

SIFAT SELF-IGNITION PADA GAMBUT, SABUT KELAPA SAWIT DAN KAYU

Yulianto Sulistyono Nugroho

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia

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

Abstrak

Kebakaran hutan merupakan salah satu masalah lingkungan terbesar yang dihadapi oleh Indonesia. Kebakaran tersebut telah merusak jutaan hektar hutan dan lahan sehingga menyebabkan kerugian ekonomi, masalah sosial seperti penyakit akibat asap dan kerusakan lingkungan dengan akibat jangka panjang. Kebakaran hutan umumnya diawali oleh api kecil dan mekanisme oksidasi temperatur rendah. Makalah ini menyajikan hasil penelitian oksidasi temperatur rendah dengan menggunakan sampel sabut kelapa sawit, gambut, serpihan kayu dan batubara muda. Sifat pembakaran spontan dari sampel yang diuji ditentukan dari hasil pengukuran temperatur oven kritis dan parameter kinetika oksidasi. Hasil penelitian terhadap sabut kelapa sawit, gambut, serpihan kayu dan batubara muda memperlihatkan bahwa material ini memiliki kecenderungan untuk mengalami pembakaran spontan. Sifat pembakaran spontan dari sampel yang diteliti dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti temperatur ambien, kandungan air, sifat kimia dan fisika sampel, dan ukuran basket. Keinginan untuk memanfaatkan informasi yang diperoleh dari penelitian skala laboratorium ini untuk skala yang lebih besar masih memerlukan penelitian dan pengkajian lebih lanjut.

Abstract

Self-ignition properties of peat, palm shell fibre and woods. Forest fire is one of the greatest environmental problems faced by Indonesia. Forest fires have destroyed million hectares of forest and land which cause economic loss, social problems including smoke related diseases and environmental disaster with long time consequences. The exothermic reactions of forest fuels that lead to fire can be initiated by a piloted flame and low-temperature oxidation mechanism. This paper presents the results of low temperature oxidation studies using forests fuel samples i.e. palm shell fibre, peat, woods and low-rank coal. The measured values of the critical oven temperatures and the kinetic oxidation parameters are used to analyze the intrinsic properties of the samples to self-ignite. Thermal runaway reactions leading to ignition are indicated for all forest fuels tested. This reaction is affected by various factors including oven temperature, moisture content, chemical and physical properties as well as basket sizes. Attempt to extrapolate the results of these laboratory-scaled experiments for real fires still require further tests and assessments.

Keywords: self-ignition, critical oven temperature, kinetic oxidation parameter, peat, palm shell fiber

1. Pendahuluan

Kebakaran hutan di Indonesia merupakan salah satu masalah lingkungan yang terbesar karena secara periodik terjadi kebakaran hutan dalam skala yang besar. Akibat dari kebakaran tersebut adalah hilangnya potensi kayu, keanekaragaman hayati dan ekosistemnya. Data kebakaran hutan besar yang terjadi di Indonesia menunjukkan adanya peningkatan kerusakan. Pada tahun 1982/1983 yang lalu Indonesia telah kehilangan hutan dan lahannya seluas 3,6 juta Ha, meningkat menjadi 5,1 juta Ha pada tahun 1994. Kebakaran hutan

tahun 1997/1998 telah merusak hutan dan lahan dengan luas sekitar 10 juta Ha [1].

Kebakaran hutan umumnya muncul akibat terjadinya ignitasi (*ignition*) dimana laju kalor yang dilepaskan dari proses pembakaran lebih besar dari laju kalor yang dilepaskan ke lingkungan. Ignitasi diawali dengan adanya sumber panas misalnya api, kilat dan sebagainya. Kebakaran hutan hanya dapat terjadi apabila ignitasi yang berkelanjutan mencapai temperatur pembakaran hingga proses akan berlanjut walaupun sumber panas telah dihilangkan [2].

Secara umum sumber panas untuk terjadinya inisiasi proses kebakaran dapat dipisahkan menjadi dua bagian besar yaitu [3]:

1. *Piloted ignition*, disebabkan oleh terdapatnya sumber api kecil seperti nyala dari korek api dan puntung rokok.
2. *Self-ignition*, disebabkan oleh mekanisme pemanasan internal (*internal heating*) akibat reaksi oksidasi eksotermis antara material dengan oksigen pada temperatur ambien.

Hutan tropis dan lahan gambut yang masih alami memiliki kelembaban yang tinggi serta tidak mengalami proses akumulasi dedaunan kering di lantai hutan. Selama musim penghujan lapisan gambut dapat mengabsorpsi air hujan dalam jumlah besar hingga dapat mencegah terjadinya banjir. Pada saat musim kemarau tiba lapisan gambut secara perlahan melepaskan air kembali ke udara. Dalam hutan alami seperti ini, kesetimbangan kandungan air dalam lapisan gambut saat musim penghujan maupun musim kemarau terpelihara secara alami. Kondisi kesetimbangan kandungan air dalam lapisan gambut menjadi sulit dipertahankan apabila hutan yang menyelimutinya dikonversi menjadi hutan terbuka. Dalam musim kemarau yang singkat, lapisan gambut bagian atas mengering sementara lapisan dibawahnya tetap lembab atau basah. Apabila terjadi kemarau berkepanjangan, lapisan gambut menjadi kering dan berongga sehingga memungkinkan udara masuk ke lapisan bawah [4]. Penggunaan api dalam kegiatan pembukaan lahan dapat menjadi sumber terjadinya kebakaran hutan dan lahan gambut. Kebakaran lahan gambut dapat digolongkan sebagai *smoldering ignition*, dimana api menjalar ke dalam lapisan gambut sehingga lebih sulit untuk dipadamkan [3].

Fenomena terbakar sendiri (*self-ignition*) dari batubara Indonesia telah dilakukan sebelum ini [5-7], yang membuktikan bahwa batubara dengan komposisi dan tinggi penimbunan tertentu dapat terbakar sendiri pada temperatur ambien yang relatif rendah. Hal ini sesuai dengan laporan peristiwa kebakaran di beberapa lokasi penimbunan batubara di Indonesia, khususnya Sumatera bagian selatan.

Sebagaimana halnya batubara, maka dedaunan kering dan serpihan kayu adalah bahan yang dapat beroksidasi dengan udara pada temperatur ruang. Reaksi oksidasi ini akan menghasilkan kalor yang apabila ukuran dan geometri timbunan kalor tersebut tidak dapat dilepaskan ke lingkungan, maka akan terjadi peningkatan temperatur timbunan sekaligus mempercepat reaksi oksidasi. Reaksi oksidasi yang berkelanjutan akan menyebabkan tercapainya temperatur kritis sehingga timbunan dedaunan kering terbakar dengan sendirinya (*self-ignition*).

Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari sifat pembakaran spontan dari berbagai bahan bakar hutan seperti gambut, sabut kelapa sawit, serpihan kayu, dan batubara muda. Penelitian ini dapat memberikan penjelasan dan pemahaman terhadap peran mekanisme pemanasan spontan sebagai sumber kalor/panas bagi pembakaran spontan dari bahan bakar hutan. Hasil pengukuran seperti temperatur kritis dan parameter kinetika oksidasi digunakan sebagai dasar untuk menentukan sifat terbakar sendiri dari sampel yang diuji.

2. Metode dan Eksperimental

Pembakaran spontan (*spontaneous combustion*) telah lama menjadi masalah bagi berbagai industri proses, pertanian, transportasi dalam bentuk *bulk* dan penyimpanan. Berbagai jenis material yang seringkali mengalami masalah pembakaran spontan misalnya : timbunan batubara, besi *sponge*, jerami, katun, produk susu bubuk dan sebagainya [8,9]. Pembakaran spontan pada materi tersebut terjadi akibat reaksi oksidasi dengan oksigen yang tersedia di udara bebas. Pembakaran spontan muncul apabila laju kalor yang dihasilkan dari proses oksidasi temperatur rendah dapat mengatasi laju pelepasan kalor ke lingkungan. Produksi kalor dalam timbunan akan menyebabkan peningkatan temperatur material, sehingga reaksi kimia oksidasi meningkat secara perlahan. Berikut ini akan digambarkan model persamaan kesetimbangan energi untuk menggambarkan laju produksi kalor dan laju pelepasan kalor ke lingkungan.

Persamaan energi satu dimensi untuk tumpukan material reaktif yang mengalami pemanasan dapat didefinisikan sebagai:

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho_s Q_c o A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

Berdasarkan pengamatan secara experimental maupun pemodelan, maka penyelesaian persamaan (1) secara sederhana dapat diperoleh apabila tercapai kondisi tidak terjadi lagi perpindahan kalor konduksi di dalam tumpukan. Dalam kondisi ini nilai turunan pertama suhu terhadap jarak menjadi nol ($\partial T/\partial x$ dan $\partial^2 T/\partial x^2 = 0$). Kondisi ini ditandai pada saat temperatur tumpukan (setidaknya dibagian tengah) menjadi *uniform*. Kondisi ini digunakan dalam metode *crossing point* untuk menganalisa tumpukan material reaktif [10].

Saat kondisi ini terjadi maka nilai konduksi termal dapat dianggap nol karena pada tumpukan tidak terdapat gradien suhu pada arah radial yang berakibat persamaan di atas menjadi:

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} \approx \rho_s Q c_o A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (2)$$

pada saat profil suhu uniform yaitu ketika ($\partial T/\partial x$ dan $\partial^2 T/\partial x^2 = 0$), maka persamaan (2) dapat dituliskan dalam bentuk logaritmik menjadi

$$\ln\left[\frac{dT}{dt}\right]_{T_c} = \ln\left(\frac{QA}{C_{ps}}\right) - \left(\frac{E_a}{RT_c}\right) \quad (3)$$

Persamaan (3) dapat dipergunakan untuk menggambarkan kurva Arrhenius yang berguna untuk mendapatkan nilai energi aktivasi (E_a) dan faktor frekuensi (QA) untuk reaksi orde satu. Berkaitan dengan hal ini Bowes [8] menyatakan bahwa orde reaksi temperatur rendah untuk batubara dan bahan-bahan *carbaceous* lainnya berkisar antara ~0.5 - 1.0, dengan nilai orde reaksi sama dengan 1 dapat digunakan untuk penyederhanaan.

Untuk suatu timbunan material reaktif berukuran relatif besar, maka proses pembakaran spontan dapat dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu [9]:

- Faktor intrinsik material seperti kandungan air, ukuran partikel, komposisi senyawa kimia, luas permukaan, distribusi ukuran pori, sifat petrologi dan lain sebagainya.
- Faktor ekstrinsik timbunan seperti temperatur dan humiditas ambien, distribusi ukuran partikel, porositas timbunan, ukuran (massa) timbunan, geometri (bentuk) timbunan, dan kecepatan angin.

Kandungan air memegang peranan yang sangat penting dalam proses oksidasi temperatur rendah dari bahan-bahan reaktif seperti tersebut di atas. Apabila reaksi oksigen dengan material reaktif bersifat eksotermik, interaksi antara air dengan bahan-bahan tersebut dapat bersifat eksotermik maupun endotermik bergantung pada apakah air terkondensasi atau terevaporasi [11]. Jika air tersedia pada bahan tersebut memadai, maka air akan menekan terjadinya proses pemanasan spontan, dengan cara mengurangi jumlah permukaan reaktif, menutup akses oksigen ke daerah reaktif dan mengambil panas yang muncul pada saat oksidasi terjadi. Namun demikian, jika jumlah air menurun misalnya akibat pengeringan, maka pengaruh penekanan air terhadap reaksi pemanasan spontan akan berkurang dan proses pembakaran spontan dapat terjadi berkelanjutan. Chen [12] melaporkan bahwa batubara muda (*sub-bituminus*) asal Australia mengalami reaksi oksidasi temperatur rendah dengan laju terbesar apabila

kandungan air yang tersedia berkisar antara 7 - 17 %.

Potensi terjadinya pembakaran spontan pada produk kayu dan pertanian telah pula ditunjukkan oleh berbagai peneliti di berbagai negara, seperti kayu *Eucalyptus* sebagai jenis vegetasi yang dominan di hutan Australia [13], dan *bagasse* yaitu residu proses pengolahan gula tebu [14]. Besarnya masalah pembakaran spontan pada industri terkait telah mendorong pengembangan berbagai teori, metode experimental dan permodelan pembakaran spontan pada berbagai kasus [9].

Pada penelitian ini digunakan 5 sampel uji yaitu: gambut dari Kalimantan Timur, sabut kelapa sawit, kayu jenjing, kayu jati dan batubara muda. Pengujian analisis proksimasi sampel dilakukan menggunakan standar ASTM di Pusat Penelitian Teknologi Mineral dan Batubara Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia di Bandung. Hasilnya diberikan pada Tabel 1. Sampel terlebih dahulu dihaluskan menggunakan *blender*, sehingga menjadi serbuk. Kemudian sampel tersebut disaring menggunakan saringan kasa. Sampel yang digunakan untuk pengujian adalah sampel yang lolos dari kasa 18 *mesh* namun tidak lolos kasa 60 *mesh*.

Sebuah fasilitas pengujian skala laboratorium telah dibuat untuk pengujian sifat terbakar sendiri dari material uji. Komponen utama fasilitas pengujian ini terdiri dari: *oven* listrik, wadah kasa baja, termokopel, *on-line data acquisition system*, dan komputer. *Oven* listrik yang digunakan merupakan jenis oven udara ter-resirkulasi dengan kemampuan menjaga temperatur dengan baik hingga 250 °C selama masa pengujian berlangsung. Sampel uji diletakkan dalam wadah kasa baja berbentuk kubus berukuran sisi 50 mm - 100 mm. Termokopel tipe K (*chromel-alumel*) berdiameter 1.5 mm digunakan dalam penelitian ini. Termokopel jenis ini dipilih karena memiliki nilai respon *emf* (*voltage output*) terhadap respon temperatur yang baik serta memiliki kepekaan yang baik untuk jangkauan temperatur pengujian (25 °C - 250 °C). Dalam jangkauan temperatur ini toleransi termokopel dapat mencapai ± 2 °C. Dua buah termokopel dimasukkan ke dalam wadah uji untuk pengukuran temperatur lokal sampel. Termokopel pertama diletakkan di pusat wadah uji, sedangkan termokopel kedua diletakkan pada jarak 10 mm dari pusat. Termokopel ketiga diletakkan di *oven* untuk pengukuran temperatur *oven*. Semua termokopel diletakkan segaris dan dihubungkan dengan modul *data logger* (ADAM 4018M) dan *converter RS 232* (ADAM 4520) yang terhubung dengan komputer. Sistem semacam ini memungkinkan pengukuran temperatur secara *on-line*.

Tabel 1. Analisis Proksimasi Sampel Uji

Keterangan	Sampel				
	Gambut	Kelapa Sawit	Kayu Jenjing	Kayu Jati	Batubara Muda
Analisis Proksimasi (% massa)					
Air lembab :	9.0	9.2	10.1	9.3	22.8
Zat terbang :	58.9	68.9	75.4	74.9	39.9
Karbon tetap :	30.0	17.5	14.0	14.4	33.1
Abu :	2.1	4.4	0.5	1.4	4.2

3. Hasil Dan Pembahasan

Gambar 1 memperlihatkan profil temperatur terhadap waktu untuk sampel sabut kelapa sawit yang diukur pada wadah kubus bersisi 50 mm. Sumbu vertikal menunjukkan temperatur sampel yang diukur pada pusat wadah. Profil temperatur masing-masing muncul pada pengujian dengan temperatur ambien (*oven*) seperti yang ditunjukkan pada gambar. Pada saat temperatur *oven* ditingkatkan dari 165 °C ke 170 °C muncullah dua kondisi ekstrem yang memperlihatkan kondisi aman (*sub-critical*) dan kondisi terbakar (*super-critical*). Dalam kondisi aman (165 °C), temperatur pusat meningkat sampai tercapainya temperatur maksimum 175 °C dan kemudian secara perlahan akan landai. Sebaliknya dalam kondisi terbakar (temperatur oven 170 °C), temperatur pusat akan terus meningkat hingga sampel terbakar. Dengan demikian temperatur ambien kritis untuk sampel sabut kelapa sawit dapat ditentukan dengan mencari titik tengah dari kedua kondisi ekstrem tersebut. Dalam hal ini temperatur kritis oven dapat dikatakan 167.5 ± 2.5 °C. Dalam kondisi *super-critical*, temperatur pusat *oven* akan meningkat terus hingga melebihi temperatur *oven* lebih dari 100 °C.

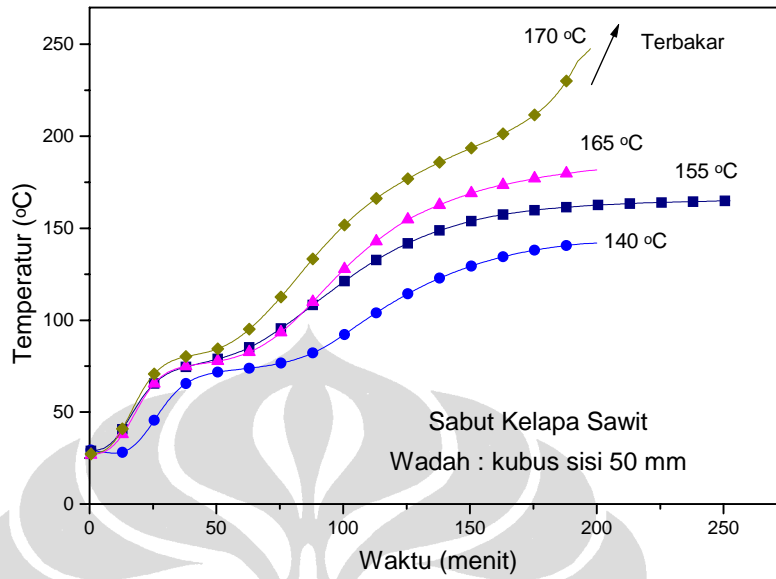
Selama periode pemanasan awal dari temperatur ruang menuju temperatur *oven*, sampel kelapa sawit memperlihatkan beberapa fitur menarik. Pertama-tama, kalor yang diterima dari kalor *oven* dan yang dihasilkan dari proses oksidasi sampel meningkatkan temperatur partikel sampel hingga sekitar 60 - 70 °C. Kemudian tampak bahwa proses penguapan kandungan air mulai menghambat peningkatan temperatur partikel sampel lebih lanjut. Penguapan kandungan air dalam jumlah yang besar terjadi ketika temperatur sampel mulai meningkat lagi dari 70 °C hingga 100 °C. Jelas sekali bahwa proses pengeringan sampel telah menghambat laju kecepatan peningkatan temperatur sampel secara signifikan. Pada kondisi seperti ini, apabila kalor yang dihasilkan dari proses oksidasi sampel masih dapat mendorong terlepasnya uap dari partikel sampel, maka temperatur sampel akan terus meningkat melebihi 100 °C. Pada kondisi seperti ini apabila laju produksi kalor telah melampaui laju pelepasan kalor konveksi ke lingkungan, maka temperatur sampel akan terus

meningkat hingga terjadi pembakaran spontan. Apabila laju produksi kalor tidak lebih besar dari laju pelepasan kalor, maka temperatur sampel akan mencapai kondisi maksimum dan secara perlahan akan kembali menurun.

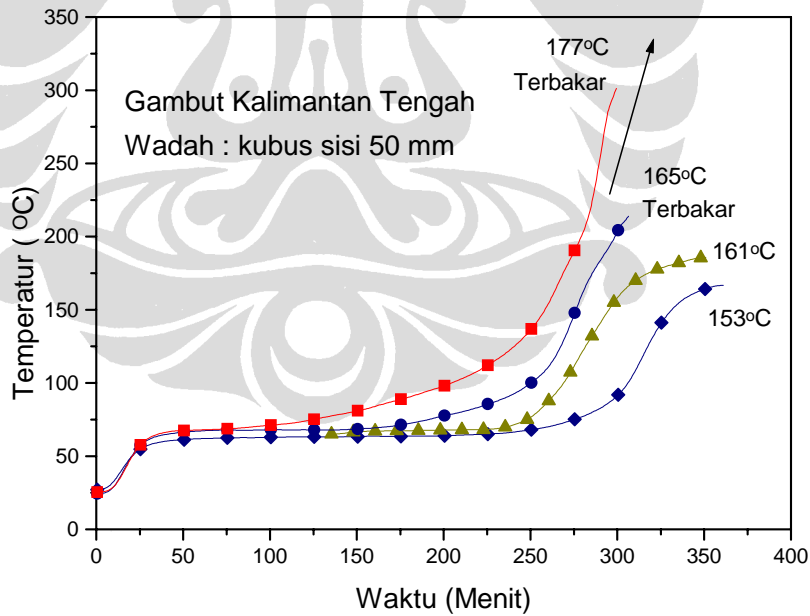
Hasil pengukuran temperatur ambien kritis untuk sampel yang lain dapat dilihat pada Gambar 2 dan 3. Profil temperatur pada gambar tersebut dengan jelas memperlihatkan bahwa pada temperatur ambien yang lebih tinggi proses terjadinya pembakaran spontan berlangsung pada interval waktu yang lebih pendek. Namun demikian perlu disadari bahwa kandungan air pada sampel sangat mempengaruhi bentuk profil temperatur terhadap waktu. Gambut yang memiliki kandungan air tinggi membutuhkan waktu yang lebih panjang untuk penguapannya (Gambar 2). Hal ini ditunjukkan dengan panjangnya periode saat temperatur bertahan pada kisaran 60 - 70 °C.

Berbeda dengan pengujian pada sabut kepala sawit dan gambut, maka pengujian untuk kayu jenjing dan jati dilakukan dengan menggunakan wadah uji berbentuk kubus dengan sisi 80 mm. Pada pengujian ini temperatur *oven* diatur pada kisaran 165 - 190 °C. Pada makalah ini ditampilkan data untuk pengamatan terhadap profil temperatur dilakukan untuk mengetahui kondisi dimulainya pembakaran spontan. Dari Gambar 3 dapat diamati bahwa meskipun pengujian dilakukan dengan ukuran wadah yang lebih besar, waktu yang diperlukan untuk penguapan kandungan air relatif pendek. Hal ini kembali memperlihatkan pentingnya peran prosentase air sampel dalam menunda proses terjadinya pembakaran spontan.

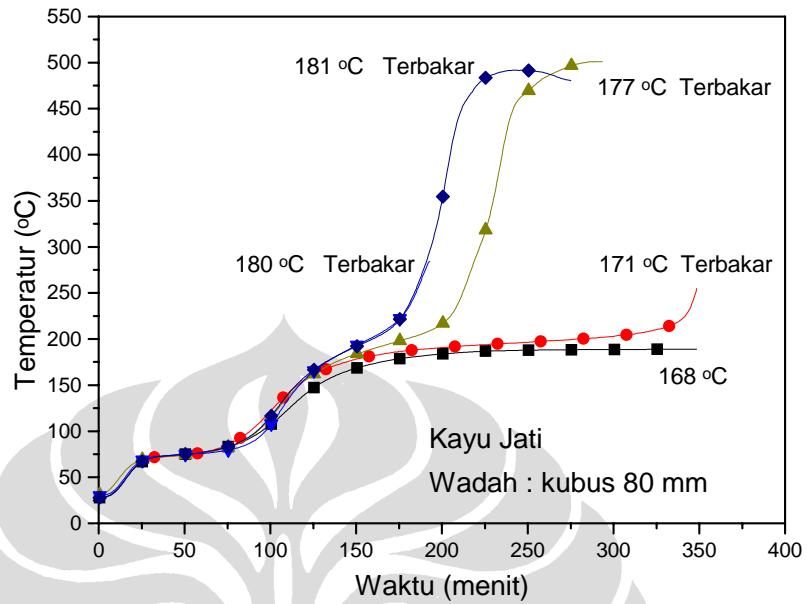
Pada sampel ini didapati kondisi temperatur *oven* kritis dengan rentang temperatur yang sempit, dimana perbedaan temperatur sekitar 3 °C telah membedakan secara jelas kondisi aman (168 °C) dan kondisi super-kritikal (171 °C). Temperatur *oven* kritis adalah 169.5 ± 1.5 °C. Perubahan yang ekstrem juga dapat diamati pada perilaku sampel apabila temperatur *oven* ditingkatkan 6 °C lebih tinggi. Pengujian yang dilakukan pada temperatur oven 177 °C, menyebabkan perpendekkan waktu terbakar menjadi hanya sekitar 200 menit.



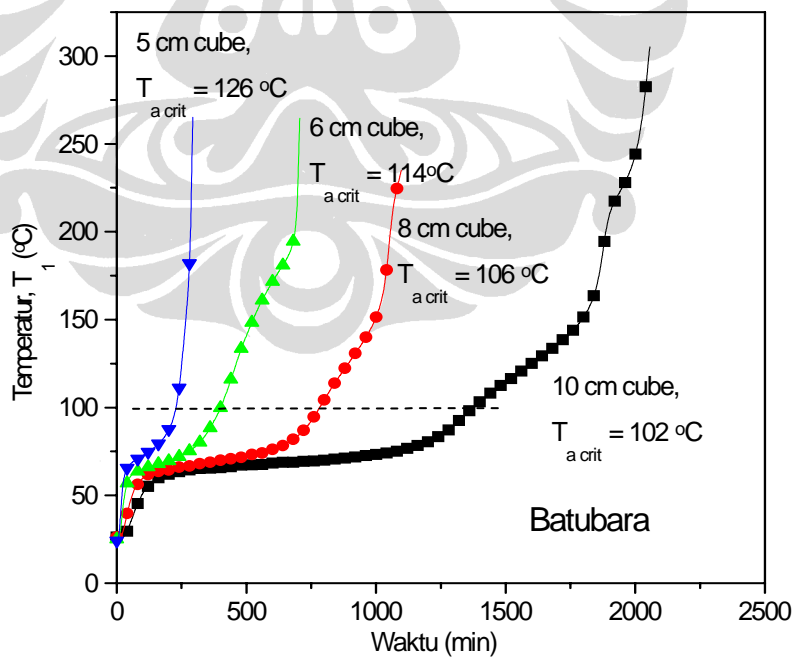
Gambar 1. Hasil pengukuran temperatur pusat untuk sampel sabut kelapa sawit, dimana temperatur oven, T_a ditingkatkan secara bertahap.



Gambar 2. Hasil pengukuran temperatur pusat untuk sampel gambut, dimana temperatur oven, T_a ditingkatkan secara bertahap. Temperatur oven kritis = 171 ± 6 °C.



Gambar 3. Hasil pengukuran temperatur pusat untuk sampel kayu jati, dimana temperatur oven, T_a ditingkatkan secara bertahap. Temperatur oven kritis = $169.5 \pm 1.5^\circ\text{C}$.



Gambar 4. Evolusi temperatur sampel batubara yang diukur menggunakan berbagai ukuran wadah berbentuk kubus bersisi 50, 60, 80 dan 100 mm. Semua eksperimen dilakukan pada temperatur ambien kritis ($T_{a \text{ crit}}$). Garis putus-putus menunjukkan lokasi 100°C .

Faktor penting yang juga perlu diperhatikan dalam hal pembakaran spontan adalah waktu yang diperlukan untuk mulainya terjadi kondisi pembakaran spontan. Untuk mengetahui bagaimana peran ukuran timbunan (dalam percobaan ini ditunjukkan sebagai besarnya ukuran wadah) terhadap temperatur kritis dan waktu mulainya terdeteksi *ignition (times to ignition)*, dilakukan pengujian terhadap sampel batubara muda.

Gambar 4 memperlihatkan dengan jelas bahwa temperatur ambien kritis untuk untuk sampel yang sama akan menurun sejalan dengan membesarnya ukuran wadah (atau timbunan). Namun demikian, data waktu yang diperlukan untuk mencapai suatu temperatur (katakan 100 °C) juga meningkat sejalan dengan membesarnya ukuran wadah.

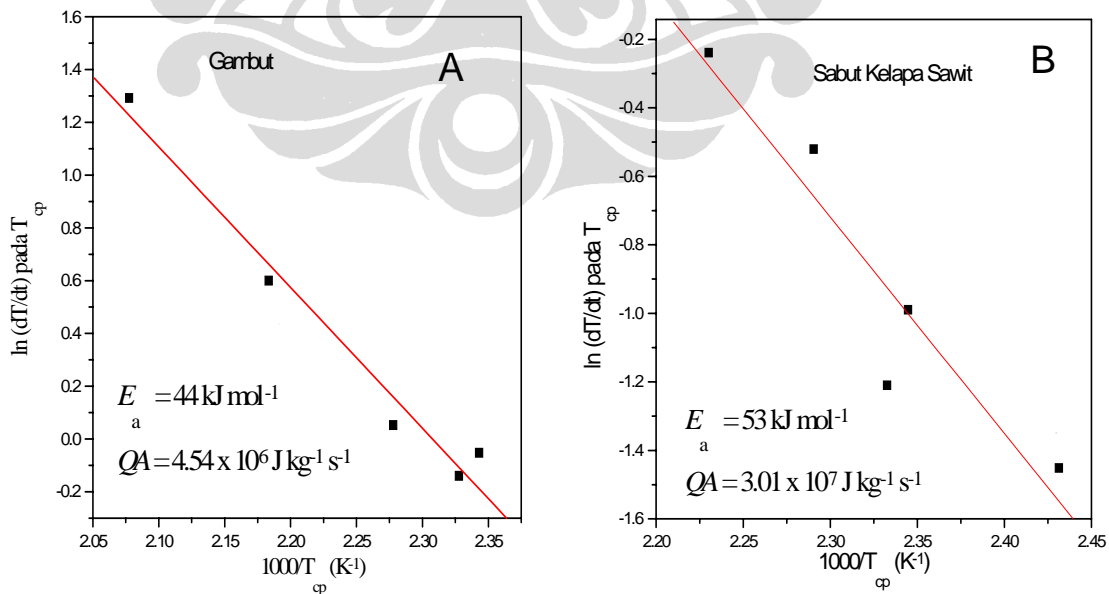
Sebagai implikasi dari data ini, dapat diperkirakan bahwa pembakaran spontan pada kondisi lapangan (*full scaled*) dapat terjadi pada temperatur yang jauh lebih

rendah dari kondisi skala laboratorium. Bowes [8] menggunakan acuan 38 °C sebagai temperatur kritis untuk transportasi batubara dalam kapal dengan ukuran timbunan sekitar 3 meter.

Pada penelitian ini parameter kinetika oksidasi sampel ditentukan dengan metode titik potong menggunakan persamaan (3). Gambar 5 memperlihatkan kurva Arrhenius tipikal yang diperoleh dengan memplot nilai $\ln dT/dt$ terhadap $1/T_{cp}$. Nilai energi aktivasi (E_a) dapat diperoleh dari kemiringan garis regresi, sementara itu nilai faktor frekuensi (QA) didapat dari perpotongan garis regresi dengan sumbu vertikal. Nilai E_a dan QA untuk semua sample diberikan dalam Tabel 2. Tampak bahwa sample gambut dan sabut kelapa sawit memiliki nilai energi aktivasi (E_a) yang lebih kecil dibandingkan dengan sampel yang lain. Hal ini memberikan indikasi awal bahwa sampel gambut dan sabut kelapa sawit akan lebih mudah bereaksi dengan oksigen.

Tabel 2. Parameter Kinetika Oksidasi

Sampel	Ukuran sisi wadah uji (cm)	T_{crit} (°C)	Energi Aktivasi, E_a (kJ/mol)	QA ($J\ kg^{-1}\ s^{-1}$)
Gambut	5x5x5	171 ± 6	44	6,59 x 10 ⁶
Sabut Kelapa Sawit	5x5x5	167.5 ± 2.5	53	3,01 x 10 ⁷
Kayu Jenjing	8x8x8	171 ± 6	113	1,62x 10 ¹⁴
Kayu Jati	8x8x8	169.5 ± 1.5	124	2,30x 10 ¹⁵



Gambar 5. Plot $\ln dT/dt$ terhadap $1000/T_{cp}$ untuk gambut (A) dan sabut kelapa sawit (B)

Tabel 3. Tabel Laju Pembangkitan Kalor

Sampel	q (kWm ³)	q_c (kWm ³)	q/q_c
Sabut Kelapa Sawit	26.34	3.17	8.30
Gambut	10.74	2.68	4.02
Kayu Jenjing	1.07	0.48	2.20
Kayu Jati	1.19	0.44	2.69

Setelah data eksperimental untuk nilai E_a dan QA diketahui maka selanjutnya kita dapat menghitung laju pelepasan kalor (q) dan nilai kritisnya (q_c) berdasarkan persamaan (1). Untuk perhitungan laju pembangkitan kalor (q) pada temperatur ambien tertentu (diambil 440 K), dapat digunakan persamaan berikut :

$$q = \frac{m}{v} \cdot QA \cdot e^{\left(\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (4)$$

dimana m sebagai massa, v sebagai volume basket uji.

Sedangkan laju pelepasan kalor kritis pada temperatur tertentu (q_c) dapat dihitung besarnya menggunakan persamaan berikut ini [6]:

$$q_c \approx \frac{2,57kRT_a^{crit2}}{\lambda^2 E_a} e^{-1,886} \quad (5)$$

dimana k sebagai konduktivitas panas, λ sebagai jarak ke titik tengah dari basket uji, dan T_a sebagai suhu kritis basket uji. Untuk perhitungan laju pelepasan kalor kritis dipilih temperatur $T_a = 440$ K.

Berdasarkan rasio nilai q/q_c yang dapat dihitung menggunakan persamaan (4) dan (5), maka dapat disusun kriteria tercapainya kondisi laju pelepasan kritikal. Kondisi kritikal untuk tercapainya pembakaran spontan pada temperatur ambien tertentu ditunjukkan apabila nilai $q > q_c$. Hasil perhitungan laju pelepasan kalor untuk semua sampel diberikan pada Tabel 3.

Jika dibandingkan nilai laju pembangkitan kalor (q) dan besarnya laju pembangkitan kalor kritikal (q_c) tampak bahwa untuk semua sampel pada temperatur $T_a = 440$ K, nilai q lebih besar dibandingkan dengan nilai q_c . Dengan demikian laju kalor yang dibangkitkan lebih besar dibandingkan dengan laju kalor kritis untuk terjadinya pembakaran spontan. Hal ini sesuai dengan hasil pengukuran temperatur yang menunjukkan bahwa semua sampel mengalami kondisi kritikal pada temperatur 440 K.

Berdasarkan nilai rasio q terhadap q_c terlihat bahwa sabut kelapa sawit memiliki nilai tertinggi (8.30), yang selanjutnya diikuti oleh gambut (4.02), kayu jenjing (2.20) dan kayu jati (2.69). Mengingat ketebalan lapisan gambut dapat mencapai kedalam lebih dari 2 meter, maka apabila lapisan gambut tersebut mengalami

penurunan kandungan air yang ekstrem (mendekati kondisi di laboratorium), dari ekstrapolasi perhitungan laju pembangkitan kalor dengan memanfaatkan data parameter kinetika oksidasi, dapat diprediksikan bahwa gambut dapat mengalami kondisi kritis pada temperatur yang relatif rendah.

4. Kesimpulan

Penelitian terhadap fenomena pembakaran spontan (*spontaneous combustion*) pada material sabut kelapa sawit, gambut dan berbagai jenis serpihan kayu yang dilakukan pada skala laboratorium dengan melakukan pengendalian parameter pengujian secara seksama, dapat membuktikan terjadinya fenomena pembakaran spontan pada sampel yang diteliti. Fenomena pembakaran spontan ditandai dengan pelepasan kandungan air yang diikuti dengan peningkatan temperatur sampel hingga terjadinya proses pembakaran (munculnya asap) apabila temperatur ambien berada dalam keadaan kritikal. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi proses pembakaran spontan pada material uji adalah temperatur, kandungan air, jenis material, ukuran wadah dan sebagainya. Namun demikian untuk dapat membuktikan bahwa hasil yang diperoleh dalam skala laboratorium dapat diekstrapolasikan menjadi skala penuh, masih perlu dilakukan simulasi di lapangan dengan mempertimbangkan kondisi sesungguhnya yang terjadi.

Ucapan Terima Kasih

Dr. Y.S Nugroho mengucapkan terima kasih kepada LPUI yang telah memberikan dana penelitian RUUI tahun 2001 sehingga memungkinkan penelitian ini dilakukan. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Dr. Ir. Bambang Hero Saharjo, Kepala Lab. Kebakaran Hutan dan Lahan, Fakultas Kehutanan IPB untuk sampel kayu yang diberikan, Lab. Mekanika Tanah Jurusan Sipil FTUI untuk sampel gambut. Penelitian ini sangat terbantu dengan antusiasme dari Sdr. Tatang dan Bowo dalam melaksanakan kegiatan eksperimen.

Daftar Acuan

- [1] B.H. Saharjo, International Symposium on Land Use Change and Forest Management for Mitigation

- of Disaster and Impact of Climate Change, Indonesian Association of Agriculture Meteorology, Bogor, 1999, p.1.
- [2] R.D.Hungerford, W.H. Frandsen, K.C. Ryan, Proceedings of the 19th Tall Timbers Fire Ecology Conference, Florida, 1993, p. 78.
- [3] D. Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, Wiley, New York, 1985, p. 186.
- [4] A.A. Nuruddin, M.S.M. Yusof, Forest Fire Proceeding International Cross Sectoral Forum on Forest Fire Management in South East Asia, Bappenas, Jakarta, 1998, p.308.
- [5] Y.S. Nugroho, A.C. McIntosh, B.M. Gibbs, Fuel 79 (2000) 1951.
- [6] Y.S. Nugroho, A.C. McIntosh, B.M. Gibbs, Proceedings of Combust. Inst. 28 (2000) 2321.
- [7] Y.S. Nugroho, A.C. McIntosh, B.M. Gibbs, Proc. Combust. Inst., Pittsburgh 27 (1998) 2981.
- [8] P.C. Bowes, Self-heating: Evaluating and Controlling the Hazards, Her Majesty's Stationary Office, 1984, p. 328.
- [9] J.N. Carras, B.C. Young, Progress in Energy and Combustion Science 20 (1994) 1.
- [10] X.D. Chen, L.V. Chong, Transaction of Institution of Chemical Engineers Part B 73 (1995)101.
- [11] K.K. Bhattacharyya, Fuel 51 (1972) 214
- [12] X.D. Chen, J.B. Stott, Fuel 72 (1993)787.
- [13] J.C. Jones, S.C. Raj, Fuel 67 (1988)1208.
- [14] B.F. Gray, J.F. Griffiths, S.M. Hasko, Journal of Chemical Technology & Biotechnology 34A (1984) 453.

