

Penelitian Terhadap Pengaruh Zat Tahan Api Berbasis Halogen Terhadap Sifat Mampu Bakar Dari Komposit Serat Karbon Menggunakan Kalorimeter Kerucut

Muhammad Andira Mulia Siregar
Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri
Institut Sains dan Teknologi Nasional
Jl. Moh Kahfi II, Jagakarsa, Jakarta 12640 - Indonesia

Abstrak

Dewasa ini, material komposit banyak digunakan dalam berbagai aplikasi karena memiliki sifat mekanik yang lebih bagus dari pada logam, memiliki kekuatan pembentukan yang tinggi, memiliki ketahanan yang baik, memiliki kekuatan jenis dan kekakuan jenis (modulus Young) yang lebih tinggi daripada logam. Namun demikian, material komposit rentan terhadap degradasi termal pada temperatur tinggi. Oleh karena itu, penelitian dalam tesis ini bertujuan untuk meningkatkan ketahanan termal dan sifat mampu bakar material komposit dengan mencampurkan zat tahan api berbasis halogen jenis *brominated bisphenol A* ke dalam material komposit serat karbon dengan dua variasi densitas serat, yaitu 200 dan 240 gr/m². Penelitian yang dilakukan berbasis pada eksperimen skala laboratorium menggunakan kalorimeter kerucut. Fenomena pembakaran yang terjadi adalah *piloted ignition* dengan fluks kalor pembakaran dibatasi sampai dengan 25 kW/m². Hasil penelitian menunjukkan bahwa sampel komposit serat karbon terbakar karena vaporisasi dari resinnya, sedangkan serat karbonnya sendiri hanya mengalami pengarangan (*charring*). Eksperimen pada fluks kalor 21,12 kW/m², menunjukkan bahwa keberadaan kandungan *brominated bisphenol A* di dalam sampel komposit serat karbon mampu menekan puncak laju produksi kalor dari sekitar 125 kW/m² menjadi hanya sekitar 80 kW/m². Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa kandungan zat tahan api (*fire retardant*) mampu menunda waktu penyalaan api pembakaran dan memberikan ketahanan termal yang lebih baik kepada material komposit.

KATA KUNCI: Zat tahan api, kalorimeter kerucut, komposit serat karbon, laju produksi kalor, analisis termal.

Abstract

Nowadays, carbon fiber reinforced epoxy-acrylate composite (CFRE) is used in various applications such as in aircraft and industrial applications including pressure vessels, civil engineering/construction-related uses, ship manufacturing, and automobile. That is because of its characteristics such as lightweight and high-strength. Nevertheless CFRE is very easy to be burned after preheating in a low heat flux, moreover with the presence of an external energy source. Hence, this study aimed to find out the effects of brominated bisphenol A as fire retardant agent on fire retardancy of CFRE using cone calorimeter with a spark igniter as a trigger to represent an amount of external energy source. Carbon fibers used in this study have density of 200 gr/m² and 240 gr/m². The parameter studied in this research includes density of carbon fiber, time to ignition, heat release rate and density of smoke production. In this initial work, the heat flux was limited up to 25 kW/m² with piloted ignition. The measured temperatures of CFRE's ignition range from 450°C to 575°C

at atmospheric pressure. The initial result shows that the ignition of CFRE is strongly depend on the density of carbon fiber, the existing of an external energy source and the condition of gas mixture. For the density of of 200 gr/m², CFRE starts to ignite under heat flux of 14.2 kW/m² with peak heat release rate of 163.4 kW/m². While for the density of of 240 gr/m², CFRE starts to ignite under heat flux of 16.7 kW/m² with peak heat release rate of 98 kW/m². Combustion mechanism of CFRE started when a spark igniter is turned on after preheating at a certain sufficient heat flux, causing a flaming condition on the surface of CFRE. Next, vaporization of its resin causing a sustain flaming condition until reaching a decay period. When it burned, the resin vapor is forced out of the fiber pores, causing the material to swell and increased its volume. The effects of brominated bisphenol A as fire retardant agent in the CFRE give a significant impact to fire retardancy of the CFRE, especially in time to ignition and heat release rate aspect.

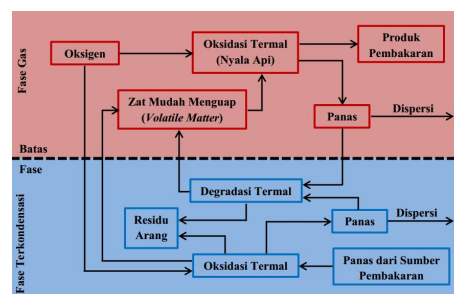
KEYWORDS: *Fire retardant, cone calorimeter, carbon fiber composite, heat release rate, thermal analysis*

1. Pendahuluan

Penelitian ini didasari oleh data yang menunjukkan pentingnya melakukan investigasi terkait bahaya kebakaran pada material komposit serat karbon (*carbon fiber*) yang sekarang ini banyak digunakan untuk berbagai aplikasi. Seperti penggunaan material komposit serat karbon pada pesawat terbang. Penelitian dari Quintiere et al. [5] menunjukkan terjadinya kebakaran akibat suatu energi eksternal pada pesawat Boeing 787 Dreamliner (Pesawat canggih pertama yang sebagian besar penyusunnya berupa material komposit serat karbon yang diperkuat oleh plastik dengan volume mencapai 80 % dari volume total pesawat. Secara khusus penelitian tersebut menggunakan material yang dibuat oleh *Toray Composites* untuk Boeing dengan spesifikasi bahan (BMS) 8-276.

Sifat fisik komposit akan berubah selama pemanasan yang diikuti oleh penguapan resin, karena komposit mengembang sebagai reaksi dari keberadaan tekanan internal. Pertama, *bulk density* material berkurang, maka pori-pori akan terbentuk, dan akhirnya konduktivitas termal dari matriks serat karbon menurun. Terjadinya proses pembakaran akan mempengaruhi performa

dari material serat karbon, dimana material serat karbon akan mengalami pengurangan/degradasi kekuatan setelah mengalami pemanasan/pembakaran. Proses vaporisasi dari resin secara terus-menerus akan menyebabkan munculnya api dalam proses pembakaran, sementara itu sisa arang dan karbon dapat terbakar juga karena oksidasi permukaan (*smoldering*) dan bahkan menghasilkan suatu api karbon monoksida di dekat permukaan yang teroksidasi. Biasanya pembakaran pada permukaan material komposit memerlukan temperatur tinggi untuk mempertahankan nyala api pembakaran, dimana temperaturnya melebihi 500°C [5].

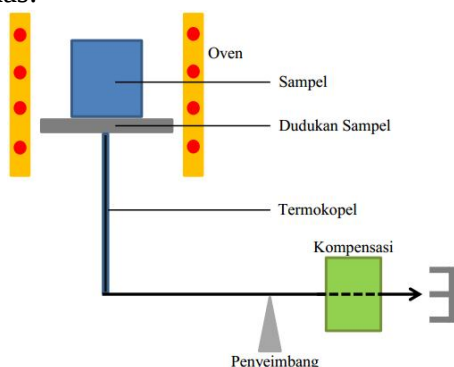


Gambar 1. Skema umum proses pembakaran komposit serat karbon

Gambar 1 menunjukkan bahwa proses pembakaran dimulai ketika pemanasan dari

komposit menghasilkan zat-zat mudah menguap (*volatile matters*). Jika zat-zat yang dihasilkan tersebut memiliki konsentrasi yang cukup, sesuai dengan kondisi batas nyala, dan berada dibawah temperatur penyalaan, maka proses dimulainya pembakaran sedang terjadi. Pada tahap ketiga, disebut sebagai periode pembakaran, molekul-molekul kecil/mudah menguap (*volatile matters*). yang dihasilkan pada langkah sebelumnya bergabung dengan oksigen dan terbakar, menghasilkan asap dan panas. Pada tahap ke empat, panas yang dihasilkan pada tahap ketiga sebagian kembali ke komposit (*feedback step*) dan siklus terus terjadi hingga seluruh komposit terbakar.

Metode yang sering dan hampir pasti digunakan untuk menganalisis sifat mampu bakar komposit serat karbon adalah dengan analisis termogravimetri (lihat Gambar 2). Analisis termogravimetri (TGA) adalah jenis pengujian yang dilakukan pada sampel untuk menentukan perubahan massa-susut (*mass loss*) atau pengurangan diferensial dari massa suatu material dalam kaitannya dengan perubahan temperatur. Analisis tersebut bergantung pada tingkat presisi yang tinggi dalam tiga pengukuran: berat, temperatur (T), dan perubahan temperatur (ΔT). Metode TGA yang paling banyak dipakai didasarkan pada pengukuran berat yang kontinu terhadap neraca/penyeimbang sensitif disebut neraca panas.



Gambar 2. Skema pengujian termogravimetri.

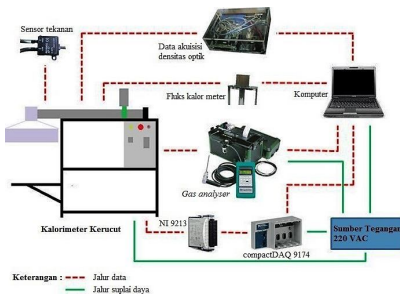
2. Metodologi Penelitian

Menurut eksperimen Spearpoint, M. J., dan Quintiere, J. G., pembakaran sampel dilakukan pada empat variasi fluks kalor (25, 35, 50 dan 75 kW/m²). Merujuk pada metode tersebut dan penyesuaian dengan kondisi alat eksperimen pada laboratorium, maka pada penelitian kali ini enam variasi fluks kalor yang digunakan adalah sebagai berikut : 12.22 kW/m², 14.15 kW/m², 16,66 kW/m², 18.45 kW/m², 21,12 kW/m², and 23.61 kW/m². Dalam tahap awal dimulainya proses eksperimen, pemanas berada dalam kondisi terbuka terhadap sampel uji selama dilakukannya pengaturan temperatur pemanasan.

Proses pembakaran masing-masing sampel dilakukan mulai dari temperatur terendah terlebih dahulu (450°C) ke temperatur tertinggi (575°C). Hal ini dilakukan dengan alasan efisiensi pencapaian stabilitas temperatur pemanasan yang diinginkan dan efektifitas waktu eksperimen, dimana temperatur lebih cepat mencapai titik yang diinginkan ketika dinaikkan dari temperatur rendah ke temperatur tinggi dibandingkan menurunkan temperatur dari temperatur tinggi ke temperatur rendah.

2.1. Konfigurasi Alat Eksperimen

Untuk nilai perbedaan tekanan yang terjadi di pelat orifice selama eksperimen berjalan, data pengukuran dicatat secara manual sesuai dengan tahapan proses yang terjadi. Dari semua penjelasan mendetail tentang konstruksi dan komponen dari alat eksperimen yang digunakan dalam penelitian ini, maka dilakukanlah suatu konfigurasi akhir dari sistem perangkat alat eksperimen yang terdiri dari konfigurasi jalur pengambilan data dan jalur suplai daya. Gambar 3 berikut ini menunjukkan konfigurasi dari keseluruhan sistem alat eksperimen.

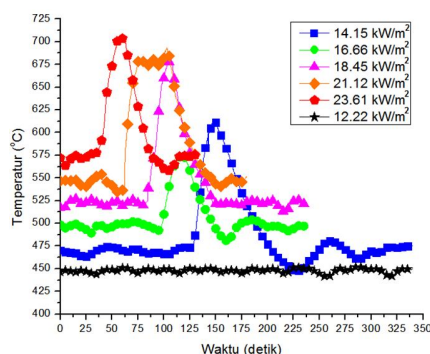


Gambar 3. Konfigurasi dari alat eksperimen.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Perbandingan Temperatur Nyala Api Pemakaran Komposit Serat Karbon

Analisis terhadap aspek nyala api pembakaran dari karakteristik sifat mampu bakar komposit serat karbon dilakukan berdasarkan dinamika temperatur yang diukur menggunakan termokopel tipe K. Sampel komposit serat karbon berada pada temperatur ambien saat kondisi awal pengukuran. Dinamika temperatur nyala api pembakaran menjadi salah satu aspek penting dalam mengevaluasi sifat mampu bakar dari material komposit serat karbon. Hal ini dikarenakan dinamika temperatur nyala api dapat dijadikan patokan utama untuk menentukan kapan proses pembakaran material sampel komposit yang ditandai oleh munculnya nyala api pembakaran pertama kali terjadi. Ekperimen pertama menunjukkan bahwa sampel komposit serat karbon belum terbakar pada fluks kalor $12,22 \text{ kW/m}^2$ (Gambar 4).

Gambar 4. Perbandingan temperatur nyala api pembakaran sampel komposit serat karbon dengan densitas 200 gr/m^2

Gambar 4 menunjukkan bahwa pada fluks kalor $12,22 \text{ kW/m}^2$, reaksi kimia yang mengakibatkan terjadinya suatu penyalan belum terjadi karena energi aktivasi untuk mengakibatkan terjadinya penyalan komposit serat karbon belum dapat terlewati oleh energi termal yang diberikan pemanas kerucut. Dengan kata lain, kalor yang dibangkitkan (*heat generated*) dari pemanasan sampel komposit serat karbon belum mampu melewati kalor yang hilang (*heat loss*) ke lingkungan. Ketika konsumsi oksigen dari proses pembakaran sudah hampir berakhir dan percampuran udara-bahan bakar belum juga cukup panas, maka proses penyalan tidak akan pernah terjadi. Kondisi inilah yang terjadi pada proses eksperimen dengan pemanasan konstan dengan fluks kalor $12,22 \text{ kW/m}^2$ (Gambar 9).

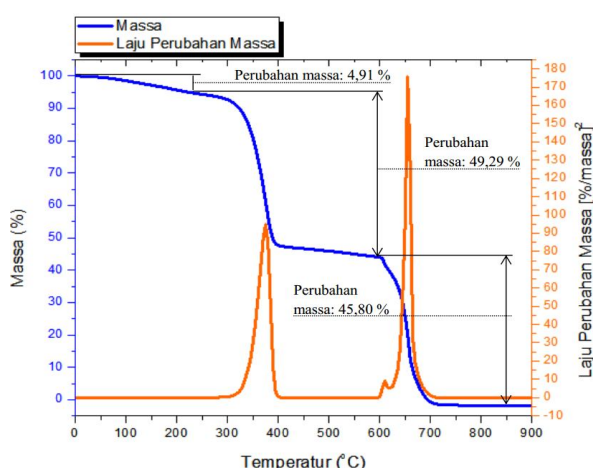
Untuk meninjau lebih lanjut batas energi minimum yang dibutuhkan untuk mengakibatkan fenomena nyala api pembakaran pada sampel komposit serat karbon, maka fluks kalor eksperimen dinaikkan menjadi $14,15 \text{ kW/m}^2$ dengan data hasil pengukuran temperatur nyala api pembakaran sampel komposit serat karbon ditunjukkan oleh Gambar 9. Grafik dinamika temperatur nyala api dengan fluks kalor $14,15 \text{ kW/m}^2$ pada Gambar 9 memperlihatkan pola grafik yang tidak datar secara konsisten. Terdapat kemiringan naik dan turun pada suatu titik waktu pemanasan yang menandakan bahwa terjadi proses penyalan dari sampel komposit serat karbon pada pancaran fluks kalor yang konstan sebesar $14,15 \text{ kW/m}^2$.

Dari Gambar 4 terlihat bahwa kemiringan naik dari grafik yang menandakan dimulainya proses penyalan sampel komposit serat karbon dengan fluks kalor $14,15 \text{ kW/m}^2$ dimulai setelah dilakukan pemanasan yang konstan selama 128,8 detik. Fenomena dinamika temperatur nyala api yang sama juga terjadi pada eksperimen pembakaran sampel komposit serat karbon

pada 4 variasi fluks kalor lainnya, yaitu : 16,66 kW/m²; 18,45 kW/m²; 21,12 kW/m²; dan 23,61 kW/m². Temperatur nyala api maksimum yang dicapai dalam eksperimen adalah sekitar 712 °C pada fluks kalor tertinggi (23,61 kW/m²).

3.2. Analisis Termogravimetri (TGA)

Analisis termogravimetri (TGA) dilakukan pada sampel komposit serat karbon untuk menentukan perubahan massa-susut (*mass loss*) atau pengurangan diferensial dari massa suatu material dalam kaitannya dengan perubahan temperatur. Analisis TGA bergantung pada tingkat presisi yang tinggi dalam tiga pengukuran: massa, waktu, dan temperatur. TGA dipakai terutama untuk menetapkan stabilitas panas dari komposit serat karbon. TGA juga dapat memberikan data komposisi dari sampel komposit berdasarkan titik uap dari masing-masing zat yang terkandung di dalam komposit. Dalam proses pengerjaan analisis TGA diperlukan suatu wadah tempat sampel yang tahan terhadap temperatur tinggi, yang disebut *crucible*. Material *crucible* yang digunakan pada pengujian termogravimetri ini adalah Al₂O₃. Gambar 5 berikut ini menunjukkan hasil analisis TGA untuk sampel komposit serat karbon tanpa zat tahan api (200 gr/m²).



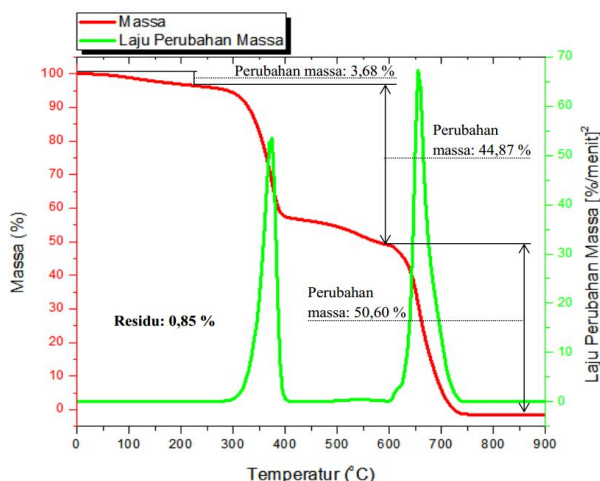
Gambar 5. Hasil termogravimetri untuk sampel komposit serat karbon tanpa zat tahan api dengan densitas 200 gr/m².

Dari Gambar 5 terlihat bahwa analisis TGA dari sampel komposit dilakukan dalam dua atmosfer, yaitu atmosfer inert menggunakan gas nitrogen (N₂) dan atmosfer non-inert menggunakan gas oksigen (O₂) dengan masing-masing laju aliran gas adalah 20 mL/menit. Dalam atmosfer nitrogen degradasi termal dari komposit serat karbon tanpa zat tahan api (200 gr/m²) terjadi dengan dua langkah (*multiple step*), atau dengan kata lain terjadi dua kali degradasi termal. Degradasi termal yang pertama terjadi pada zat-zat mudah menguap (*volatile matter*) termasuk air (H₂O) dengan pengurangan massa 4,91 %. Kemudian polimer dari komposit serat karbon mulai terdegradasi pada temperatur sekitar 350 °C dengan pengurangan massa 49,29 %.

Setelah itu dilakukan pengujian dalam kondisi atmosfer non-inert dengan memasukkan gas oksigen yang menyebabkan terjadinya degradasi termal satu langkah (*single step*). Pada atmosfer oksigen ini, terjadi degradasi termal terhadap karbon pirolitik yang dimulai pada temperatur 600 °C dengan pengurangan massa 45,80 %. Proses pengujian dengan memasukkan gas oksigen menyebabkan terjadinya proses pembakaran habis terhadap sampel komposit, sehingga pada proses akhir yang tersisa dari pengujian hanyalah abu (*ash*) dari sampel komposit serat karbon. Grafik pada Gambar 14 juga menunjukkan laju perubahan massa dari sampel komposit serat karbon tanpa zat tahan api (200 gr/m²) selama proses pengujian yang didapat dari diferensiasi grafik penurunan massa terhadap temperatur.

Hasil analisis TGA sampel komposit serat karbon dengan zat tahan api *brominated bisphenol A* (200 gr/m²) dapat dilihat pada Gambar 6. Terlihat bahwa dalam atmosfer nitrogen degradasi termal dari komposit serat karbon tahan api (200 gr/m²) terjadi dengan dua langkah (*multiple step*). Degradasi termal yang pertama terjadi pada zat-zat mudah menguap (*volatile matter*) termasuk air

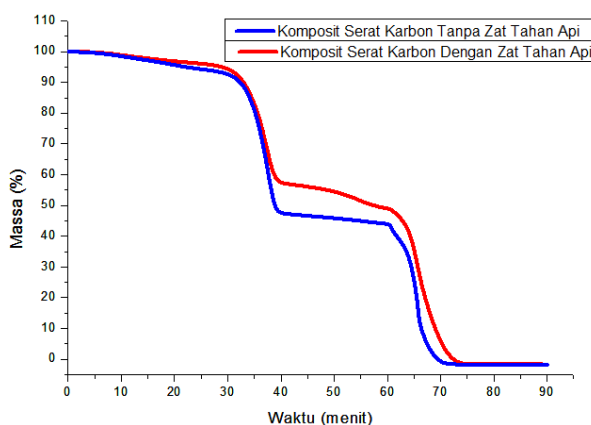
dengan pengurangan massa 3,68 % pada temperatur 100 °C. Kemudian polimer dari komposit mulai terdegradasi pada temperatur sekitar 350 °C dengan pengurangan massa 44,87 %.



Gambar 6. Hasil termogravimetri untuk sampel komposit serat karbon dengan zat tahan api dengan densitas 200 gr/m².

Gambar 6 juga menunjukkan laju perubahan massa dari sampel komposit serat karbon tahan api (200 gr/m²). Dari grafik laju pengurangan massa ini, terlihat bahwa kondisi pirolisis dengan atmosfer gas nitrogen menghasilkan kehilangan massa yang lebih rendah dibandingkan proses oksidasi karbon dalam atmosfer gas oksigen dengan laju perubahan massa yang juga lebih rendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses oksidasi yang terjadi pada temperatur lebih tinggi cenderung menghasilkan laju pengurangan massa yang lebih cepat.

Untuk melakukan analisis yang lebih detail terkait pengaruh kandungan zat tahan api *brominated bisphenol A* di dalam komposit serat karbon, maka dilakukan perbandingan langsung dari hasil analisis TGA untuk sampel komposit tanpa zat tahan api dengan sampel komposit tahan api seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7 berikut ini.



Gambar 7. Perbandingan analisis termogravimetri antara sampel komposit serat karbon tanpa dan dengan zat tahan api.

Grafik pada Gambar 7 menunjukkan bahwa terbentuk pola yang sama untuk analisis TGA dari sampel komposit dengan dan tanpa zat tahan api. Pengaruh pemberian zat tahan api dapat terlihat jelas pada dibutuhkannya waktu yang lebih lama untuk mengakibatkan degradasi termal pada sampel komposit tahan api untuk setiap tahapan degradasi yang terjadi. Hal ini menunjukkan bahwa *brominated bisphenol A* dapat menunda waktu terjadinya degradasi termal. Dengan korelasi antara waktu dan temperatur yang berbanding lurus, kondisi ini juga mengartikan diperlukannya temperatur lebih tinggi untuk mengakibatkan degradasi termal pada sampel komposit tahan api.

3.3. Analisis Kromatografi (GCMS)

Analisis kromatografi dilakukan dengan *Gas Chromatography Mass Spectrometry* (GCMS). Pengujian kromatografi menggunakan analisis GCMS dilakukan dengan menggunakan sampel resin sebanyak $\pm 0,5$ mg dan dimasukkan ke dalam *pyrolizer* dengan kondisi temperatur 550 °C selama 1 menit. Kondisi atmosfer inert yang digunakan dalam analisis GCMS dihasilkan menggunakan gas nitrogen.

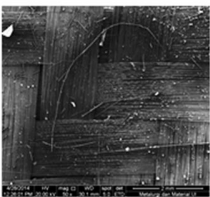
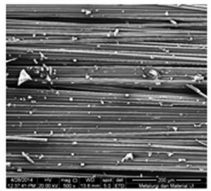
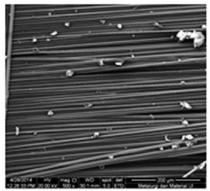
Berdasarkan hasil pengujian GCMS, sampel resin biasa R 802 tidak menunjukkan adanya senyawa tahan api golongan halogen

atau golongan lainnya. Sedangkan sampel resin S 510 menunjukkan keberadaan beberapa kandungan senyawa dari golongan halogen (brom) yang teridentifikasi sebagai senyawa tahan api (*fire retardant*) ataupun fragmentasi dari senyawa tahan api. Hal inilah yang menyebabkan sampel komposit serat karbon yang mengandung zat tahan api berbasis halogen memiliki ketahanan termal yang lebih baik (lebih sulit terdegradasi) dan lebih sulit terbakar dibandingkan sampel komposit serat karbon biasa.

3.4. Analisis Morfologi dan Pengujian SEM

Komposit serat karbon umumnya terbakar karena vaporisasi dari resinnya. Hal ini dikarenakan vaporisasi resin dari komposit serat karbon dapat menyebabkan terjadinya fenomena *pilot flame* (kondisi dimana sejumlah energi eksternal dapat menimbulkan nyala api pembakaran) setelah fase pemanasan awal pada fluks kalor rendah. Proses pembakaran resin akan memaksa uap hasil pemanasan resin keluar dari pori-pori serat karbon. Sedangkan serat karbonnya sendiri hanya mengalami pengarang dengan bentuk fisik yang hampir sama dengan bentuk fisik sebelum eksperimen.

Tabel 1. Perbedaan hasil SEM dari sampel komposit dengan zat tahan api.

Perbesaran	Sampel Komposit Serat Karbon Dengan Zat Tahan Api	
	Densitas 200 gr/m ²	Densitas 240 gr/m ²
50 ×		
500 ×		

Hasil pengujian SEM jelas menunjukkan bahwa sampel komposit serat karbon, baik dengan zat tahan api maupun tanpa zat tahan api, tidak habis terbakar ketika pengujian pembakaran menggunakan kalorimeter kerucut dilakukan. Kondisi ini jelas mempertegas bahwa vaporisasi dari resin merupakan penyebab utama dari terbakarnya sampel komposit. Serat karbon sendiri cenderung mempertahankan strukturnya, namun tetap mengalami degradasi termal yang menghasilkan residu karbon. Dari Tabel 1 terlihat struktur seperti serpihan kecil diatas permukaan serat karbon. Struktur ini merupakan bukti bahwa selama proses pembakaran terjadi, serat karbon mengalami proses *charring* (menjadi arang). Terbentuknya lapisan arang pada permukaan sampel komposit selama pembakaran justru dapat membatasi proses dekomposisi termal karena menghambat interaksi termal antara api dan lapisan serat karbon dibawahnya.

4. Kesimpulan

Dari keseluruhan penelitian tentang pengaruh zat tahan api berbasis halogen terhadap sifat mampu bakar dari komposit serat karbon menggunakan kalorimeter kerucut, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kandungan zat tahan api golongan halogen *brominated bisphenol A* di dalam komposit serat karbon memberikan efek yang positif terhadap sifat mampu bakar dari material komposit, terutama dapat meningkatkan ketahanan termal yang lebih baik dengan menunda terjadinya proses degradasi termal.
2. api dapat menekan total energi termal yang dikeluarkan selama proses pembakaran terjadi.
3. Kandungan zat tahan api di dalam komposit serat karbon cenderung mengakibatkan nilai puncak densitas optik asap pembakaran semakin tinggi.

4. Hasil analisis kromatografi menunjukkan sampel resin biasa tidak menunjukkan adanya senyawa tahan api golongan halogen atau golongan lainnya. Sedangkan sampel resin tahan api menunjukkan keberadaan beberapa kandungan senyawa dari golongan halogen (brom) yang teridentifikasi sebagai senyawa tahan api (*fire retardant*) ataupun fragmentasi dari senyawa tahan api.
5. Komposit serat karbon terbakar karena vaporisasi dari resinnya, sedangkan serat karbonnya sendiri hanya mengalami pengarangan (*charring*) dengan bentuk fisik yang hampir sama dengan bentuk fisik sebelum eksperimen.
6. Kandungan zat tahan api di dalam komposit serat karbon memberikan efek yang positif terhadap sifat mekanik material dengan meningkatkan kekuatan tarik dari material komposit.

Referensi

- [1] Babrauskas, V., & Twilley, W.H. (1988). *User's Guide for the Cone Calorimeter*. National Bureau of Standards (NBS) Special Publication 745.
- [2] Baum, H., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., McGrattan, K., Mell, W., & Rehm, R. (2010). *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide – Volume 1: Mathematical Model*. NIST Special Publication 1018 – 5. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology.
- [3] Drysdale, D. (2004). *An Introduction to Fire Dynamics*. Second Edition. John Wiley & Sons.
- [4] Siregar, M.A.M. (2012). *Penelitian Sifat Penyalaan Mandiri dari Minyak Pelumas Menggunakan Kalorimeter Kerucut*. Program Studi Teknik Mesin Universitas Indonesia.
- [5] Quintiere, J.G., Walters, R.N., & Crowley, S. (2007). *Flammability Properties of Aircraft Carbon-Fiber Structural Composite*. Air Traffic Organization Operation Planning Office of Aviation Research and Development. U.S. Department of Transportation. Wahington, DC.
- [6] Peraturan Daerah (Perda) DKI Jakarta No. 3 Tahun 1992 Pasal 23 dan 24.
- [7] Drysdale, D., & Kuang-Chung, T. (2001). *Using cone calorimeter data for the prediction of fire hazard*. Fire Safety Journal.
- [8] Staggs, J.E.J. (2009). *Convection heat transfer in the cone calorimeter*. Fire Safety Journal.
- [9] *Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter*. (2004). Designation: E 1354 – 04a. An American National Standard. ASTM International.
- [10] Babrauskas, V., & Quincy, M.A. (2002). *Heat Release Rates – SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Third Edition. National Fire Protection Association (NFPA).
- [11] Lattimer, B.Y., & Quincy, M.A. (2002). *Heat Fluxes from Fires to Surfaces - SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Third Edition. National Fire Protection Association (NFPA).
- [12] Mulholland, G.W., & Quincy, M.A. (2002). *Smoke Production and Properties - SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Third Edition. National Fire Protection Association (NFPA).
- [13] Heskestad, G., & Quincy, M.A. (2002). *Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment - SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Third

- Edition. National Fire Protection Association (NFPA).
- [14] Kuang-Chung, T. (2009). *Orientation effect on cone calorimeter test results to assess fire hazard of materials*. Journal of Hazardous Materials.
- [15] Apriano, T. (2012). *Perancangan Sistem Pendeteksi Asap Tipe Fotoelektrik Berbasis Micro Controller dan Aplikasinya Dalam Pengukuran Optical Density*. Program Studi Teknik Mesin Universitas Indonesia.
- [16] Babrauskas, V. (1982). *Development of the Cone Calorimeter—A Bench Scale Heat Release Rate Apparatus Based on Oxygen Consumption*. NBSIR 82-2611. National Bureau of Standards.
- [17] Babrauskas, V. (1991). *Effective Measurement Techniques for Heat, Smoke, and Toxic Gases*. Fire Safety Journal, Vol 17 pp. 13–26.
- [18] Janssens, M. (1995). *Calorimetry*. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 2nd Edition. pp. 3–16 through 3–36.
- [19] Tordella, J., & Twilley, W.H. (1983). *Development of a Calorimeter for Simultaneously Measuring Heat Release and Mass Loss Rates*. NBSIR 83 2708. National Institute of Standards and Technology.