg/s. Dengan diketahuinya energi aktivasi dan faktor pre-eksponensialnya maka laju reaksi pembakaran serat buah sawit (*mesocarp*) dapat dirumuskan menjadi;

$$\frac{dY}{dt} = 9,40e^{-\frac{17}{RT}} \text{ (mg/s)} \quad \dots\dots\dots (11)$$

Nilai energi aktivasi pirolisis serat buah kelapa sawit ($E = 17$ kJ/mol) relatif jauh lebih rendah dibandingkan energi aktivasi untuk bahan bakar biomasa lain. Hasil penelitian sampah pertanian (Himawanto, 2011) menunjukkan bahwa energi aktivasi bahan organik sampah bambu dan sampah daun adalah 52,60 dan

49,06 kJ/mol. Sementara itu, energi aktivasi sekam padi IR 64 sekitar 41,24 kJ/mol (Suyitno, 2009) dan energi aktivasi untuk biomassa kayu 103 kJ/mol (Branca *et al.*, 2005).

Rendahnya energi aktivasi pada proses pirolisis serat buah kelapa sawit diduga kuat selain dipengaruhi oleh teksturnya yang memiliki serat relatif lunak juga dikarenakan ukurannya yang relatif pendek dibandingkan biomassa lainnya seperti sekam padi dan kayu, sehingga mudah terdekomposisi pada suhu yang relatif rendah. Dengan sifat fisik seperti itu, proses propagasi radiasi termal ketika proses oksidasi berlangsung dapat dengan mudah ditransferkan ke serat sekitarnya. Kondisi ini diperkuat dengan hasil riset peneliti lainnya, di mana semakin tinggi densitas biomassa maka kecenderungan energi aktivasinya juga relatif lebih tinggi (Suyitno, 2009).

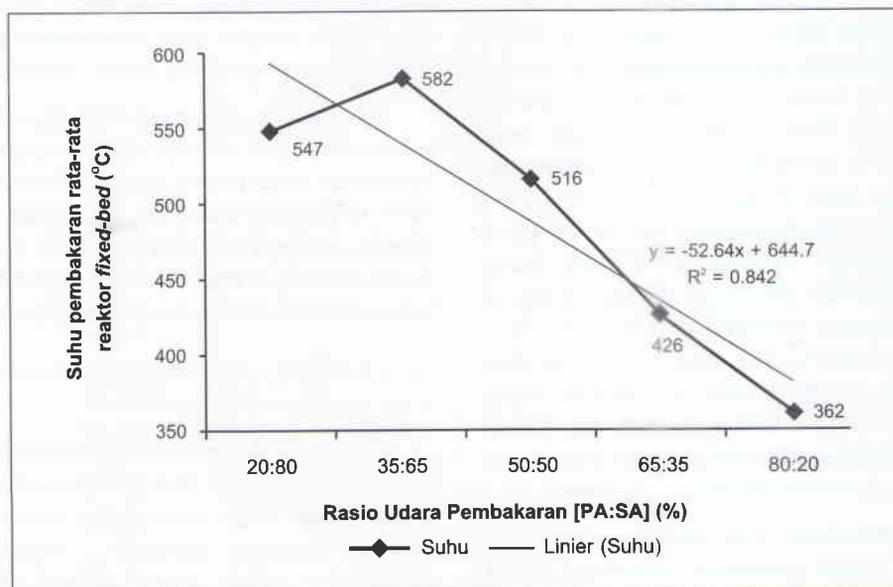
Pengaruh Rasio Udara Pembakaran Antara Udara Primer dan Udara Sekunder Terhadap Suhu Pembakaran

Gambar 3 menunjukkan pengaruh jumlah rasio udara pembakaran antara PA dan SA terhadap suhu pembakaran di dalam reaktor pembakaran *fixed bed*. Data suhu pembakaran yang disajikan pada Gambar 3, merupakan data suhu rata-rata pembakaran yang diperoleh dari pengukuran 9 termometer yang berada di dalam reaktor pembakaran *fixed bed*. Dimana, suhu

pembakaran tersebut merupakan suhu pembakaran rata-rata yang diperoleh dari hasil pengolahan data analisis deskriptif pada berbagai perlakuan seperti disajikan pada Tabel 5.

Sebagaimana diketahui bahwa pembakaran merupakan suatu proses oksidasi cepat bahan bakar disertai dengan pelepasan sejumlah panas dan cahaya. Bila terdapat oksigen yang cukup untuk proses oksidasi unsur bahan bakar maka proses pembakaran dapat berlangsung secara sempurna. Sejumlah panas yang dilepaskan ketika proses pembakaran berlangsung, secara menyeluruh akan digunakan lagi untuk membantu proses degradasi bahan bakar untuk keperluan proses pembakaran selanjutnya. Oleh karena itu, panas sangat diperlukan untuk mendukung kontinuitas proses pembakaran secara simultan. Hal ini tentunya sejalan dengan pernyataan yang dikemukakan oleh Culp (1991) bahwa salah satu syarat utama agar terjadi pembakaran yang sempurna adalah tersedianya panas yang cukup.

Fungsi panas pada proses pembakaran bahan bakar padat adalah untuk melakukan dekomposisi secara cepat unsur-unsur kimia pembentuk bahan bakar menjadi gas sebelum dioksidasi. Proses dekomposisi tersebut pada prinsipnya adalah untuk memudahkan partikel zat pembentuk bahan bakar agar lebih cepat bertransformasi menjadi fase gas sehingga proses pembakaran dapat berlangsung dengan baik.



Gambar 3. Hubungan antara rasio udara pembakaran terhadap suhu pembakaran.

Tabel 5. Pengolahan data hasil uji analisis deskriptif suhu pembakaran.

Rasio	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
80:20	181	547,1796	262,15087	19,48552	508,7301	585,6290	29,55	789,65
65:35	181	582,2108	277,86292	20,65339	541,4569	622,9647	39,30	950,45
50:50	181	516,4569	287,38624	21,36125	474,3062	558,6076	35,60	959,05
35:65	181	426,1047	270,46787	20,10372	386,4354	465,7740	30,40	915,85
20:80	181	362,0047	258,65208	19,22546	324,0684	399,9410	37,25	900,60
Total	905	486,7913	282,79577	9,40045	468,3421	505,2406	29,55	959,05

Tabel 6. Pengolahan data hasil uji one way-anova suhu pembakaran.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	5,952E+06	4	1,488E+06	20,187	0,000
Within Groups	6,634E+07	900	73715,098		
Total	7,230E+07	904			

Berdasarkan hasil eksperimen diketahui bahwa suhu pembakaran paling tinggi terdapat pada rasio udara (PA:SA) 35:65 dengan suhu sekitar 582°C dan paling rendah pada rasio udara (PA:SA) 80:20 dengan suhu pembakaran sekitar 362°C. Untuk mengetahui taraf signifikansi pengaruh variasi rasio pengaturan jumlah persentase udara pembakaran antara PA dan SA terhadap suhu pembakaran pada tiap kelompok uji, maka perlu dilakukan uji analisis varian dengan metode uji anova satu jalan (*One Way Anova*). Hasil pengolahan data uji anova satu jalan pada suhu pembakaran tersebut disajikan seperti tampak pada Tabel 6. Hasil uji anova satu jalan pada suhu pembakaran yang telah dilakukan mengindikasikan bahwa uji-F cukup signifikan pada kelompok uji. Hal ini ditunjukkan oleh nilai F_{hitung} sebesar 20,183 lebih tinggi dari pada $F_{(4,900)}$ sebesar 2,38 ($F_{hitung} > F_{tabel}$). Kondisi tersebut juga diperkuat dengan nilai $p = 0,000$ lebih rendah dari pada nilai kritik $\alpha = 0,05$.

Dari hasil uji anova satu jalan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pengaturan jumlah rasio udara pembakaran antara PA dan SA di reaktor pembakaran mempunyai pengaruh cukup

signifikan terhadap suhu pembakaran yang dihasilkan selama proses pembakaran berlangsung. Hal ini juga diperkuat dengan hasil analisis regresi linier yang menunjukkan bahwa nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,842. Ini artinya bahwa, ada korelasi yang sangat kuat pengaturan jumlah rasio udara pembakaran antara PA dan SA terhadap jumlah suhu pembakaran yang dilepaskan dari proses pembakaran serat buah kelapa sawit di dalam reaktor pembakaran. Di mana, semakin rendah rasio PA:SA maka semakin tinggi suhu pembakaran di dalam reaktor.

Kenaikan suhu di dalam reaktor pembakaran menyebabkan energi kinetik partikel zat pembentuk bahan bakar bertambah besar sehingga partikel bahan bakar yang terdekomposisi pada suhu tinggi bergerak lebih cepat dibanding pada suhu rendah. Kondisi ini menyebabkan terjadinya tumbukan yang semakin besar antara partikel zat pembentuk bahan bakar dengan oksidator. Ini artinya bahwa semakin tinggi suhu reaksi, maka kecepatan reaksi juga akan semakin meningkat dan hal ini sesuai dengan teori Arrhenius.

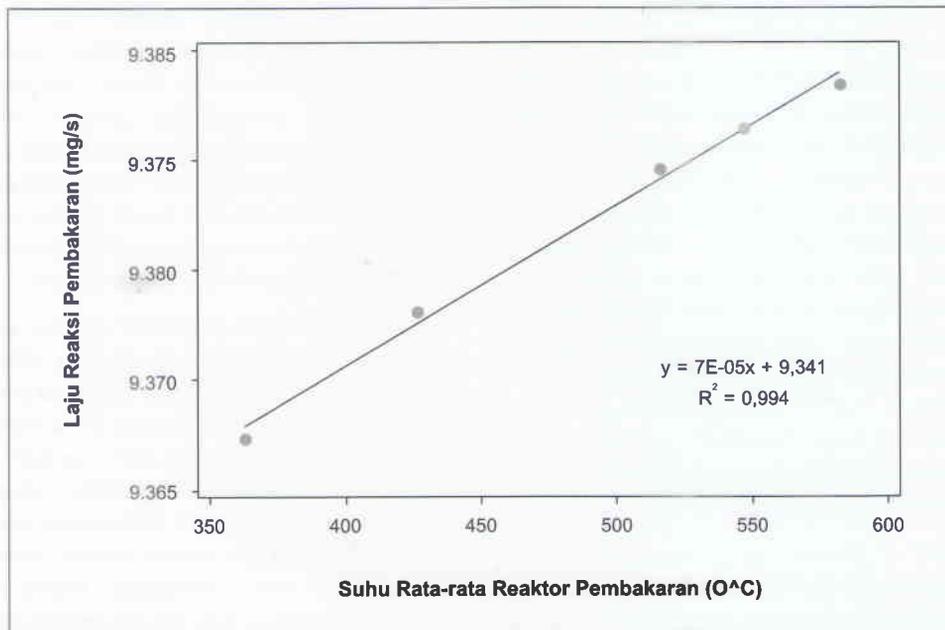
Tabel 7. Laju reaksi pembakaran berdasarkan suhu pembakaran di reaktor.

Rasio Udara Pembakaran (PA:SA)	Suhu Pembakaran		Laju Reaksi (k) (mg/s)
	(°C)	(K)	
20:80	547	820	9,3815
35:65	582	855	9,3834
50:50	516	790	9,3796
65:35	426	699	9,3731
80:20	362	635	9,3674

Apabila suhu pembakaran rata-rata di dalam reaktor pembakaran dihubungkan dengan kecepatan laju reaksi pembakaran dari Persamaan 11, maka akan diperoleh laju reaksi pembakaran yang bervariasi seperti disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7 menunjukkan data hasil eksperimen pengaruh jumlah rasio udara pembakaran antara PA dan SA terhadap suhu di dalam reaktor pembakaran dan laju reaksi pembakaran serat buah kelapa sawit. Sementara itu, Gambar 4 menunjukkan hubungan antara suhu di dalam reaktor pembakaran dengan laju reaksi pembakaran serat buah kelapa sawit. Dimana, hubungan antara variabel suhu di dalam reaktor

pembakaran dengan laju reaksi pembakaran serat sawit sangat erat korelasinya. Hal ini juga diperkuat dengan hasil analisis regresi linier yang menunjukkan bahwa nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,994. Ini artinya, terdapat korelasi yang sangat kuat bahwa suhu mempunyai peranan yang penting dalam meningkatkan laju reaksi proses pembakaran serat buah kelapa sawit. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pengaturan jumlah rasio udara pembakaran antara PA dan SA juga akan mempengaruhi laju reaksi pembakaran serat buah kelapa sawit. Di mana, semakin rendah rasio antara PA:SA maka laju reaksi pembakaran juga akan semakin cepat.



Gambar 4. Hubungan antara suhu pembakaran dengan laju reaksi.

Pengaruh Rasio Udara Pembakaran Antara Udara Primer dan Udara Sekunder Terhadap Efisiensi Pembakaran

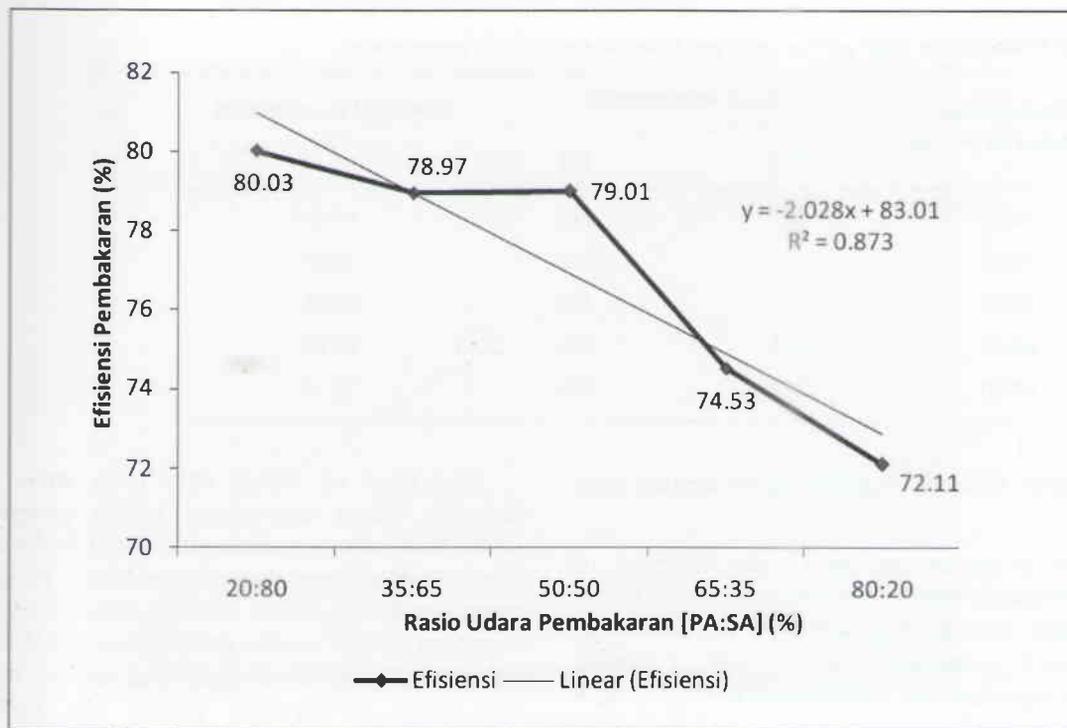
Gambar 5 menunjukkan pengaruh rasio udara pembakaran antara PA dan SA terhadap efisiensi proses pembakaran serat buah kelapa sawit. Data yang disajikan pada Gambar 5 tersebut diperoleh dari hasil pengukuran emisi gas buang dengan menggunakan pengukur emisi gas otomatis pada saat kegiatan eksperimen dilakukan. Nilai efisiensi pembakaran yang didapat pada Gambar 5 merupakan nilai rata-rata hasil pengolahan data uji analisis deskriptif pada berbagai perlakuan seperti disajikan pada Tabel 8.

Efisiensi pembakaran mengindikasikan kemampuan suatu proses pembakaran untuk dapat melakukan oksidasi bahan bakar secara menyeluruh dengan tingkat keberhasilannya diukur melalui jumlah kehilangan kalor terdapat di dalam gas buang. Basis penentuan efisiensi pembakaran dalam penelitian ini menggunakan dasar perhitungan efisiensi pembakaran bruto (*gross efficiency*). Di mana, efisiensi pembakaran bruto tersebut telah mempertimbangkan unsur kehilangan panas yang ikut

keluar bersama gas buang (*dry flue gas loss*) dan faktor kehilangan panas dari kadar air yang terdapat di dalam bahan bakar (*wet loss*). Secara mendasar, perbedaan nilai antara efisiensi pembakaran bruto dan nilai efisiensi pembakaran bersih (*net efficiency*) lebih tinggi efisiensi pembakaran bersih sekitar 8% dari pada efisiensi pembakaran bruto (Keison, 2007). Oleh karena itu, dasar penentuan efisiensi pembakaran dalam penelitian ini menggunakan efisiensi pembakaran bruto karena telah mempertimbangkan faktor kehilangan panas dari gas buang dan kehilangan panas dari kadar air di dalam bahan bakar.

Berdasarkan hasil eksperimen diketahui bahwa efisiensi pembakaran paling tinggi terletak pada rasio udara (PA:SA) 20:80 dengan nilai sekitar 80,03% dan paling rendah pada rasio udara (PA:SA) 80:20 dengan jumlah efisiensi pembakaran sekitar 72,11%.

Untuk mengetahui taraf signifikansi pengaruh jumlah rasio persentase udara pembakaran antara PA dan SA terhadap efisiensi pembakaran pada tiap kelompok uji, maka perlu dilakukan analisis varian dengan metode uji anova satu jalan (*One Way Anova*). Hasil pengolahan data uji anova satu jalan efisiensi



Gambar 5. Hubungan antara rasio udara pembakaran terhadap efisiensi bruto.

Tabel 8. Data hasil uji analisis deskriptif efisiensi pembakaran bruto.

Rasio	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
20:80	12	80,0317	2,02086	0,58337	78,7477	81,3157	77,09	82,88
35:65	12	78,9725	2,98295	0,86110	77,0772	80,8678	74,38	84,25
50:50	12	79,0075	4,04894	1,16883	76,4349	81,5801	72,60	83,71
65:35	12	74,5300	8,69798	2,51089	69,0036	80,0564	56,42	83,11
80:20	12	72,1108	11,00740	3,17756	65,1171	79,1046	56,29	83,50
Total	60	76,9305	7,19374	0,92871	75,0722	78,7888	56,29	84,25

Tabel 9. Data hasil uji *one way-anova* efisiensi pembakaran bruto.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
<i>Between Groups</i>	565,110	4	141,278	3,123	0,022
<i>Within Groups</i>	2488,130	55	45,239		
Total	3053,240	59			

Tabel 10. Efisiensi dan suhu pembakaran berdasarkan rasio udara pembakaran.

Rasio Udara Pembakaran (PA:SA)	Suhu Pembakaran		Efisiensi Pembakaran (%)
	(°C)	(K)	
20:80	547	820	80,03
35:65	582	855	78,97
50:50	516	790	79,01
65:35	426	699	74,53
80:20	362	635	72,11

pembakaran tersebut disajikan seperti tampak pada Tabel 9.

Hasil uji anova satu jalan pada kelompok uji mengindikasikan bahwa uji-F cukup signifikan. Hal ini ditunjukkan oleh nilai F_{hitung} sebesar 3,123 lebih tinggi dari pada $F_{(4;55)}$ sebesar 2,54 ($F_{hitung} > F_{tabel}$). Kondisi tersebut juga diperkuat dengan nilai $p = 0,022$ lebih rendah dari pada nilai kritik $\alpha = 0,05$.

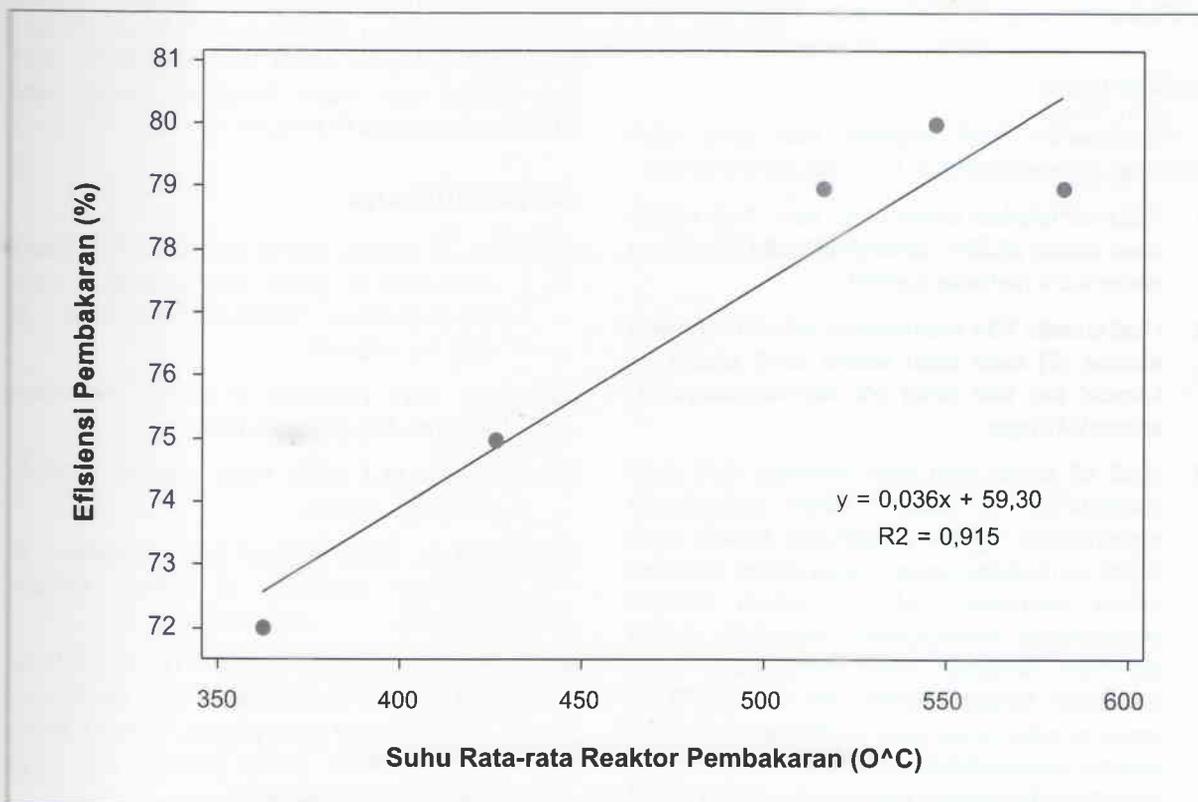
Dari hasil uji anova satu jalan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pengaturan jumlah rasio udara pembakaran antara PA dan SA di dalam reaktor pembakaran mempunyai pengaruh cukup signifikan terhadap efisiensi pembakaran yang dihasilkan selama proses pembakaran berlangsung. Hal ini juga diperkuat dengan hasil analisis regresi linier yang menunjukkan bahwa nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,873. Ini artinya bahwa, ada

korelasi yang sangat kuat pengaturan jumlah rasio udara pembakaran antara PA dan SA terhadap efisiensi pembakaran selama proses pembakaran serat buah kelapa sawit berlangsung. Di mana, semakin rendah rasio PA:SA maka semakin tinggi efisiensi pembakaran di dalam reaktor.

Tabel 10 menunjukkan data hasil eksperimen pengaruh jumlah rasio udara pembakaran antara PA dan SA terhadap suhu di dalam reaktor pembakaran dan efisiensi pembakaran serat buah kelapa sawit. Sementara itu, Gambar 6 memperlihatkan hubungan antara suhu pembakaran rata-rata di dalam reaktor pembakaran dengan efisiensi pembakaran, dimana terdapat korelasi yang kuat antara variabel suhu di dalam reaktor pembakaran dengan efisiensi pembakaran. Hal ini juga diperkuat dengan hasil analisis regresi linier yang menunjukkan bahwa nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,915. Ini artinya, terdapat korelasi yang sangat kuat bahwa suhu mempunyai peranan yang penting dalam meningkatkan efisiensi pembakaran serat buah kelapa

sawit. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pengaturan jumlah rasio udara pembakaran antara PA dan SA juga akan mempengaruhi efisiensi pembakaran serat buah kelapa sawit. Di mana, semakin rendah rasio antara PA:SA maka efisiensi pembakaran akan mengalami peningkatan.

Efisiensi pembakaran mengindikasikan kemampuan suatu proses pembakaran untuk melakukan oksidasi bahan bakar secara menyeluruh dengan tingkat keberhasilan yang dapat diukur dari jumlah kehilangan kalor yang terdapat di dalam gas buang. Apabila proses pembakaran menghasilkan emisi gas buang yang masih dapat dibakar kembali (CO) dalam jumlah relatif banyak maka dapat dikatakan bahwa proses pembakaran tersebut memiliki efisiensi rendah. Hal ini mengingat bahwa gas CO merupakan gas yang masih dapat dioksidasi dan akan mengeluarkan sejumlah energi dalam bentuk panas (kalor) dengan akhir proses oksidasi yang akan merubah emisi CO menjadi gas CO_2 . Sedangkan proses pembakaran yang menghasilkan emisi gas



Gambar 6. Hubungan antara suhu pembakaran dengan efisiensi pembakaran.



buang CO dalam jumlah yang sangat rendah, dapat dikatakan bahwa proses pembakaran memiliki efisiensi yang tinggi karena kehilangan unsur karbon yang dapat dibakar kembali relatif rendah.

Proses pembakaran merupakan proses oksidasi komponen unsur pembentuk bahan bakar, dimana dalam proses pembakaran tentunya dibutuhkan pasokan oksigen dalam jumlah yang cukup untuk mengoksidasi seluruh komponen bahan bakar yang terdapat di dalam bahan bakar. Mengingat oksigen merupakan materi utama yang mengontrol reaksi pembakaran oleh karena itu jumlah pasokan oksigen yang diatur di dalam ruang pembakaran harus disesuaikan dengan jumlah bahan bakar agar terjadi keseimbangan dalam reaksinya.

Seperti diketahui bahwa proses oksidasi komponen bahan bakar akan melepaskan sejumlah energi dalam bentuk kalor (panas). Semakin baik kondisi proses pembakaran maka semakin besar pula energi yang dilepaskannya. Ini artinya bahwa suhu pembakaran yang ada di dalam ruang pembakaran dapat digunakan sebagai indikator dalam menentukan efisiensi pembakaran sebagaimana ditunjukkan Tabel 10.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kegiatan riset yang telah dilakukan dapat disimpulkan beberapa hal antara lain:

1. Kadar air rata-rata bahan bakar serat buah kelapa sawit sekitar 35,32%, sedangkan kadar minyaknya sekitar 4,5% (terhadap contoh).
2. Hasil analisis TGA menunjukkan bahwa nilai energi aktivasi (E) serat buah kelapa sawit adalah 17 kJ/molK dan nilai faktor pre-eksponensialnya (A) adalah 9,40 mg/s.
3. Hasil uji anova satu jalan terhadap data suhu pembakaran di dalam reaktor pembakaran menunjukkan bahwa pengaturan jumlah rasio udara pembakaran antara udara primer (PA) dan udara sekunder (SA) di dalam reaktor pembakaran mempunyai pengaruh cukup signifikan terhadap suhu pembakaran yang dihasilkan. Di mana, semakin rendah rasio PA:SA maka semakin tinggi suhu pembakaran di dalam reaktor. Namun demikian, kondisi tersebut hanya berlaku pada rentang rasio PA:SA antara 20:80 hingga 80:20 dan hasilnya kemungkinan akan

berbeda untuk kondisi di luar pengaturan seperti yang telah ditetapkan dalam kegiatan eksperimental ini, mengingat material biomasa yang digunakan dalam riset ini berbeda karakteristik.

4. Hasil uji anova satu jalan terhadap data efisiensi pembakaran menunjukkan bahwa, pengaturan jumlah rasio udara pembakaran antara udara primer (PA) dan udara sekunder (SA) di reaktor pembakaran mempunyai pengaruh cukup signifikan terhadap efisiensi pembakaran serat buah kelapa sawit. Di mana, semakin rendah rasio antara PA:SA maka efisiensi pembakaran akan mengalami kenaikan. Namun demikian, kondisi tersebut hanya berlaku pada rentang rasio PA:SA antara 20:80 hingga 80:20 dan hasilnya kemungkinan akan berbeda untuk kondisi di luar pengaturan seperti yang telah ditetapkan dalam kegiatan eksperimental ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini selain dibiayai oleh Badan Penelitian dan Pengembangan Departemen Pertanian RI yang bersumber dari dana APBN Program KKP3T 2009, juga dibiayai oleh Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS) dengan dana RUTIN 2011.

DAFTAR PUSTAKA

- Branca, C., A. Albano, and Di Blasi, C. 2005. Critical evaluation of global mechanisms of wood devolatilization. *Thermochimica Acta*, Vol 429, hal. 133-141.
- Culp, A.W. 1991. *Principles of energy conversion*. McGraw-Hill, Ltd. New York.
- Djokosetyardjo, M.J. 2003. *Ketel uap*. PT. Pradnya Paramita. Jakarta.
- Hallett, W.L.H. 2005. *Packed bed combustion an overview*. University of Ottawa. Ontario, Canada.
- Himawanto, D.W., Indarto, Saptoadi H., dan Rohmat, T.A. 2011. Karakteristik dan pendekatan kinetika global pada pirolisis lambat sampah kota terseleksi. *Jurnal Reaktor*, Vol. 13(3), Juni 2011, hal 140-147.

- Kelson.** 2007. Gas analyzer hand book of kane may 9106. P.O. Box 2124, Chelmsford, Essex, CM1 3UP, England.
- Santos.** de Souza, M.L. 2004. Solid fuels combustion and gasification. Marcel Dekker, Inc. New York.
- Suyitno.** 2009. Perumusan laju reaksi dan sifat-sifat pirolisis lambat sekam padi menggunakan metode analisis termogravimetri. Jurnal Teknik Mesin. 11 (1), April 2009, hal 12-18.
- TSI Incorporated.** 2004. Combustion analysis basics: an overview of measurements, methods and calculations used in combustion analysis. Printed in U.S.A.
- UNEP.** 2006. Fuels and combustion. United Nations Environment Programme (UNEP) UN Building Rajdamnern Avenue, Bangkok.