

Pengembangan Kalorimeter Api Untuk Karakterisasi Sifat Bakar Material

Yulianto Sulistyono Nugroho, Achmad Junaedi dan Gandjar Kiswanto

Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia,

Kampus UI Depok 16424 Indonesia

Tel. (021) 727 0032, Fax. (021) 727 0033

E-mail. yulianto@eng.ui.ac.id

Abstrak

Pengembangan kalorimeter api (Prototipe-1) yang telah dilengkapi dengan instalasi saluran gas buang, alat ukur laju aliran fluida dan peralatan analisis komposisi gas produk pembakaran, telah memungkinkan karakterisasi sifat bakar material (laju pelepasan kalor) dengan menerapkan prinsip pengukuran konsumsi oksigen. Dalam penelitian ini dipergunakan dua jenis kayu dengan variasi orientasi arah pemotongan, yaitu searah dan memotong serat kayu. Tingkat fluks kalor yang diberikan kepada sampel divariasikan antara 5 hingga 17 kW/m². Makalah ini mempresentasikan pengaruh jenis kayu dan fluks kalor terhadap waktu penyalaan, pola dan besaran laju penurunan massa, laju pelepasan kalor dan korelasi yang terbentuk. Hasil yang diperoleh selaras dengan hasil penelitian yang terdapat dalam literatur.

Kata kunci: Kalorimeter api, sifat bakar, material kayu, laju penurunan massa dan laju produksi kalor

Abstract

The development of a fire calorimeter (Prototype-1) equipped with an exhaust gas installation, a fluid flow rate measurement apparatus and a gas composition analyzer has enabled combustibility tests of materials (i.e. estimation of heat release rate) by means of oxygen consumption measurements. Two wood species, prepared with across and along grain orientations were used in this work. The incident heat flux levels were varied between 5 to 17 kW/m². This paper examines the effects of wood species and heat flux level on the time to ignition, mass loss rate, heat release rate and the correlation established. The outcomes are in good agreements with those reported in the literatures.

Keywords : Fire calorimeter, combustibility, wood material, mass loss rate and heat release rate

1. Pendahuluan

Pengetahuan mengenai tahapan terjadinya api, pelepasan kalor, pertumbuhan dan penyebaran api, serta produksi asap merupakan tahapan yang sangat penting dalam usaha pencegahan kebakaran serta usaha pemadaman api [1], [2]. Pada tahapan awal suatu kebakaran, jenis material dan jumlah isi bangunan adalah faktor yang sangat penting dan menentukan perkembangan api. Hingga saat ini, material kayu merupakan bahan bangunan dan bahan dasar untuk furnitur (isi bangunan) yang masih sangat luas penggunaannya. Namun

demikian sifat bakar kayu relatif lebih kompleks dibandingkan dengan material lain, mengingat sifat bakar material ini dapat dipengaruhi oleh terbentuknya lapisan arang (*char*) pada saat terbakar, jenis kayu, kandungan air, serta orientasi serat [3].

Pada suatu peristiwa kebakaran, laju pelepasan energi atau kalor (*heat release rate*) sebagai fungsi waktu merupakan parameter yang sangat penting untuk mengetahui karakteristik api yang terjadi [4], [5]. Parameter ini dapat memberikan gambaran mengenai besarnya api, laju pertumbuhan api, waktu yang tersedia untuk

upaya pemadaman api, waktu yang tersedia untuk evakuasi, dan produk hasil pembakaran yang dihasilkan [1], [4], [5].

Apabila dalam suatu sistem terjadi reaksi pembakaran, maka secara sederhana, besarnya laju pelepasan kalor, dapat dianalisis berdasarkan besarnya kehilangan kalor sensibel sistem dan dihitung menggunakan prinsip kesetimbangan energi. Namun, pada suatu kebakaran ruangan (*room fires*), teknik semacam ini sulit diterapkan karena akan banyak membutuhkan sensor dari berbagai jenis, dan pengukuran secara simultan [2].

Kemajuan dalam teknik pengukuran laju pelepasan kalor terjadi saat Huggett [4] mengukur laju pelepasan kalor berbagai bahan organik berdasarkan prinsip konsumsi oksigen. Pada penelitiannya Huggett melakukan dua pengukuran simultan, yaitu (i) pengukuran laju aliran volumetrik udara dan produk pembakaran, dan (ii) pengukuran konsentrasi oksigen pada saluran gas buang. Sebagai hasilnya diperoleh bahwa pembakaran bahan bakar organik akan menghasilkan laju pelepasan kalor sebesar 13,1 MJ per kilogram oksigen yang dikonsumsi, dengan tingkat akurasi $\pm 5\%$.

Pada penelitian terdahulu Nugroho, Y.S., dkk.[6], telah dilakukan penelitian pengaruh radiasi kalor pada karakteristik terbakarnya material kayu, menggunakan modul uji penyalaan (*ignitability test*) dari kalorimeter api yang tengah dikembangkan di Laboratorium Termodinamika Teknik DTM - FTUI. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pada saat terbakar, pola dan laju penurunan massa sampel dipengaruhi oleh jenis kayu dan terjadinya fenomena semburan api (*jetting*) akibat pelepasan zat terbang.

Pada saat ini prototipe awal kalorimeter api (Prototipe-1) yang dikembangkan di Laboratorium Termodinamika Teknik DTM - FTUI, telah dilengkapi dengan saluran gas buang, fan listrik, pelat orifis, dan peralatan analisis komposisi gas buang (Gas Analyzer), sehingga memungkinkan penerapan prinsip konsumsi oksigen dalam pengukuran laju pelepasan kalor. Penelitian ini bertujuan

untuk mempelajari sifat bakar material (khususnya kayu) seperti waktu penyalaan, laju pelepasan kalor dan korelasi antara laju pelepasan kalor, yang diukur berdasarkan prinsip konsumsi oksigen, dengan laju penurunan massa sampel yang terjadi.

2. Teori

Pengukuran laju pelepasan kalor bahan bakar organik padat dengan menggunakan prinsip konsumsi oksigen, dapat dijelaskan berdasarkan penelitian Huggett [4] dan persamaan yang dikembangkan oleh Parker [7]. Untuk pembakaran sempurna, dimana produk pembakaran hanya terdiri dari air dan karbon dioksida, maka besarnya laju pelepasan kalor dalam basis laju aliran volume, adalah [2], [7], [9]:

$$\dot{q}(t) = \Delta H_{c,ox} \cdot \rho_{O_2} \cdot \left(\frac{M_{O_2}}{M_o} \right) (1 - x_{H_2O}^o) \cdot \phi \cdot x_{O_2}^o \cdot \dot{V}_A \quad (1)$$

dimana :

$\Delta H_{c,ox}$ adalah kalor pembakaran netto sebesar 13,1 MJ/kg O_2 , ρ_{O_2} adalah densitas oksigen (kg/m^3), M_{O_2} adalah berat molekul oksigen, M_o adalah berat molekul udara, $x_{H_2O}^o$ adalah fraksi mol H_2O di udara masuk, ϕ adalah faktor penipisan oksigen, $x_{O_2}^o$ fraksi mol O_2 yang terukur pada udara masuk, dan \dot{V}_A adalah laju aliran volume udara yang masuk ke dalam sistem pada kondisi standar (m^3/s).

Menurut Parker [7,8] besarnya \dot{V}_A adalah

$$\dot{V}_A = \frac{\dot{V}_s}{1 + (\alpha - 1)\phi} \quad (2)$$

dimana:

\dot{V}_s adalah laju aliran volume gas pada saluran keluar, dan α adalah faktor ekspansi untuk fraksi udara yang telah kehilangan komponen oksigennya.

Apabila didalam pengukuran laju aliran volume gas dipergunakan pelat orifis maka nilai \dot{V}_s dapat didekati sebagai :

$$\dot{V}_i = C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \quad (3)$$

dengan C adalah konstanta kalibrasi.

Jadi, dengan memasukkan Persamaan (2) dan (3) ke dalam Persamaan (1) akan diperoleh:

$$\dot{q}(t) = \Delta H_{c,ox} \cdot \rho_{O_2} \cdot \left(\frac{M_{O_2}}{M_a} \right) (1 - x_{H_2O}^o) \cdot C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \left(\frac{x_{O_2}^o \phi}{1 + \phi(\alpha - 1)} \right) \quad (4)$$

dengan ΔP adalah perbedaan tekanan aliran pada pelat orifis, dan T_e adalah temperatur absolut gas pada orifis (K).

Dengan mengasumsikan pembakaran berlangsung sempurna ($x_{CO} = 0$), Parker [7] juga memberikan persamaan untuk faktor penipisan oksigen, ϕ sebagai :

$$\phi = \frac{x_{O_2}^o (1 - x_{CO_2}) - x_{O_2} (1 - x_{CO_2}^o)}{(1 - x_{O_2} - x_{CO_2}) x_{O_2}^o} \quad (5)$$

dimana :

$x_{CO_2}^o$ adalah fraksi mol CO_2 di dalam udara masuk, x_{CO_2} adalah fraksi mol CO_2 di dalam gas buang, x_{O_2} adalah fraksi mol O_2 di dalam gas buang.

Dengan mempertimbangkan bahwa $(M_{O_2} / M_a) = 0,0320 / 0,02896 \approx 1,10$; udara masuk dalam keadaan kering sehingga faktor $x_{H_2O}^o$ dapat diabaikan, dan faktor ekspansi oksigen $\alpha = 1,5$ serta substitusi bentuk ϕ Persamaan (4) dapat disederhanakan menjadi :

$$\dot{q}(t) = \Delta H_{c,ox} \cdot \rho_{O_2} \cdot 1,10 C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \left(\frac{x_{O_2}^o - x_{O_2}}{1,105 - 1,5x_{O_2}} \right) \quad (6)$$

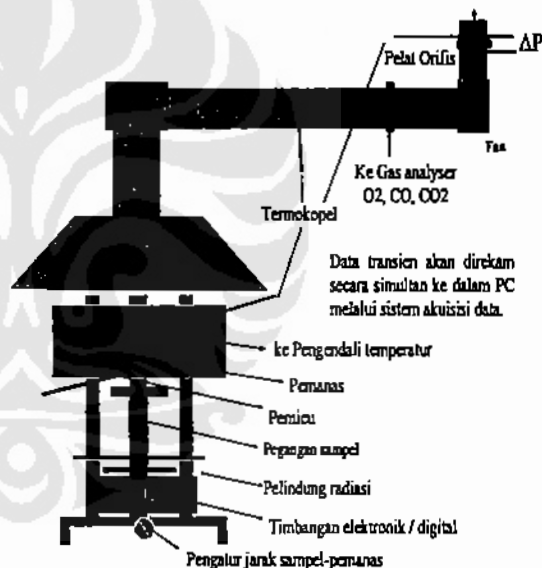
Persamaan (6) serta bentuk padanannya, secara luas telah digunakan sebagai dasar dalam perhitungan laju pelepasan kalor, untuk berbagai jenis aplikasi [8], [10]. Perlu dicatat bahwa perhitungan laju pelepasan kalor mempergunakan Persamaan (6)

mempunyai potensi ketidakpastian (*uncertainty*) yang berasal dari asumsi faktor ekspansi oksigen, asumsi nilai efektif kalor pembakaran dan pengukuran konsentrasi oksigen pada saluran gas buang [9].

3. Eksperimental

3.1. Peralatan Eksperimental

Kalorimeter api merupakan alat uji berskala skala laboratorium yang tengah dikembangkan di Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia. Peralatan ini (Prototipe-1) dirancang untuk memiliki kemampuan mengukur berbagai karakteristik / sifat bakar material bangunan seperti waktu penyalaan, laju pengurangan massa, laju produksi kalor, dan laju produksi asap, secara simultan.



Gambar 1.
Sketsa Peralatan Eksperimental

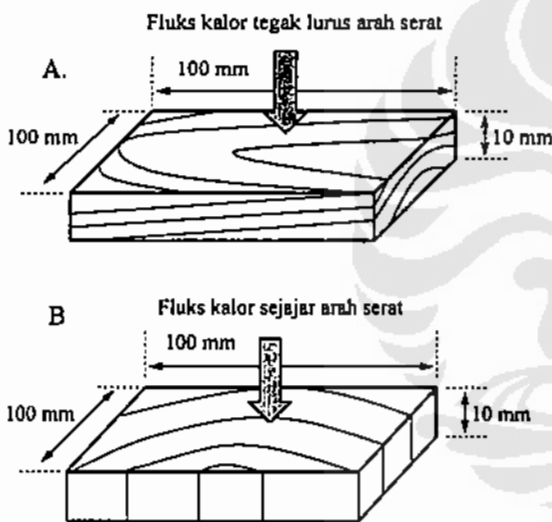
Prototipe kalorimeter api yang dipergunakan mempunyai desain seperti tampak pada Gambar 1, dengan komponen utama sebagai berikut :

- Pemanas berbentuk kerucut, dengan daya sebesar 4 kW pada tegangan 220 V.
- Timbangan elektronik / digital.
- Pemicu (*igniter*) elektronik.
- Saluran (*ducting*) gas buang terbuat dari stainless steel, dan fan yang dilengkapi *invertor* pengatur frekuensi listrik.

- Sistem pengukuran dan pengendalian temperatur, menggunakan termokopel tipe K.
- Sistem akuisisi data yang terhubung dengan PC.
- Pemegang sampel uji, untuk memegang sampel selama eksperimental berlangsung.
- Saluran pengambilan sampel gas yang terhubung dengan Gas Analyser, Quintox – KM9106.

3.2. Persiapan Sample Uji

Pada penelitian ini digunakan dua jenis sampel kayu yaitu dari jenis kayu Akasia dan kayu Flamboyan. Kedua kayu ini dipilih berdasarkan ketersediaannya yang mudah didapat di lingkungan kampus Universitas Indonesia.



Gambar 2.

Gambar Potongan Sampel, (A) Potongan Searah Serat (*along-grain*), (B) Potongan Memotong Serat (*across-grain*). Pada Gambar Juga Diperlihatkan Arah Fluks Kalor Yang Akan Diterima Sampel Saat Pengujian.

Sampel kayu Akasia dan Flamboyan awalnya berupa kayu gelondongan kemudian dipotong berdasarkan arah serat yang berbeda, yaitu memotong serat (*across-grain*), dan searah serat (*along-grain*). Sampel dipotong dengan ukuran 100 x 100 x 10 mm. Untuk menjaga kesamaan karakteristik sampel selama pengujian, sampel disimpan dan dibungkus dengan

lembaran alumunium pada temperatur temperatur ruangan dengan humiditas relatif (RH) yang dipertahankan tetap.

3.3. Prosedur Penelitian

Suatu pengujian, pada umumnya diawali dengan menyalakan pemanas pada suatu temperatur, sehingga dihasilkan fluks kalor tertentu pada sampel kayu, misalnya 5 kW/m² ($\approx 300^{\circ}\text{C}$), 10 kW/m² ($\approx 405^{\circ}\text{C}$), 15 kW/m² ($\approx 478^{\circ}\text{C}$). Setelah temperatur pemanas stabil, dan seluruh peralatan yang lain siap, maka sampel kayu dimasukkan ke posisinya (pegangan sampel). Sampel dibiarkan menyala dan terbakar kemudian diukur waktu penyalaan (menggunakan *stopwatch* atau deteksi terjadinya peningkatan temperatur), penurunan massa sampel (menggunakan timbangan digital), konsentrasi O₂, CO dan CO₂ menggunakan Gas Analyser (GA) Quintox KM9106. Pemicu (*igniter*) dinyalakan apabila mulai muncul asap kecil pada permukaan sampel hingga sampel terbakar.

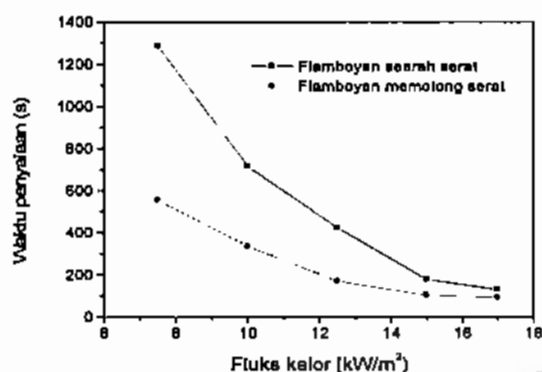
Seluruh data temperatur secara kontinu direkam ke dalam PC melalui modul data akuisisi, sedang data konsentrasi gas buang tersimpan dalam *logger* GA. Data lainnya seperti penurunan massa dan perbedaan tekanan pada orifis dicatat secara manual sesuai bacaan timbangan digital dan manometer miring setiap 10 detik. Apabila seluruh data untuk suatu pengujian dengan fluks kalor tertentu misalnya 5 kW/m² telah selesai diambil, kemudian pengambilan data dilanjutkan untuk besaran fluks yang lebih besar, dan seterusnya.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Waktu Penyalaan

Tabel 1 memperlihatkan hasil pengukuran waktu penyalaan (*time to ignition*) untuk sampel yang dipergunakan pada penelitian ini. Pada fluks kalor yang rendah (5 kW/m²) seluruh sampel tidak dapat terbakar. Untuk mengetahui pengaruh besarnya fluks kalor terhadap waktu penyalaan, maka dibuat grafik, seperti tampak pada Gambar 3. Waktu penyalaan merupakan fungsi invers dari besarnya fluks

kalor yang diterima sampel. Semakin tinggi fluks kalor yang diterima, semakin cepat pula terjadi penyalan. Hasil yang serupa juga telah dilaporkan oleh Tsantaridis, L. [8] untuk kayu yang berasal dari kawasan Scandinavia.



Gambar 3.
Pengaruh Fluks Kalor Pada Waktu Penyalan.

Tabel 1.
Hasil Pengukuran Waktu Penyalan

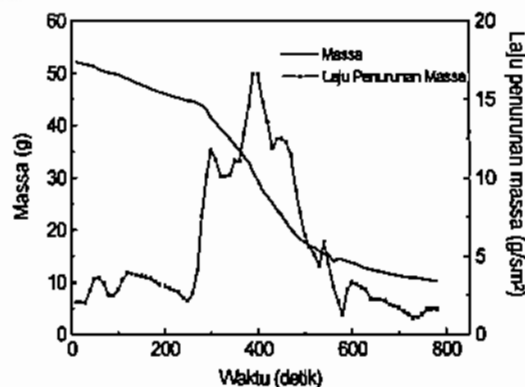
Sampel	Arah serat	Fluks kalor (kW/m ²)	Penyalan	
			Ya/Tidak	Waktu (s)
Akasia	Searah	5	Tidak	-
	Searah	7,5	Tidak	-
	Searah	10	Tidak	-
	Searah	12,5	Ya	879
	Searah	15	Ya	694
	Searah	17	Ya	206
Akasia	Memotong	5	Tidak	-
	Memotong	7,5	Ya	625
	Memotong	10	Ya	545
	Memotong	12,5	Ya	271
	Memotong	15	Ya	269
	Memotong	17	Ya	246
Flamboyan	Searah	5	Tidak	-
	Searah	7,5	Ya	1286
	Searah	10	Ya	717
	Searah	12,5	Ya	424
	Searah	15	Ya	179
	Searah	17	Ya	130
Flamboyan	Memotong	5	Tidak	-
	Memotong	7,5	Ya	557
	Memotong	10	Ya	337
	Memotong	12,5	Ya	170
	Memotong	15	Ya	104
	Memotong	17	Ya	92

4.2. Laju Penurunan Massa

Gambar 4 menggambarkan kurva penurunan massa sampel kayu Akasia dan laju penurunan massa yang terjadi. Untuk

250 s pertama tampak terjadi pola mendatar yang menunjukkan terjadinya pengeluaran kandungan air dari sampel kayu. Pada saat yang sama, temperatur sampel kayu juga meningkat akibat penyerapan kalor radiasi dari pemanas. Pada temperatur yang lebih tinggi zat terbang yang ada di dekat permukaan sampel mulai keluar. Apabila zat terbang yang dikeluarkan telah memasuki zona mampu bakar (*flammability*), terjadi peningkatan laju penurunan massa akibat mulai terbakarnya campuran udara dengan zat terbang yang keluar dari sampel. Puncak pertama dari pola laju penurunan massa ini mengindikasikan telah terjadinya proses penyalan pada sampel dengan bantuan pemicu (*igniter*).

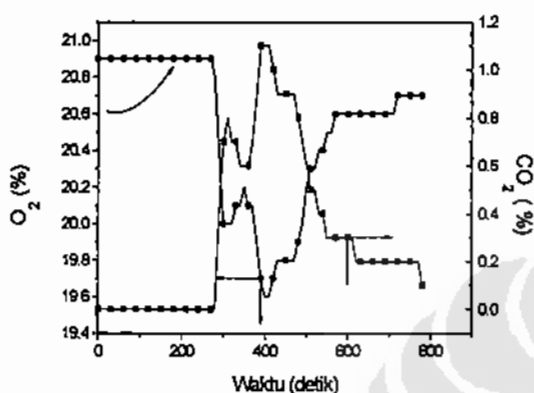
Selama sampel terbakar, terjadi laju penurunan massa yang signifikan dan mencapai puncak tertingginya pada kisaran 16,7 g/sm². Setelah titik tersebut, grafik cenderung mengalami pola penurunan. Hal ini ditandai dengan penyalan api yang mengecil dibandingkan dengan proses sebelumnya. Selama proses penurunan laju massa ini, terjadi puncak-puncak kecil yang disebabkan oleh keluar dan terbakarnya zat terbang (*jetting*) dari arah serat yang baru mengalami retakan [2], [6], [8]. Pada peristiwa terbakarnya kayu, zat terbang yang dihasilkan pada lapisan di bawah zona pirolisis dapat lebih mudah keluar melalui retakan yang ditandai dengan terjadinya semburan api [2].



Gambar 4.
Grafik Laju Penurunan Massa Sampel Kayu Akasia Memotong Serat (*across grain*) Pada Heat Fluks 12,5 kW/m².

4.3. Laju Pelepasan Kalor

Besarnya laju pelepasan kalor dari sampel, untuk tingkat fluks kalor tertentu dapat dihitung berdasarkan Persamaan (6). Dengan demikian, hasil pengukuran konsentrasi O_2 di aliran udara masuk dan di saluran gas buang (Gambar 5) dapat menunjukkan besarnya konsumsi O_2 selama sampel terbakar, sekaligus pola laju pelepasan kalornya.

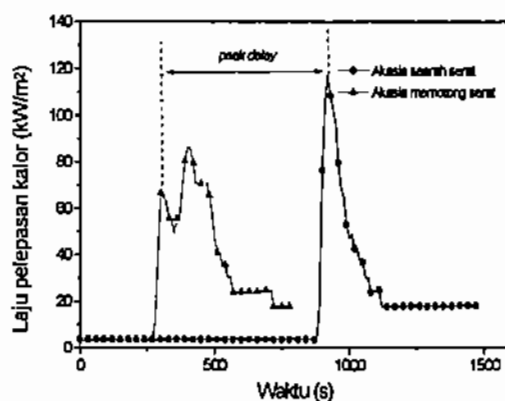


Gambar 5. Evolusi Konsentrasi O_2 dan CO_2 Terhadap Waktu Pembakaran Sampel Kayu Akasia Memotong Serat Pada Fluks Kalor $12,5 \text{ kW/m}^2$.

Berdasarkan hasil pengukuran konsumsi O_2 dan laju aliran volumetrik gas buang untuk setiap pengujian, maka dengan mempergunakan Persamaan (6) dapat dihitung besarnya laju pelepasan kalor (*heat release rate*). Untuk sampel kayu Akasia dengan kedua arah serat (searah atau memotong), hasilnya ditunjukkan pada Gambar 6, dan Gambar 7 untuk kayu Flamboyan.

Pada grafik untuk kayu Akasia dengan orientasi memotong serat (Gambar 6), terjadi pola yang mendatar selama $\pm 250 \text{ s}$. Selama proses ini temperatur sampel kayu perlahan meningkat akibat terserapnya fluks kalor yang diterima. Energi penyalaan yang diberikan pemicu, menyebabkan terbakarnya zat terbang yang keluar dari retakan yang ada di sisi bagian atas atau bawah sampel. Akibat terbentuknya lapisan arang (*char*), maka terjadi fluktuasi pelepasan zat terbang yang ditandai dengan terbentuknya puncak-puncak kurva laju pelepasan kalor. Proses

pembakaran kedua atau *peak* kedua terjadi jika temperatur dibawah permukaan sampel mencapai $300 \text{ }^\circ\text{C}$ [3].



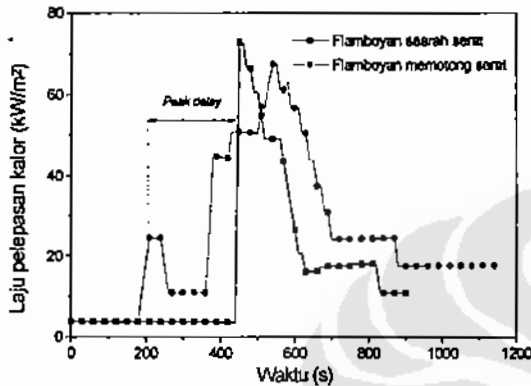
Gambar 6. Grafik Laju Pelepasan Kalor Kayu Akasia Dengan Orientasi Searah Serat dan Memotong Serat Pada Fluks Kalor $12,5 \text{ kW/m}^2$.

Untuk sampel kayu Akasia dengan orientasi searah serat tampak memiliki pola laju pelepasan kalor yang berbeda dengan sampel sebelumnya. Pola mendatar terjadi dalam periode yang lebih panjang, selama $\pm 880 \text{ s}$, karena sulitnya kandungan air keluar pada arah orientasi searah serat. Akibatnya sampel mempunyai waktu pemanasan yang lebih panjang, sehingga lebih banyak zat terbang yang terbentuk dan terjebak dalam lapisan kayu. Ketika kemudian zat terbang dapat keluar melalui retakan serat, maka terjadi semburan api (*jetting*) ke samping pada bagian sisi kayu. Pada kondisi seperti ini nyala api terlihat besar, dan terjadi laju penurunan kalor yang tinggi. Terjadinya pembentukan arang (*char*) pada sisi permukaan atas sampel menyebabkan penurunan laju pelepasan kalor, dengan disertai oleh munculnya semburan api kecil.

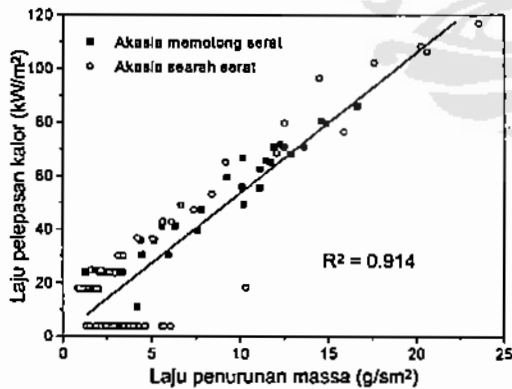
Perbedaan dalam waktu dan mekanisme pelepasan zat terbang pada arah orientasi serat yang berbeda, mengakibatkan pergeseran waktu terjadinya puncak (*peak*) serta tingginya laju pelepasan kalor. Hal yang sama juga dapat dicermati untuk sampel kayu Flamboyan seperti tampak pada Gambar 7.

Untuk membuktikan bahwa kalor yang dilepaskan sampel berasal dari zat penyusun

sampel (bukan dari faktor eksternal seperti dari pemanas), maka digambarkan korelasi yang terjadi antara laju penurunan massa terhadap laju pelepasan kalor seperti tampak pada Gambar 8. Dengan mengabaikan penurunan massa akibat menguapnya komponen kandungan air (*moisture*), maka terbakarnya komponen zat terbang (*volatile matter*) dan karbon tetap (*fixed carbon*) secara langsung akan memberikan kontribusi pada besarnya kalor yang dilepaskan sampel.



Gambar 7.
Grafik Laju Pelepasan Kalor Kayu Flamboyan Dengan Orientasi Searah Serat dan Memotong Serat Pada Fluks Kalor 12,5 kW/m².



Gambar 8.
Korelasi Antara Laju Penurunan Massa dan Laju Pelepasan Kalor Untuk Sampel Kayu Akasia.

5. Kesimpulan

Kalorimeter api yang dikembangkan di Departemen Teknik Mesin telah dilengkapi dengan peralatan analisis gas buang sehingga

dapat dipergunakan untuk menentukan laju pelepasan kalor. Berdasarkan hasil pengujian dua buah sampel kayu dengan pola orientasi searah dan memotong serat, dapat disimpulkan beberapa sifat bakar kayu sebagai berikut:

- Waktu penyalaan (*time to ignition*) material kayu dipengaruhi oleh jenis sampel, orientasi serat kayu, kandungan air dan fluks kalor yang diberikan.
- Orientasi serat kayu mempengaruhi proses pengeluaran zat terbang, pola laju produksi kalor, dan pola laju penurunan massa.
- Terdapat korelasi yang kuat antara laju penurunan massa dengan laju pelepasan kalor.

Daftar Acuan

- [1]. Rashash, D.J., Ramachandran, G., Kandola, B., Watts, J.M., dan Law, M., *Evaluation of Fire Safety*, John Wiley & Sons, 2004, pp. 85-132.
- [2]. Drysdale, D., *An Introduction to Fire Dynamics*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2003, pp. 117 – 139.
- [3]. Harada, T., Time to ignition, heat release rate and fire endurance time of wood in Cone Calorimeter test, *Fire and Materials*, Vol. 25 (2001) 161-167.
- [4]. Huggett, C., Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements, *Fire and materials*, Vol. 4 (1980) 61-64.
- [5]. Babrauskas, V., dan Peacock, R.D., Heat release rate: the single most important variable in fire hazards, *Fire Safety Journal*, Vol. 18 (1992) 255-272.
- [6]. Nugroho, Y.S., Dwithasari, P., Effendi, M., Fahrudin, O., dan Kiswanto, G., Sifat Bakar (Ignitability) Material Kayu Terhadap Radiasi Kalor, *Prosiding Seminar Teknologi Material dan Aplikasinya dalam Industri - Eminex*, ITB, Bandung, 2004, pp. 139-145.
- [7]. Parker, W.J., *Calculation of the heat release rate by oxygen consumption for various applications*, NBSIR 81-2427, National Bureau of Standards, Gaithersburg, USA, 1982.

- [8]. Tsantaridis, L., *Reaction to fire performance of wood and other building products*, Doctoral Thesis, KTH-Royal Institute of Technology, Stockholm, 2003.
- [9]. Enright, P.A., dan Fleischmann, C.M., Uncertainty of heat release rate calculation of the ISO5660-1 Cone Calorimeter Standar Test Method, *Fire Technology*, Vol. 35 (1999) 153-169.
- [10]. ASTM E 1354-97, *Standar test method for heat and visible smoke release rates for materials and products using an oxygen consumption calorimeter*, Annual Book of ASTM Standars, American Society for Testing Materials, Philadelphia, 1997, pp. 672-689.

