

Penelitian Sifat Termal dan Mekanik Komposit Serat Karbon

Fadhil¹, Muhammad Andira Mulia Siregar², Sugeng Supriadi³, Yulianto S Nugroho⁴

^{1,2,3,4,5}Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Kampus UI Depok 16424, Indonesia

e-mail : fadhil.ingenieur10@gmail.com¹, sugeng@eng.ui.ac.id³, yulianto@eng.ui.ac.id⁴

Abstrak

Dewasa ini penggunaan material komposit serat karbon mulai banyak digunakan dalam berbagai sektor industri karena memiliki sifat-sifat yang mampu memenuhi tuntutan teknologi, seperti ringan, tahan fatik, dan tahan terhadap temperatur tinggi. Penelitian terhadap performa komposit serat karbon baik termal dan mekanik masih jarang dilakukan. Oleh karena itu dilakukanlah pengujian untuk mengetahui hal tersebut. Komposit serat karbon yang digunakan memiliki variasi densitas berbeda yaitu 200 dan 240 gr/m²

Metode yang digunakan dalam penelitian ini berbasis pada kalorimeter kerucut. Pembakaran dilakukan pada nilai fluks kalor maksimum 23,61 kW/m² dan minimum 14,15 kW/m². Pada penelitian ini juga dilakukan pengujian tarik dan SEM untuk mengetahui sifat mekanik dari komposit serat karbon. Hasil dari penelitian ini menunjukkan semakin tinggi fluks kalor, maka laju produksi kalor dari pembakaran komposit serat karbon juga meningkat dimana laju produksi maksimum yang dicapai bernilai 160-170 kW/m². Sementara itu dari pengujian mekanik didapatkan bahwa material komposit serat karbon memiliki sifat diantara ulet dan getas.

Kata kunci : Komposit serat karbon, sifat termal, sifat mekanik, fluks kalor, laju produksi kalor.

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. [4] 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).



Gambar 1. Kebakaran KRI Klewang milik TNI AL di Ketapang, Banyuwangi

Selain itu, di Indonesia juga terjadi kebakaran pada kapal KRI Klewang milik TNI AL di Ketapang,

Banyuwangi pada tanggal 28 September 2012. Kapal yang diklaim berteknologi tinggi ini dibuat dari 100 % bahan komposit karbon yang tidak mampu terdeteksi radar. Menurut Kepala Staf Tentara Nasional Indonesia Angkatan Laut Laksamana Soeparmo dugaan sementara terjadinya kebakaran akibat hubungan arus pendek atau korsleting listrik. Akibat kebakaran ini negara mengalami kerugian sebesar 114 miliar rupiah.

2. Dasar Teori

2.1 Komposit

Material komposit tersusun atas 2 (dua) bagian yang berbeda yaitu matrik dan penguat. Matrik memiliki sifat ulet, sementara itu penguat umumnya memiliki kekuatan lebih tinggi dari pada matrik, sehingga disebut fasa penguat (*reinforcing phase*). Komposit yang digunakan dalam penelitian ini adalah serat karbon yang termasuk dalam komposit polime dengan matriks yang digunakan adalah vinyl ester.

2.2 Waktu penyalaan

Salah satu parameter terpenting dalam penelitian kemampubakaran komposit serat karbon adalah waktu penyalaan (*time to ignition*). Parameter waktu penyalaan dapat mewakili seberapa lama suatu komposit mampu bertahan terhadap nilai fluks kalor tertentu yang diberikan oleh sumber panas (misalnya pemanas konikal) dengan atau tanpa pemberian

sejumlah energi eksternal (misalnya dengan menggunakan pemantik elektrik) sampai pada akhirnya nyala api pembakaran muncul akibat dapat dilampauinya energi aktivasi pembakaran oleh energi yang diberikan pemanas ditambah sumber energi eksternal sebagai pemantik

2.3 Laju Produksi Kalor

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengukur besarnya HRR adalah dengan pengukuran konsumsi oksigen pada kalorimeter kerucut. Metode ini berdasarkan fakta bahwa kalor pembakaran dari bahan bakar secara umum adalah konstan jika dihubungkan dengan konsumsi oksigen atau udara. Teknik pengukuran HRR berdasarkan konsumsi oksigen mengacu pada prinsip dasar bahwa kalor yang dilepaskan per unit oksigen yang dibutuhkan adalah kurang lebih sama untuk bahan bakar organik yang sering ditemui sebagai bahan bakar dalam suatu kejadian kebakaran, dengan nilai sebesar 13,1 kJ/g O₂ [Hugget, 1980]. Apabila proses pembakaran terjadi secara sempurna (produk pembakarannya hanya uap air dan karbondioksida), maka laju pelepasan kalor (\dot{Q}_c) dapat dihitung dengan per.1 :

$$\dot{Q}_c = (0,21 - \eta_{O_2}) \cdot V \cdot 10^3 \cdot \rho_{O_2} \Delta H_{c,ox} \quad (1)$$

dimana, V adalah laju aliran volumetrik udara (m³/s), ρ_{O_2} merupakan massa jenis oksigen(kg/m³) pada temperatur dan tekanan normal, dan η_{O_2} adalah fraksi mol oksigen. Persamaan apabila diturunkan akan menjadi per.2 :

$$q = (13,1 \times 10^3) \cdot 1,10 \cdot C \sqrt{\frac{\Delta P}{Te} \frac{(X_{O_2} - X_{O_2})}{(1,105 - 1,5 X_{O_2})}} \quad (2)$$

dimana :

- q = laju pelepasan kalor (kW)
- C = konstanta radiasi untuk analisis konsumsi O₂ (m^{1/2} kg^{1/2} K^{1/2})
- ΔP = Jatuh tekanan (*pressure drop*) saat melewati pelat orifice (Pa)
- X_{O_2} = Fraksi mol terukur dari O₂ di dalam udara pembuangan
- Te = Temperatur gas pada pelat orifice (K)

2.4 Pengujian Tarik

Prinsip pengujian ini yaitu dengan memberikan tegangan aksial berupa tarikan pada kedua ujung benda hingga putus. Pada uji tarik, ujung-ujung benda uji dibentuk dengan ukuran tertentu dijepit dengan kuat dengan salah satu ujungnya dihubungkan dengan alat pengukur beban, sedangkan ujung yang satu lagi dengan alat penarik. Kemudian benda uji ditarik dengan beban kontinu sambil diukur pertambahan panjangnya. Spesimen dibagian tengah dibuat lebih kecil dari luas penampang, agar patahan terjadi pada bagian tengah.

Pers.3 dan 4 yang digunakan untuk menghitung tegangan dan regangan adalah berikut ini :

$$\sigma = \frac{F}{A_o} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{L - L_o}{L_o} \quad (4)$$

3. Metodologi Penelitian

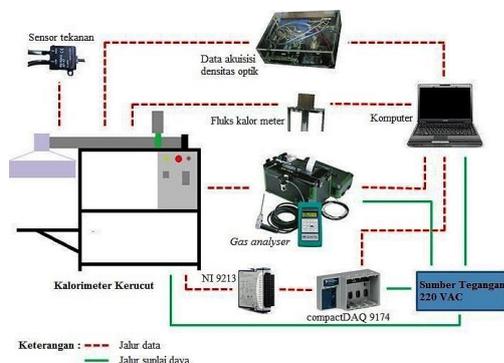
Proses pembakaran masing-masing sampel dilakukan mulai dari temperatur terendah terlebih dahulu (475°C) ke temperatur tertinggi (575°C) dari eksperimen. Hal ini dilakukan dengan alasan efisiensi pencapaian stabilitas temperatur pemanasan yang diinginkan dan efektifitas waktu eksperimen, dimana temperatur lebih cepat mencapai titik yang diinginkan ketika dinaikkan dari temperatur rendah ke temperatur tinggi dibandingkan menurunkan temperatur dari temperatur tinggi ke temperatur rendah.

Pemantik elektrik (*electrical spark igniter*) dinyalakan setiap interval 10 detik sejak dimulainya pemanasan sampel oleh *conical heater*, dimana gas-gas *volatile* hasil pemanasan sudah mulai terlihat. Pemantik elektrik terus dinyalakan sebanyak tiga kali sampai campuran uap bahan bakar dan udara sudah terbakar dan menimbulkan nyala api pada permukaan sampel. Ketika sampel sudah terbakar, maka aliran tegangan yang diberikan ke pemantik elektrik dimatikan dan pemantik elektrik ditarik keluar dari zona reaksi untuk mengurangi sumber energi tambahan terhadap pembakaran sampel serta mencegah elektroda pemantik juga ikut terbakar sehingga dapat mempengaruhi data pembakaran sampel uji. Apabila sampel tidak juga terbakar, maka sampel uji tetap dibiarkan dan akan dilakukan pemantikan lagi 10 detik kemudian. Jika nyala api padam dalam waktu kurang dari 60 detik setelah pemantik elektrik dimatikan, pemantik elektrik dimasukkan kembali untuk menyalakan api pembakaran. Apabila nyala api kembali mati, maka eksperimen dihentikan dan diulang lagi menggunakan sampel yang baru.

3.1 Konfigurasi Alat Ekperimen

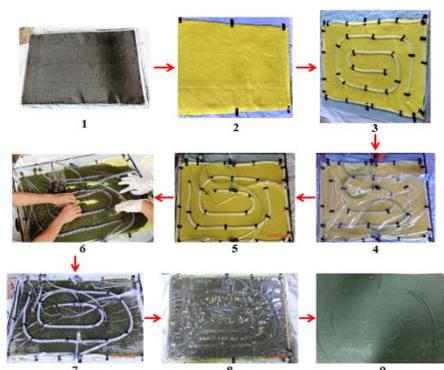
Eksperimen dinyatakan dimulai saat tercapainya stabilitas temperatur atur dari pemanas kerucut yang ditandai dengan dimulainya perakaman data melalui perangkat lunak LabVIEW 2011. Proses pengambilan data dilakukan menggunakan termokopel tipe K, *heat flux meter* model 64-10SB-20 dengan sensor tipe Schmidt-Boelter, *gas analyser* tipe Quintox KM9106, multimeter APPA, sensor obskurasasi dengan *micro controller* ATmega 16, sensor tekanan, dan data akuisisi untuk masing-

masing sensor pengukuran. Khusus untuk pengukuran temperatur menggunakan termokopel, digunakan data akuisisi tipe NI 9211 dengan 4 pasang pin termokopel yang dihubungkan dengan NI CompactDAQ (NI cDAQ) – 9174 sebagai media konfigurasi ke komputer.



Gambar 2. Konfigurasi keseluruhan dari alat eksperimen dalam penelitian ini

3.2 Manufaktur komposit serat karbon



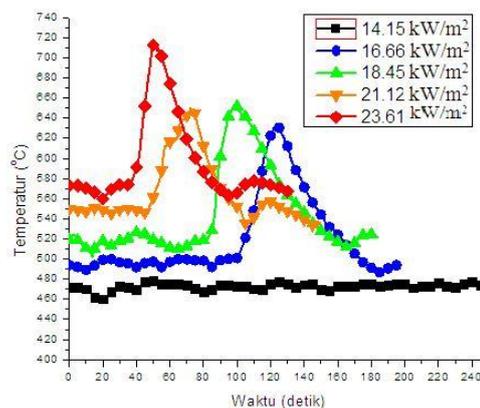
Gambar 3. Langkah-langkah pembuatan sampel komposit serat karbon dengan metode *vacuum bag*.

Gambar 3(1) terlihat pembuatan komposit serat karbon adalah dengan memotong lembaran serat karbon dalam ukuran 75×50 mm dan meletakkannya diatas kaca sebagai wadah. Kemudian, kain abutai diletakkan diatas serat karbon dan direkatkan ke wadah (kaca) agar tidak bergerak [Gambar 3(2)]. Selanjutnya dipasang saluran pipa spiral sebagai tempat mengalirnya serat karbon [Gambar 3(3)], satu pipa ditengah sebagai tempat masuknya resin (pipa *inlet*), dan dua pipa tempat keluarnya serat karbon (pipa *outlet*) diatas kain abutai [Gambar 3(4)]. Harus dipastikan bahwa tidak terdapat kebocoran dari sistem yang telah dibuat, baru kemudian proses pemvakuman dilakukan [Gambar 3(5)]. Kemudian resin yang telah dibuat dialirkan masuk ke dalam ruang vakum di dalam plastik pelindung melalui saluran *inlet*. Karena tekanan di dalam plastik vakum bernilai negatif dan lebih rendah dibandingkan tekanan di luar plastik vakum, maka kondisi ini akan

menghasilkan efek hisap terhadap resin yang dialirkan, sehingga cairan resin akan terhisap masuk ke dalam plastik pelindung dengan sendirinya melalui pipa *inlet* [Gambar 3(6)]. Gambar 3(7) memperlihatkan bahwa cairan serat karbon telah mengalir keseluruh bagian serat karbon yang terletak dibawah kain abutai. Setelah itu, ditunggu sampai sekitar 7 jam untuk memastikan bahwa resin telah mengeras untuk melepaskan rangkaian pipa *inlet/outlet* dan pipa spiral dari atas kain abutai [Gambar 3(8)]. Terakhir, lembaran komposit serat karbon ini dilepaskan dari wadah kaca untuk mendapatkan hasil akhir lembaran komposit serat karbon yang akan digunakan sebagai sampel dalam penelitian ini [Gambar 3(9)].

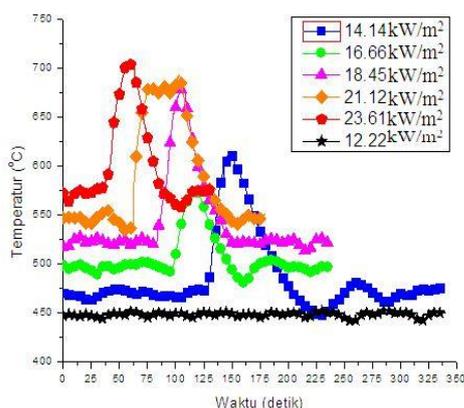
4. Hasil dan Diskusi

4.1 Waktu Penyalaan



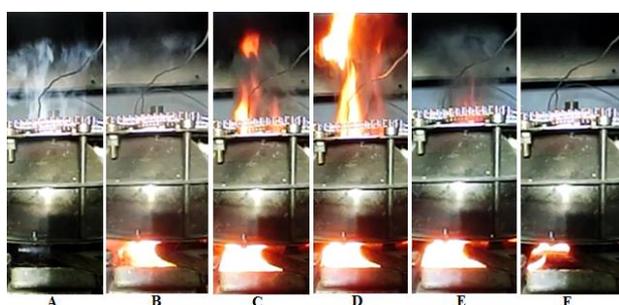
Gambar 4. Waktu penyalaan dan dinamika temperatur pembakaran dari sampel komposit serat karbon densitas 240 gr/m^2 untuk semua temperatur penelitian

Dari gambar 4 terlihat bahwa pola grafik yang didapatkan pada fluks kalor yang mengalami pembakaran sampel komposit serat karbon memiliki kecenderungan yang sama. Namun, yang membedakan adalah capaian waktu penyalaan (*time to ignition*). Fluks kalor $23,61 \text{ kW/m}^2$ pada sampel komposit serat karbon densitas 240 gr/m^2 memiliki waktu penyalaan yang lebih cepat yaitu pada detik ke 40 dibandingkan dengan fluks kalor lain. Fluks kalor $16,66 \text{ kW/m}^2$ memiliki waktu penyalaan yang lebih cepat yaitu pada detik ke 100.



Gambar 5. Waktu penyalaan dan dinamika temperatur pembakaran dari sampel komposit serat karbon densitas 200 gr/m² untuk semua temperatur penelitian

Pola grafik yang didapatkan pada gambar 5, fluks kalor yang mengalami pembakaran sampel komposit serat karbon memiliki kecenderungan yang sama. Namun, yang membedakan adalah juga capaian waktu penyalaan (*time to ignition*). Fluks kalor 23,61 kW/m² pada sampel komposit serat karbon densitas 220 gr/m² memiliki waktu penyalaan yang lebih cepat yaitu pada detik ke 30 dibandingkan dengan fluks kalor lain. Fluks kalor 16,66 kW/m² memiliki waktu penyalaan yang lebih cepat yaitu pada detik ke 125. Kondisi tersebut menandakan bahwa akibat dari temperatur pemanasan yang lebih tinggi, maka campuran udara dan uap bahan bakar yang terjadi juga akan semakin cepat panas dan lebih cepat siap untuk terbakar. Selain itu pengaruh densitas dari serat karbon juga berpengaruh pada waktu penyalaan. Densitas 200 gr/m², yang lebih memiliki kerapatan serat yang renggang lebih cepat terbakar jika dibandingkan dengan densitas 240 gr/m².

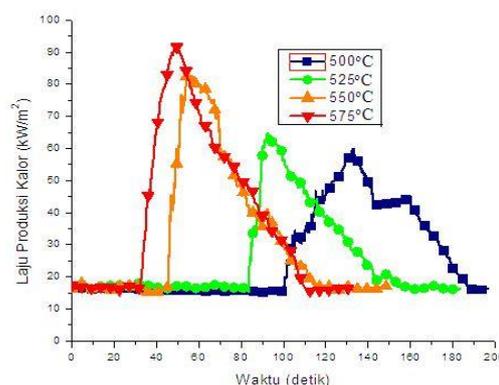


Gambar 6. Dinamika penyalaan apipembakaran pada *flash point* dari sampel komposit serat karbon dengan temperatur pemanasan 550°C (fluks kalor 21,12 kW/m²).

Fenomena perkembangan nyala api pembakaran sampel komposit serat karbon dapat dianalisis

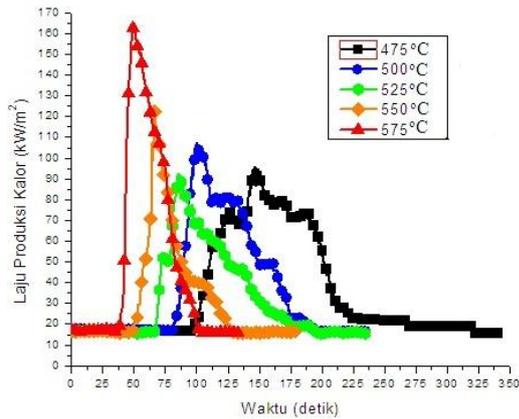
menggunakan dokumentasi dari dinamika pergerakan api selama berlangsungnya eksperimen. Fenomena perkembangan nyala api ini terjadi terjadi untuk seluruh temperatur penelitian. Proses pertama adalah vapisasi dari sampel serat karbon sebelum penyalaan (A). Selanjutnya fase awal munculnya nyala api pembakaran/*flash point* (B). Periode *flash over* dimana periode keadaan api untuk berkembang (C). Saat api menyala besaer, dimana laju produksi kalor dan konsumsi oksigen meningkat dengan titik konsentrasi oksigen mencapai 20,6 % dengan batas normal 20,9% dan periode ini dimanakan *fully developed fire* (D). Kondisi selanjutnya bahan bakar sudah mulai habis yang diiringi oleh kenaikan konsentrasi oksigen dan berangsur kembali ke ambang batas normal yaitu 20,9 %. nyala api pembakaran sudah hampir padam (E) dan (F).

4.2 Laju Produksi Kalor



Gambar 7. Laju produksi kalor dari sampel komposit serat karbon densitas 240 gr/m² untuk semua temperatur penelitian

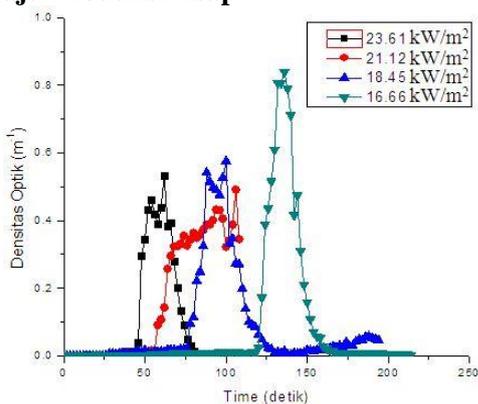
Berdasarkan gambar 7, terlihat bahwa nilai puncak laju produksi kalor maksimum terjadi pada temperatur 575°C yaitu sebesar 90-95 kW/m² sedangkan nilai puncak kalor minimum terjadi pada temperatur 500°C.



Gambar 8. Laju produksi kalor dari sampel komposit serat karbon densitas 200 gr/m² untuk semua temperatur penelitian

Berdasarkan gambar 8 terlihat bahwa nilai puncak laju produksi kalor maksimum terjadi pada temperatur 575°C yaitu sebesar 160-170 kW/m² sedangkan nilai puncak kalor minimum terjadi pada temperatur 525°C. Daerah disekitar nilai maksimum HRR tersebutlah terjadinya fase nyala api berkembang penuh (*fully developed*) pada saat eksperimen dilakukan. Jika dibandingkan laju produksi kalor, komposit serat karbon densitas 240 gr/m² memiliki nilai laju produksi kalor yang rendah jika dibandingkan dengan densitas 200 gr/m². Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan temperatur dari nyala api pembakaran berbanding lurus dengan meningkatnya nilai laju pelepasan kalor selama terjadinya pembakaran sampel komposit serat karbon.

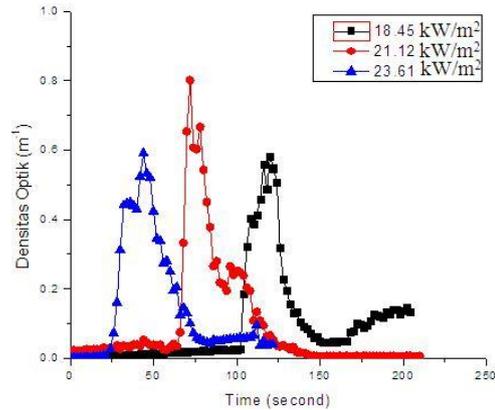
4.3 Laju Produksi Asap



Gambar 9. Dinamika nilai densitas optik dari asap hasil pembakaran sampel komposit serat karbon densitas 240 gr/m² untuk semua temperatur penelitian

Dari gambar 9 dapat dilihat bahwa pola densitas optik dari asap hasil pembakaran sampel komposit serat karbon gramasi 240 gr/m² sama dengan pola waktu penyalaan. Nilai densitas optik maksimum bernilai sekitar 0,8-0,9 m⁻¹ pada fluks kalor 16,66 kW/m² dan nilai densitas optik minimum

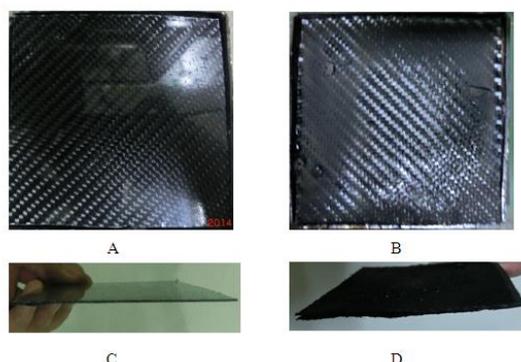
bernilai sekitar 0,4-0,5 m⁻¹ pada fluks kalor 21,12 kW/m²



Gambar 10. Dinamika nilai densitas optik dari hasil pembakaran sampel komposit serat karbon densitas 200 gr/m² untuk semua tempetur penelitian

Dapat dilihat bahwa pola densitas optik dari asap hasil pembakaran sampel komposit serat karbon gramasi 200 gr/m² sama dengan pola waktu penyalaan. Nilai densitas optik maksimum bernilai sekitar 0,8 m⁻¹ pada fluks kalor 21,12 kW/m² dan nilai densitas optik minimum bernilai sekitar 0,5-0,6 m⁻¹ pada fluks kalor 18,45 kW/m². Jika dibandingkan nilai densitas optik dari asap, komposit serat karbon densitas 240 gr/m² dengan 200 gr/m² hasilnya fluktuatif. Fenomena ini menunjukkan bahwa pergerakan asap memang tidak dapat diprediksi, terlebih lagi sifat sensor yang digunakan hanya menembakkan laser berbentuk titik bukan berbentuk luasan pada saluran pembuangan asap. Sementara itu, ketebalan asap pada setiap alirannya pasti berbeda-beda dan tidak selalu akan tertangkap oleh sensor yang dipancarkan oleh alat ukur. Hal ini dikarenakan aliran asap hasil pemanasan serta pembakaran sampel komposit serat karbon yang bervariasi dalam ruang dan waktu. Sehingga dapat dipahami apabila data pengukuran tidak konsisten walaupun fluks kalor yang dikenakan sama.

4.4 Analisis Sifat Komposit Serat Karbon Setelah Pembakaran

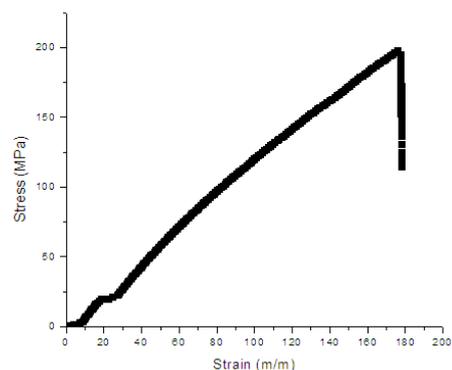


Gambar 11. Sampel komposit serat karbon (A) Tampak atas sebelum pembakaran, (B) Tampak atas setelah pembakaran, (C) Tampak samping sebelum pembakaran, (D) Tampak samping setelah pembakaran.

Proses pembakaran sampel komposit serat karbon diawali oleh vaporisasi dari resin. Hasil pemanasan resin keluar dari pori-pori serat karbon. Temperatur pemanasan meningkat, diikuti juga dengan kenaikan tekanan sehingga sampel komposit serat karbon mengembang dan menjadi lebih dari dua kali volumenya. Saat serat karbon tidak bisa menahan tekanan internal maka menyebabkan terbelahnya sampel komposit (Gambar 11D)

Kondisi fisik dari sampel komposit serat karbon setelah terjadi pembakaran (Gambar 11B) menunjukkan sampel mengalami pengurangan dengan bentuk fisik yang hampir sama dengan bentuk fisik sebelum eksperimen (Gambar 11A). Selama terjadinya pemanasan atau pembakaran, resin akan menguap dan meninggalkan residu arang. Uap resin akan keluar melalui serat karbon yang berdekatan. Sifat fisik komposit akan berubah selama pemanasan yang diikuti oleh penguapan resin, karena komposit mengembang sebagai reaksi dari keberadaan tekanan internal. Saat *bulk density* material berkurang, maka pori-pori akan terbentuk, dan menyebabkan konduktivitas termal dari serat karbon menurun. Selama terjadinya proses pembakaran atau pemanasan, material serat karbon akan mengalami degradasi kekuatan dan mempengaruhi performa. 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*).

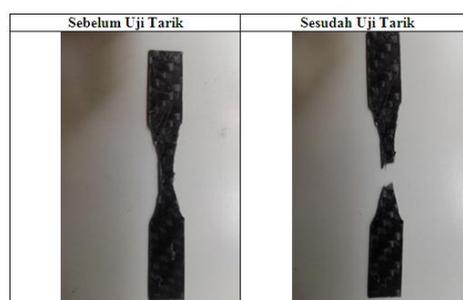
4.5 Kurva Stress-Strain



Gambar 12. Kurva Tegangan-Regangan sampel komposit serat karbon densitas 240 gr/m²

Data yang didapatkan dari pengujian tarik adalah beban dan perpanjangan. Kemudian data tersebut diolah dengan menggunakan persamaan 3 dan 4 untuk mencari nilai tegangan dan regangan. Hasil yang didapat, ditampilkan dalam bentuk grafik. Berdasarkan gambar 12, adanya pergolakan (tidak *linear*) pada awal grafik. Hal tersebut disebabkan oleh pengaruh pegangan (*grip*) pada alat saat melakukan proses pengujian tarik. Sampel yang memiliki salah satu permukaan licin, saat dijepit oleh alat mengalami ketidakstabilan sebelum akhirnya terjadi proses penarikan. Gaya yang diberikan oleh mesin uji tarik mempengaruhi kenaikan tegangan pada sampel komposit serat karbon yang berbanding lurus terhadap regangan hingga batas maksimum sekitar 200 MPa sebelum akhirnya material patah. Berdasarkan gambar 12 dapat dilihat daerah elastis yang tidak terlalu panjang. Sampel komposit serat karbon hanya mengalami sedikit peregangan elastis sebelum kehilangan seluruh sifat elastis dan akhirnya putus. Hal tersebut menunjukkan bahwa komposit serat karbon memiliki sifat fisik diantara getas-ulet.

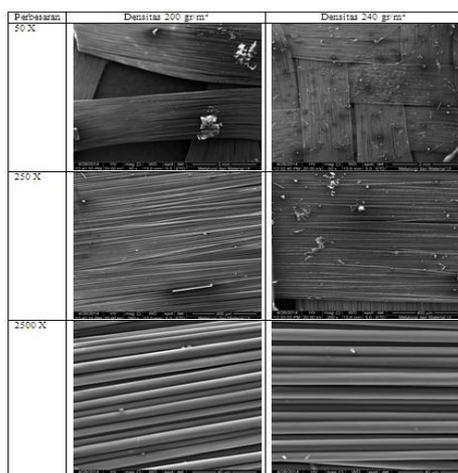
4.6 Analisa Perpatahan



Gambar 13. Kondisi sampel komposit serat karbon sesudah dan sebelum uji tarik

Berdasarkan gambar 13, perpatahan yang dihasilkan oleh sampel komposit serat karbon adalah jenis perpatahan campuran yaitu diantara ulet dan getas. Patahan yang dihasilkan berbentuk serabut. Sampel komposit serat karbon juga mengalami *necking*. Hal ini dibuktikan dengan mengukur bagian tengah yang dibuat menyempit sebelum dan sesudah dilakukannya pengujian tarik. *Necking* adalah penyempitan diameter atau ukuran karena kenaikan kekuatan yang disebabkan oleh pengerasan regangan yang akan berkurang untuk mengimbangi penurunan permukaan penampang melintang. Selain patahan yang dihasilkan berbentuk serabut, patahan yang dihasilkan juga membentuk sudut 45° pada bagian ujung patahan. Oleh karena itu, berdasarkan ciri-ciri patahan tersebut dapat dikatakan bahwa sampel komposit serat karbon berada diantara ulet dan getas.

4.7 Analisa SEM (*Scanning Electron Microscopic*)



Gambar 14. Analisa SEM (*Scanning Electron Microscopic*)

Analisis SEM (*Scanning Electron Microscopic*) dilakukan terhadap sampel komposit serat karbon yang telah terbakar pada temperatur eksperimen 550°C dengan densitas 240 gr/m^2 dan 200 gr/m^2 . Perbesaran mulai dari 50X, 250X dan 2500X. Pengujian SEM bertujuan untuk melihat permukaan sampel komposit serat karbon setelah terjadinya pembakaran. Gambar 14 menunjukkan serat karbon mempertahankan strukturnya, namun tetap mengalami degradasi termal. Sampel komposit serat karbon tidak habis terbakar setelah pengujian. Gambar 14 juga menunjukkan adanya serpihan kecil pada permukaan serat karbon. Serat karbon hanya mengalami pengarang dengan bentuk fisik yang hampir sama dengan bentuk fisik sebelum eksperimen. Pengarang pada permukaan sampel dapat menghambat interaksi termal.

5. Kesimpulan

Dari keseluruhan penelitian tentang sifat termal dan sifat mekanik ini didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Konsumsi oksigen menjadi variabel utama untuk melakukan perhitungan laju produksi kalor dari pembakaran sampel serat karbon. Semakin besar nyala api pembakaran, maka konsumsi oksigen akan meningkat yang mengakibatkan turunnya kadar oksigen hasil pengukuran. (Konsentrasi O_2 terendah = 20,6 %)
2. Semakin tinggi nilai fluks kalor yang diberikan pemanas kerucut, maka semakin cepat pula tercapainya waktu penyalan (*piloted ignition*)
3. Kenaikan fluks kalor dari nyala api pembakaran berbanding lurus dengan meningkatnya laju pelepasan kalor selama pembakaran sampel komposit serat karbon
4. Fenomena pergerakan asap merupakan variabel yang sangat sulit untuk diprediksi dalam suatu proses pembakaran
5. Sampel komposit serat karbon memiliki sifat diantara ulet dan getas berdasarkan hasil pengujian tarik dan analisa perpatahan. Foto SEM menunjukkan bahwa setelah terjadinya pembakaran pada komposit serat karbon, serat hanya mengalami pengarang (*charing*) dengan bentuk fisik yang hampir sama dengan bentuk fisik sebelum eksperimen

DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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.
- [2] Drysdale, D. (2004). *An Introduction to Fire Dynamics*. Second Edition. John Wiley & Sons.
- [3] Siregar, M.A. (2012). *Penelitian Sifat Penyalaan Mandiri dari Minyak Pelumas Menggunakan Kalorimeter Kerucut*. Program Studi Teknik Mesin Universitas Indonesia.
- [4] 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. Washington, DC.
- [5] Staggs, J.E.J. (2009). *Convection heat transfer in the cone calorimeter*. Fire Safety Journal.

- [6] *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.
- [7] Babrauskas, V., & Quincy, M.A. (2002). *Heat Release Rates– SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Third Edition. National Fire Protection Association (NFPA).
- [8] 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).
- [9] Mulholland, G.W., & Quincy, M.A. (2002). *Smoke Production and Properties - SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Third Edition. National Fire Protection Association (NFPA).
- [10] 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).
- [11] Apriano, T. (2012). *Perancangan Sistem Pendeteksi Asap Tipe Foto elektrik Berbasis Micro Controller dan Aplikasinya Dalam Pengukuran Optical Density*. Program Studi Teknik Mesin Universitas Indonesia.
- [12] Murray, J.J., Shield, T.J., & Silcock, G.W. (1993). *The effects of geometry and ignition mode on ignition times obtained using a cone calorimeter*. Fire Mate.
- [13] Turns, S.R. (2000). *An Introduction to Combustion : Concepts and Applications*. McGraw-Hill.
- [14] Quintiere, J.G. (2006). *Fundamentals of Fire Phenomena*. John Wiley & Sons.
- [15] Mazumdar, S.K. (2002). *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*.
- [16] Pramono, A.E. (2012). *Karakteristik Komposit Karbon-Karbon Berbasis Limbah Organik Hasil Proses Tekan Panas*. Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia.
- [17] Dao, D.Q., Luche, J., Richard, F., Rogaume, T., Bourhy-Weber, C., & Ruban, S. (2012). *Determination of characteristic parameters for the thermal decomposition of epoxy resin/carbon fibre composites in cone calorimeter*. International Journal of Hydrogen Energy.
- [18] Gupta, M. (2009). *Combustion of Composite Materials: Assessment and Quantification of Hazards*. Centre for Fire Explosives & Environment Safety. Delhi.
- [19] Wu, Q., Zhu, W., Zhang, C., Liang, Z., & Wang, B. (2010). *Study of fire retardant behavior of carbon nanotube membranes and carbon nanofiber paper in carbon fiber reinforced epoxy composites*. Department of Industrial and Manufacturing Engineering. FAMU-FSU College of Engineering. Florida State University. USA.
- [20] Hopkins Jr, D., Quintiere, J.G. *Material fire properties and predictions for thermoplastics*. Fire Safety Journal 1996;26:241e68.
- [21] F.L. Mathew and R.D. Rawlings, *Composites Materials: Engineering and Science*, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, UK, Chapman & Hall, 1994