



Sifat Ketahanan Api dan Degradasi Panas Tiga Jenis Kayu Dilapisi Arang Kayu Sengon

Fire Retardancy Properties and Thermal Degradation of Three Timber Species Overlaid by Sengon Wood Charcoal

Joko Sulisty* , Sri Nugroho Marsoem, Tomy Listyanto & Yus Andhini Bhukti Pertiwi

Departemen Teknologi Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 55281
Email: jsulisty@ugm.ac.id

HASIL PENELITIAN

Riwayat Naskah :

Naskah masuk (*received*): 30 September 2018

Diterima (*accepted*): 30 Januari 2020

KEYWORDS

fire retardancy properties, fire retardant material, sengon, teak, red meranti and pine charcoal

KATA KUNCI

sifat ketahanan api, material tahan api, arang sengon, jati, meranti merah dan pinus

ABSTRACT

Wood as biomaterial poses unfavorable property that is wood can burn. Fire disaster in wooden houses threaten human lives. Efforts have been implemented to improve fire retardancy properties of timbers for wooden houses. This research was carried out to develop carbon-based fire-retardant materials (CFR) overlay on three timber species. The effectiveness of carbon-based fire-retardant material from sengon charcoal to improve fire resistance in teak, red meranti and pine timbers was studied. The CFR materials were prepared by mixing 10 mesh sengon charcoal powder and PVAC adhesive with a ratio (w/w) of 60:40 followed by a hot pressing at a temperature of 80 °C with a pressure of 70 MPa for 15 minutes resulting 4 mm x 18 cm x 18 cm carbon sheets. Teak, red meranti and pine timbers overlaid by CFR sheet from sengon charcoal were tested through feeding on fire for 1500 seconds based on ASTM E 6-02 method with a modification. CFR sheets from sengon charcoal were effective to improve the fire resistance of the three species of timbers. CFR overlaid on timber surface was functioned as solid barrier material which was able to block thermal from fire and protected timber from thermal degradation showing by lesser percentage of cross section unburning area on teak CFR i.e. 68.6% than that of teak control i.e. 57.9%, lower percentage of weight loss on pinus CFR and red meranti CFR i.e. 50.56% and 26.57% respectively comparing with the controls i.e. 76.98% and 30.72%, and similar values of weight change percentage between teak CFR and red meranti CFR with the control until 700-1,160 s.

INTISARI

Kayu sebagai biomaterial memiliki sifat yang tidak menguntungkan yaitu kayu dapat terbakar. Kebakaran dalam rumah dengan konstruksi material kayu membahayakan keselamatan jiwa manusia. Upaya telah dilakukan dalam mencegah kebakaran dengan meningkatkan daya tahan material kayu. Penelitian ini dilaksanakan untuk mengembangkan material tahan api berbasis karbon (CFR) dari arang kayu sengon. Efektifitas CFR dari arang sengon untuk meningkatkan ketahanan api pada kayu jati, meranti merah dan pinus dipelajari. CFR dibuat melalui pencampuran serbuk arang sengon berukuran 10 mesh dan perekat PVAC dengan perbandingan (60:40), kemudian dikempa pada suhu 80 °C dengan tekanan

70 MPa selama 15 menit sehingga diperoleh lembaran komposit karbon berukuran 4 mm x 18 cm x 18 cm. Kayu jati, meranti merah dan pinus yang dilapisi dengan lembaran CFR diuji ketahanan terhadap api melalui pengumpanan pada api selama 1500 detik berdasarkan metode ASTM E 69-02 dengan modifikasi. Lembaran CFR dari arang sengon efektif untuk meningkatkan ketahanan api ketiga jenis kayu. Keberadaan lapisan CFR pada permukaan kayu efektif berfungsi sebagai solid material penghambat yang mampu memblokir panas dari api dan melindungi dari terjadinya degradasi material kayu, yang ditunjukkan dengan persentase luas penampang melintang yang tidak terbakar pada jati CFR sebesar 68,6% yang lebih besar dibanding jati kontrol sebesar 57,9%, rendahnya persentase kehilangan berat pada kayu pinus CFR dan meranti merah CFR sebesar 50,56% dan 26,57% dibandingkan kontrolnya sebesar 76,98% dan 30,72%, dan perubahan berat yang relatif sama dengan kontrol pada kayu jati dan meranti merah sampai 700-1.160 detik.

© Jurnal Ilmu Kehutanan -All rights reserved

Pendahuluan

Kayu merupakan salah satu material yang unggul untuk konstruksi dengan nilai rasio yang tinggi antara kekuatan terhadap beratnya (Kretschmann & Hernandez 2006). Kayu banyak digunakan untuk konstruksi perumahan di Indonesia, namun belakangan bersaing dengan material lain seperti baja ringan dan aluminium, karena sifatnya yang mudah terbakar (Tsoumis 1991). Laporan Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) menunjukkan frekuensi bencana kebakaran pemukiman yang tinggi dari tahun 2011 hingga 2014 mencapai 501 bencana dengan jumlah kerugian ribuan unit rumah dan bangunan lainnya termasuk korban jiwa (BNPB 2014). Perumahan dengan konstruksi kayu diduga menjadi salah satu faktor yang terkait erat dengan bencana kebakaran tersebut.

Aspek ketahanan api pada kayu konstruksi merupakan parameter penting yang menentukan tinggi rendahnya ancaman bahaya kebakaran. Kayu terbakar pada kondisi suhu permukaannya melampaui 250 °C yang menyebabkan terlepasnya gas-gas volatil dari proses degradasi panas pada kayu yang menjadi penyebab terjadinya penyalaan pada kayu karena keberadaan sumber api (Dinwoodie 2000). Penyalaan api pada kayu terjadi ketika kayu terkena panas yang cukup dengan tersedianya oksigen dalam atmosfer. Penyalaan api ini sangat bergantung pada kerapatan dan kadar air kayu (White & Dietenberger 1999), seperti kayu basswood

dan red oak dengan kerapatan kayu berturut-turut 312 dan 660 kg/m³ memiliki waktu penyalaan api selama 183 dan 930 detik pada *heat flux* sebesar 18 kW/m². Mengingat kayu konstruksi di Indonesia memiliki kisaran berat jenis yang lebar antara 0,39 - 1,15 (Anonim 1976) maka diduga terdapat variasi sifat ketahanan api pada jenis-jenis kayu konstruksi tersebut mulai dari yang bersifat tidak tahan hingga tahan api. Karakteristik yang umum digunakan untuk sifat ketahanan api pada kayu meliputi penyalaan dari sumber panas, kecepatan tumbuh dari pelepasan panas, persebaran api, asap dan gas beracun serta kecepatan pengarang (*charring rate*) (White & Dietenberger 1999).

Salah satu upaya dalam mencegah kebakaran adalah dengan meningkatkan daya tahan material kayu terhadap bahaya kebakaran atau api (White & Dietenberger 1999). Peningkatan ketahanan api pada kayu biasanya dilakukan dengan melakukan impregnasi kayu dalam bahan kimia seperti yang dilaporkan Wu et al. (2014) dengan magnesium klorida; Garcia et al. (2009) dengan amonium polifosfat, aluminium trihidroksida dan melamin cyanurate; Bakirtzis et al. (2009) dengan sodium bikarbonat; Tomak dan Cavdar (2013) dengan boron, campuran asam boric dan borax, batu kapur dan minyak silikon. Perlakuan dengan bahan kimia tersebut mendorong terjadinya proses pirolisis yang lebih banyak di permukaan kayu pada saat kebakaran yang ditandai dengan perubahan menjadi arang yang warnanya menjadi kehitaman yang dapat

melindungi bagian di interiornya sehingga tidak terbakar dengan memblok panas konvektif yang datang (Dinwoodie 2000). Lapisan arang tersebut dapat menahan panas dari kobaran api karena memiliki sifat tahan api (Ishihara 1996). Analisis thermogravimetri menunjukkan bahwa arang yang dibuat dengan suhu karbonisasi 700 °C menunjukkan kehilangan berat hanya 7% pada pemanasan dari suhu kamar ke suhu 800 °C (Sulistyo et al. 2012). Pemanfaatan arang untuk melindungi material kayu dilaporkan oleh Subyakto et al. (2004) dengan menggunakan lembaran tersusun atas *carbon phenolic sphere* untuk meningkatkan ketahanan api pada sambungan *laminated veneer lumber* (LVL) sehingga waktu maksimum sampai terjadinya kerusakan sambungan dapat diperpanjang. Hal tersebut menunjukkan bahwa material arang kayu potensial digunakan untuk meningkatkan ketahanan api pada material kayu.

Kayu sengon dengan berat jenis rata-rata 0,33 (Martawijaya et al. 1989) dengan potensi limbah yang banyak dari industri pengolahan kayu, potensial untuk dimanfaatkan pada produksi arang untuk digunakan untuk material tahan api berbasis karbon (*carbon-based fire retardant/CFR*). Studi ini memanfaatkan arang sengon hasil karbonisasi pada suhu 400 °C untuk pengembangan CFR berkerapatan 0,59 g/cm³ dengan ketebalan 4 mm. Lembaran CFR dari arang sengon tersebut ditempel pada permukaan kayu jati, meranti merah dan pinus. Efektivitas CFR dari arang sengon dalam meningkatkan sifat ketahanan api dan degradasi panas pada kayu jati, meranti merah dan pinus diuji dalam pembakaran langsung dalam cerobong tegak.

Bahan dan Metode

Limbah kayu sengon berbentuk potongan bahan finis dari produksi kayu lapis diproses menjadi arang dalam tungku listrik dengan kecepatan pemanasan 15 °C/menit sampai mencapai suhu 400 °C, dan ditahan pada suhu tersebut selama 2 jam. Karakteristik arang kayu sengon yang meliputi kadar air, kadar abu, kadar zat volatile dan kadar karbon terikat dianalisis dengan menggunakan standar ASTM berturut-turut D2867-64, D2866-70, D1762-64, dan D2867-64.

Arang kayu sengon dibuat serbuk berukuran 10 mesh kemudian dicampur dengan perekat

polyvinyl acetate (PVAC) dengan komposisi arang kayu sengon : perekat PVAC = 60 : 40 (% berat/berat) untuk dibuat lembaran. Setiap lembaran CFR membutuhkan 60 g arang serbuk kayu sengon dan 80 g PVAC (dengan mempertimbangkan kandungan bahan solid 50% dalam perekat). Campuran arang kayu sengon dan perekat PVAC diatur dalam cetakan yang kemudian dikempa dengan suhu 80 °C dan tekanan 70 MPa dengan pengaturan pada awal pengempaan diatur buka tutup selama 1 menit sebanyak 3 kali untuk melepas uap air dari larutan perekat, dan diikuti dengan pengempaan selama 15 menit untuk mendapatkan lembaran komposit dari arang sengon berukuran 4 mm x 18 cm x 18 cm. Kerapatan dasar CFR dari arang kayu sengon diukur dengan menggunakan standar ASTM D792 dengan modifikasi sesuai dengan ASTM D1037-78.

Kayu jati, meranti merah dan pinus berukuran 4 cm x 6 cm x 100 cm dalam kondisi kering udara diketam untuk mendapatkan permukaan yang rata. Lembaran CFR ditempelkan pada permukaan kayu jati, meranti merah dan pinus dengan menggunakan perekat *polyvinyl acetate* (PVAC) dengan jumlah perekat terlabur 70 g/m². Permukaan kayu jati, meranti merah dan pinus yang ditempel lembaran CFR diberi kode berturut-turut Jati CFR, meranti merah CFR dan pinus CFR. Contoh uji kayu jati, meranti merah dan pinus kontrol tanpa perlakuan CFR diberi kode jati, meranti merah dan pinus.

Contoh uji kayu dengan perlakuan CFR dan kontrol ditimbang yang dinyatakan sebagai berat awal (W_0). Contoh uji tersebut dilubangi pada posisi tengah (50 cm dari ujung) untuk penempatan *thermocouple* pada kedua sisi lebarnya. Contoh uji kayu yang telah dipasang *thermocouple* diletakkan pada pengait yang terhubung pada timbangan digital. Contoh uji kayu dalam posisi tegak diletakkan dalam cerobong pembakaran tegak berbentuk silinder dengan berat contoh uji kayu pada penempatan tersebut dinyatakan sebagai W_t . Kompor *burner* yang tersambung dengan tangki bahan bakar gas diletakkan di bagian bawah cerobong pembakaran tegak. Contoh uji kayu dengan perlakuan dan kontrol diuji ketahanan api melalui pembakaran dengan api secara langsung mengenai permukaan kayu atau lembaran CFR pada kayu berdasarkan metode ASTM E 69-02 selama 1500 detik. Lama

waktu uji pembakaran tersebut berdasarkan waktu yang dibutuhkan kayu pinus berukuran 4 cm x 6 cm x 100 cm untuk terbakar habis dalam waktu 1500 detik. Selama pengujian bakar, berat kayu ($W_{x1}, W_{x2}, \dots, W_{xn}$) dan suhu dicatat setiap 10 detik (T_1, T_2, \dots, T_{xn}) sampai 1500 detik. *Burner* dimatikan ketika pengujian telah mencapai 1500 detik dan sisa contoh uji kayu ditimbang beratnya yang dinyatakan sebagai W_{akhir} . Persentase kehilangan berat ditentukan dengan rumus

$$\text{Kehilangan berat (\%)} = \frac{W_0 - W_{akhir}}{W_0} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

Perubahan berat (%) untuk setiap satuan waktu (T_1, T_2, \dots, T_{xn}) ditentukan dengan rumus

$$\text{Berat (\%)} = \frac{W_{xn}}{W_0} \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

Kecepatan kehilangan berat untuk setiap satuan waktu (T_1, T_2, \dots, T_{xn}) ditentukan dengan rumus

$$\text{Kecepatan kehilangan berat } \left(\frac{g}{\text{detik}}\right) = \frac{W_n - W_{xn}}{T_{xn}} \dots\dots\dots (3)$$

Waktu mencapai suhu 260 °C pada uji pembakaran juga dicatat untuk setiap pengujian ketahanan api contoh uji kayu baik dengan perlakuan maupun kontrol. Analisis degradasi panas pada contoh uji kayu jati dan jati CFR dengan perlakuan dan kontrol paska uji pembakaran dilakukan menggunakan metode *image processing* dengan perangkat lunak *Image Pro Plus* dalam menentukan pengukuran luas penampang terbakar dan tidak terbakar pada penampang melintang contoh uji pada 3 posisi yaitu di posisi 1/3 ujung-1, posisi tengah dan posisi 1/3 ujung-2.

Hasil dan Pembahasan

Rata-rata rendemen proses karbonisasi kayu sengon menjadi arang sebesar 20% yang lebih rendah dari nilai yang dilaporkan oleh Kim et al. (2015)

pada kayu sugi dan ubame oak sebesar berturut-turut 22,1% dan 23,5%, Byrne dan Nagle (1997) pada kayu bass sebesar 24,8%, Qi et al. (2018) pada kayu popplar sebesar 30,9%, serta Silva dan Ataide (2019) pada kayu *Eucalyptus urograndi* sebesar 30%. Dikarenakan rendemen arang relatif terhadap berat jenis kayunya (Mlaouhi et al. 1999), maka karbonisasi kayu sengon dengan berat jenis yang rendah menghasilkan arang dengan rendemen yang rendah. Tabel 1 menampilkan karakteristik arang kayu sengon tersebut mendekati karakteristik arang kayu rockrose dengan kadar abu, volatile dan karbon terikat berturut-turut 5,48%; 19,13% dan 75,39% yang disiapkan pada suhu karbonisasi 400 °C (Gomez-Serrano et al. 1993), arang kayu *Eucalyptus urograndi* (Silva & Ataide 2019) dan arang kayu poplar (Qi et al. 2018). Lembaran CFR dari arang kayu sengon memiliki rata-rata kadar air dan kerapatan dasar, seperti yang ditampilkan pada Tabel 2. Kerapatan CFR dari arang kayu sengon mendekati kerapatan lembaran *carbon phenolic sphere* antara 0,41-0,45 g/cm³ dari penelitian sebelumnya (Subyakto et al. 2004).

Gambar 1 (a) menunjukkan cerobong pembakaran tegak untuk menguji pembakaran dengan api dari kompor burner secara langsung pada contoh uji kayu yang diletakkan dalam posisi tegak di dalam silinder cerobong. Gambar 1 (b-d) menunjukkan sisa material kayu kontrol yaitu kayu pinus, meranti merah dan jati dari uji pembakaran selama 1500 detik pada material kayu berukuran 4 cm x 6 cm x 100 cm tanpa diberi perlakuan pelapisan CFR pada permukaannya. Pengujian pembakaran pada kayu kontrol menunjukkan adanya degradasi panas pada permukaan material kayu yang ditunjukkan adanya kerusakan bentuk, ukuran dan struktur kayu. Kayu pinus kontrol menunjukkan sisa material yang hancur menjadi keping-keping atau partikel berukuran kecil

Tabel 1. Karakteristik arang kayu sengon
Table 1. Characteristics of sengon wood charcoal

| Kadar air (%) | Kadar abu (%) | Kadar zat volatile (%) | Kadar karbon terikat (%) |
|---------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| 7,39 | 3,57 | 18,7 | 70,3 |

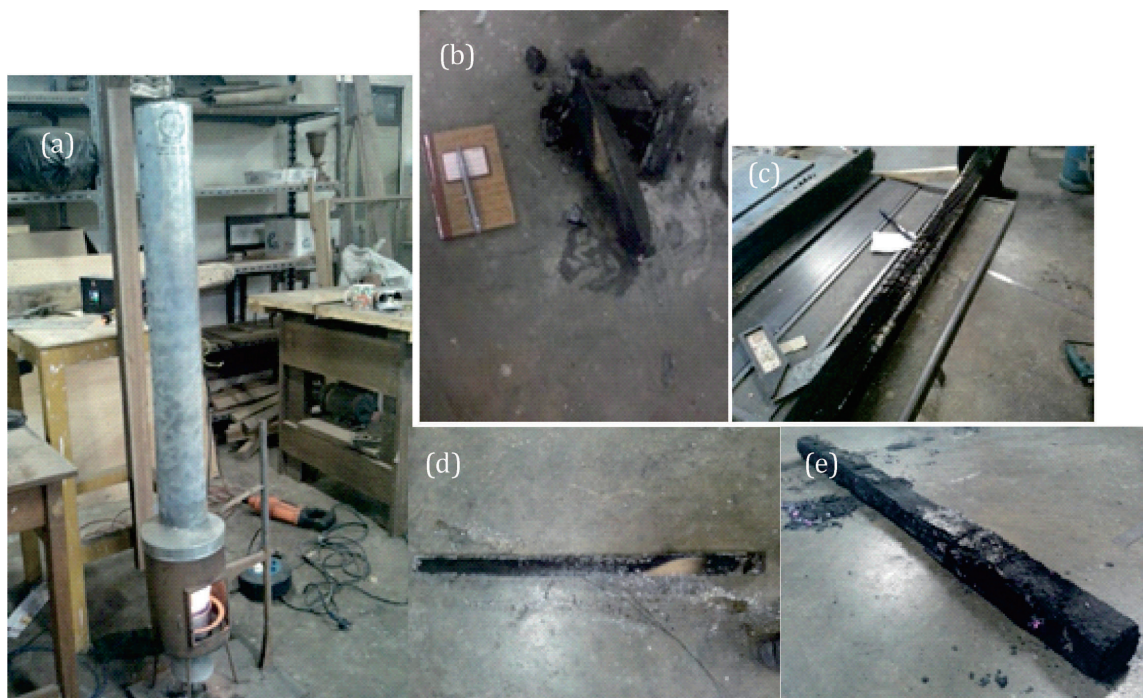
Tabel 2. Rata-rata tebal, kadar air dan kerapatan dasar CFR dari arang kayu sengon
Table 2. Averages of thickness, moisture content and basic density of CFR from sengon wood charcoal

| Kode | Suhu Karbonisasi (°C) | Tebal (mm) | Kadar air (%) | Kerapatan (g/cm ³) |
|------|-----------------------|------------|---------------|--------------------------------|
| CFR | 400 | 4,099 | 5,40 | 0,59 |

paska uji pembakaran seperti pada Gambar 1 (b). Kayu meranti merah dan jati paska uji bakar masih menunjukkan batang yang utuh berwarna hitam menyerupai arang dan dengan kerusakan pada permukaannya yang ditunjukkan pada Gambar 1 (c) dan (d). Berdasarkan sisa material paska uji bakar diantara ketiga jenis kayu, kayu jati menunjukkan sifat ketahanan api yang paling tinggi, sedangkan kayu pinus menunjukkan sifat ketahanan yang paling rendah. Hasil ini berkaitan dengan karakteristik kayu jati yang memiliki berat jenis 0,67, morfologi kayu yang padat dan kandungan lignin 29,9% yang lebih tinggi daripada kayu pinus dengan berat jenis 0,55, morfologi kayu yang kurang padat dan kandungan lignin 24,3% (Martawijaya et al. 1981; 1989). Menurut Haurie et al. (2019) nilai kerapatan kayu yang tinggi dan morfologi kayu yang padat serta kandungan lignin yang tinggi berpengaruh terhadap tingginya sifat ketahanan kayu terhadap api. Gambar 1 (e) menunjukkan contoh uji kayu jati CFR paska uji pembakaran yang masih utuh baik ukuran dan bentuk pada material kayunya, sedangkan material CFR terdegradasi pada permukaan kayu. Material CFR mampu melindungi bagian interior kayu di dalamnya dengan memblokir panas dari api sehingga

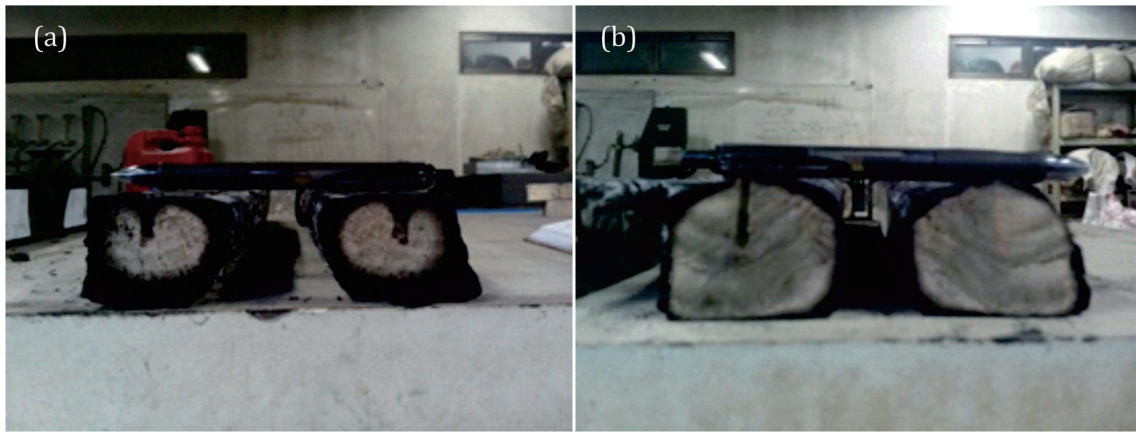
material kayu relatif masih utuh selama pengujian pembakaran.

Gambar 2 menunjukkan perbedaan degradasi panas setelah pengujian pembakaran pada kayu jati dan jati CFR. Persentase luas area yang tidak terbakar pada kayu jati sebesar 57,9%, sedangkan pada jati CFR sebesar 68,6%. Gambar 2 menunjukkan bahwa lapisan CFR dari arang kayu sengon efektif untuk melindungi material kayu jati di bagian interior di bawah lapisan CFR, sehingga persentase luasan areal yang tidak terbakar lebih besar dibandingkan kontrol. Keberadaan material CFR efektif berfungsi sebagai material solid penghambat (*solid barrier material*) panas pada permukaan kayu seperti fungsi material coating resin epoksi dengan grafit oksida (Lee et al. 2011), *transparen intumescent fire-retardant coatings* dengan magnesium fosfat (Yan et al. 2019) dan polyester resin-based *intumescent flame-retardant coatings* dengan grafit expandable (Wang et al. 2019). Degradasi panas terjadi pada material CFR dan sebagian material kayu pada uji pembakaran, sehingga material kayunya terlindungi dan terdegradasi lebih ringan dibandingkan kontrol, yang ditunjukkan degradasi pada CFR dan luasan tidak terbakar lebih sempit pada sampel kayu



Gambar 1. (a) Cerobong pembakaran tegak dan sisa uji pembakaran kayu (b) pinus, (c) meranti merah, (d) jati dan (e) jati CFR

Figure 1. (a) Fire tube apparatus and combustion timber residue of (b) pinus, (c) red meranti, (d) teak and (e) teak CFR



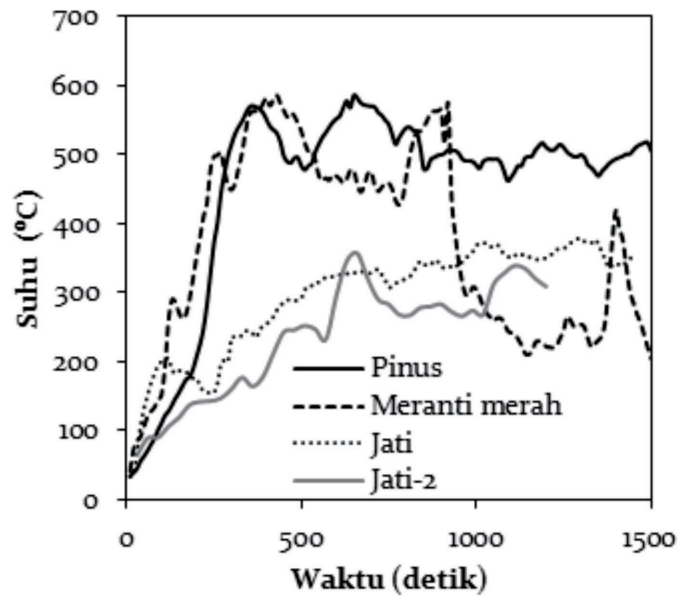
Gambar 2. Degradasi permukaan kayu pada penampang melintang sisa uji pembakaran kayu (a) jati dan (b) jati CFR
Figure 2. Surface degradation exhibiting on the cross section of (a) teak and (b) teak CFR timber residues of fire test

jati CFR seperti tampak pada Gambar 1 (e). Kayu yang terdegradasi dikarenakan dekomposisi panas hemiselulosa pada suhu 180 – 350 °C, diikuti selulosa (275-350 °C) dan lignin (250-500 °C) (Haurie et al. 2019).

Suhu pembakaran

Uji pembakaran berhasil dilakukan hanya pada contoh uji kayu pinus CFR dan pinus (kontrol) dan contoh uji kayu meranti merah CFR dan meranti merah (kontrol) tanpa ulangan. Adapun contoh uji kayu jati berhasil diuji bakar dengan ulangan yaitu jati dan jati-2 (kontrol) serta contoh uji dengan perlakuan CFR adalah jati CFR, jati CFR-2 dan jati CFR-3. Gambar 3 menampilkan kurva suhu pada contoh uji kayu kontrol dalam pengujian pembakaran yang dipengaruhi oleh jenis kayu. Suhu pembakaran kayu jati kontrol (Jati dan Jati-2) lebih rendah dibandingkan suhu pembakaran kayu meranti merah kontrol dan pinus kontrol. Uji pembakaran contoh uji Jati dan Jati-2 menunjukkan kurva suhu yang meningkat perlahan pada tahap awal uji pembakaran dengan mencapai suhu 304 °C dalam 510 detik pada contoh uji jati dan mencapai 346 °C dalam 600 detik pada contoh uji Jati-2; yang diikuti kenaikan suhu pembakaran mencapai 372 °C hingga pengujian selesai dalam 1.400 detik pada contoh uji Jati dan kenaikan suhu yang fluktuatif sampai pengujian selesai dalam 1.200 detik pada contoh uji Jati-2. Karakteristik kayu jati seperti dibahas sebelumnya, yang memiliki berat jenis tinggi sekitar 0,67, morfologi kayu yang padat dan kandungan lignin yang tinggi sekitar 29,9% (Martawijaya et al. 1981), berpengaruh terhadap stabilitas termal

yang tinggi (Haurie et al. 2019) sehingga degradasi berjalan perlahan. Berdasarkan Haurie et al. (2019) terkait kisaran suhu degradasi komponen kimia kayu, maka dalam uji pembakaran kayu jati dimulai dari degradasi komponen hemiselulosa pada kisaran suhu 180-350 °C terjadi pada kisaran waktu antara 260 – 980 detik, selulosa pada kisaran suhu 275-350 °C pada kisaran waktu 430 – 980 detik dan sebagian lignin pada kisaran suhu 250-500 °C yang dimulai setelah 390 detik. Karakteristik kurva suhu uji pembakaran kayu pinus dan meranti merah menunjukkan kenaikan suhu yang tajam pada tahap awal uji bakar yang berbeda dengan kurva suhu pada uji pembakaran kayu jati. Kurva suhu kayu pinus mencapai 515 °C dalam waktu 300 detik dan kayu meranti merah mencapai 503 °C dalam waktu 270 detik. Kurva suhu yang meningkat tajam dalam waktu yang singkat dikarenakan karakteristik kayu pinus dan meranti merah yang menurut Martawijaya et al. (1981; 1989) memiliki berat jenis kayu yang lebih rendah, dan morfologi kayu yang kurang rapat serta rendahnya kandungan lignin dibanding kayu jati. Oleh karena itu kayu pinus dan meranti merah dalam uji pembakaran mengalami api menyala cepat dengan suhu yang meningkat tajam. Berdasarkan Haurie et al. (2019) terkait kisaran suhu degradasi komponen kimia kayu maka dalam uji pembakaran kayu pinus dan meranti merah dimulai dari degradasi komponen hemiselulosa pada kisaran waktu antara 140 – 200 detik, diikuti dengan degradasi selulosa antara 150 – 200 detik dan lignin antara 120 – 330 detik dikarenakan rendahnya stabilitas termal kayunya. White dan Dietsberger (1999) juga menyatakan bahwa berat jenis berpengaruh terhadap kecepatan



Gambar 3. Kurva suhu pada kayu kontrol yang meliputi jati, jati-2, meranti merah dan pinus pada uji pembakaran
Figure 3. The curves of temperature of control timbers including teak, teak-2, red meranti and pinus in fire test

penyalan api. Kayu dengan nilai berat jenis yang rendah memiliki waktu penyalan yang pendek dan sebaliknya pada kayu dengan nilai berat jenis yang tinggi. Subyakto et al. (2003) melaporkan pada uji bakar kayu hinoki, suhu meningkat sampai 730 °C dalam 10 menit, 820 °C dalam 20 menit dan 850 – 900 °C setelah 20 menit pada bagian yang terbakar langsung atau terkena api.

Gambar 4 menampilkan kurva suhu pada contoh uji kayu pinus CFR, meranti merah CFR dan jati CFR yang berbeda dengan kurva suhu pada kontrolnya pada uji pembakaran. Suhu pada kayu pinus CFR lebih rendah dibandingkan suhu pada kontrol serta lebih rendah dibandingkan suhu pada kayu meranti CFR dan jati CFR, yang belum diketahui penyebabnya mengingat karakteristik yang sama dari material CFR yang ditempelkan pada ketiga jenis kayu tersebut. Perbedaan kurva suhu pada kayu dengan perlakuan CFR dan kurva suhu pada kayu kontrol menunjukkan keberadaan material CFR efektif berfungsi sebagai material solid penghambat (*solid barrier material*) (Lee et al. 2019; Yan et al. 2019; Wang et al. 2019) karena ketahanan oksidasinya (Ishihara 1996) yang memberikan perlindungan bagi material kayu di lapisan dalamnya. Proses degradasi panas terjadi pada material CFR ditunjukkan dengan suhu material CFR dalam uji pembakaran kayu meranti

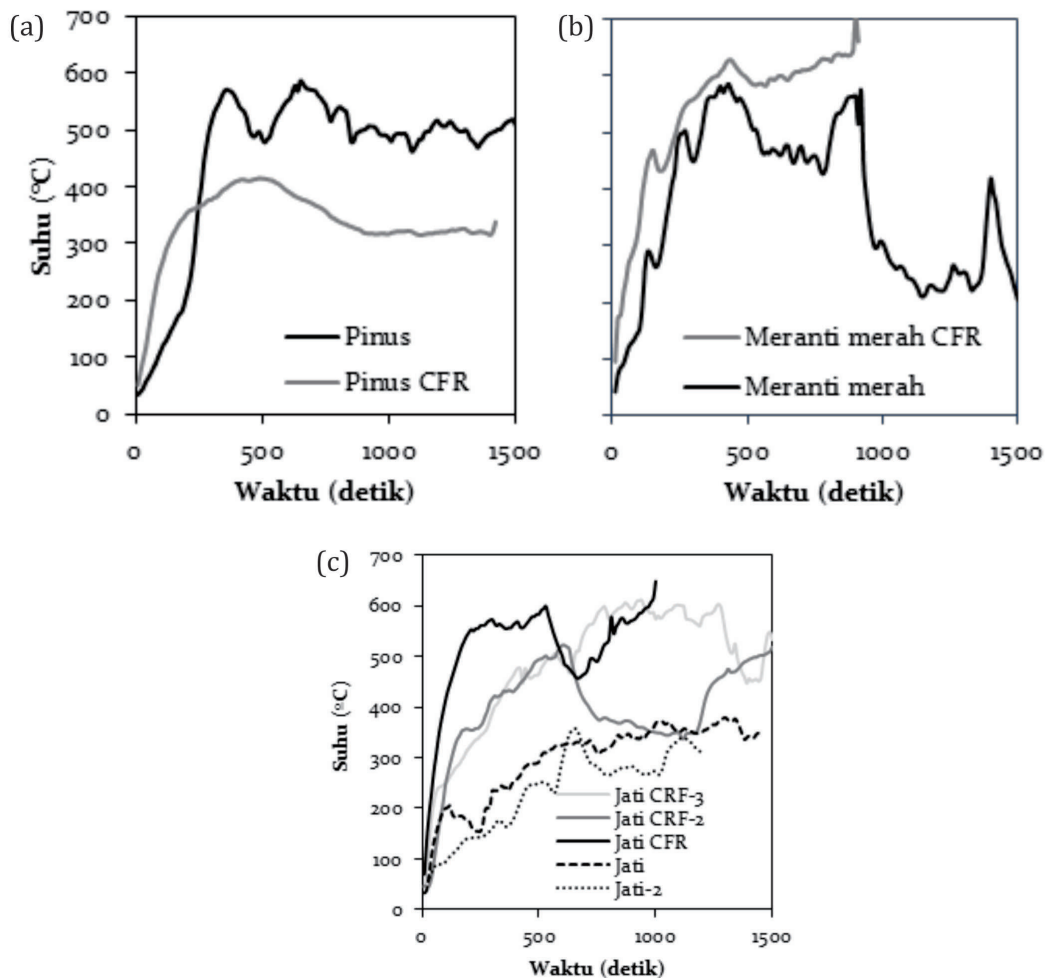
merah CFR dan jati CFR yang berbeda dengan suhu dari proses degradasi panas pada kayu kontrolnya. Tingginya suhu pada lembaran CFR dari arang kayu sengon yang dilapiskan pada kayu disebabkan tingginya kandungan karbon terikat dalam arang (seperti ditunjukkan dalam Tabel 1) dan tingginya nilai kalor pada material arang dibandingkan kayu (Gomez-Serrano et al. 1993). Sulistyo et al. (2012) juga melaporkan bahwa suhu degradasi arang kayu terjadi pada suhu 500 – 800 °C. Meskipun uji pembakaran menyebabkan degradasi material CFR tetapi material kayu di bagian interior atau di sebelah dalam lapisan CFR terlindungi dari degradasi panas selama pembakaran seperti yang ditunjukkan Gambar 1(e) dan 2(b). Material kayu terlindungi keberadaan lembaran CFR dari material karbon atau arang kayu yang lebih tahan oksidasi (Ishihara 1996) yang melapisi permukaan kayu dalam uji pembakaran seperti dibahas dalam bagian sebelumnya. Oleh karenanya keberadaan lembaran CFR yang melapisi permukaan kayu dapat meningkatkan ketahanan api pada material kayu.

Waktu mencapai 260 °C

Suhu 260 °C merupakan titik kritis pada degradasi komponen selulosa kayu dalam kebakaran (Byrne & Nagle 1997; Subyakto et al. 2003). Kayu jati dengan

berat jenis yang lebih tinggi, morfologinya yang lebih padat dan kandungan lignin yang lebih tinggi dibandingkan dengan kayu pinus dan kayu meranti merah, memiliki sifat ketahanan terhadap api yang lebih tinggi (Haurie et al. 2019). Kenaikan suhu pada kayu jati lebih perlahan dibandingkan kayu pinus dan kayu meranti merah dalam uji pembakaran, seperti yang ditunjukkan pada bagian sebelumnya. Oleh karenanya suhu 260 °C pada kayu jati dicapai dalam waktu yang lebih lama dibandingkan kedua jenis kayu lainnya seperti dalam Tabel 3. Perlakuan pelapisan CFR dari arang kayu sengon berpengaruh terhadap semakin singkatnya waktu mencapai suhu 260 °C pada ketiga jenis kayu dalam uji pembakaran. Seperti yang dibahas pada bagian sebelumnya, bahwa pada uji pembakaran pinus CFR, meranti

merah CFR dan jati CFR terjadi degradasi panas pada lapisan material arang yang melapisi material kayunya. Material CFR dari arang kayu sengon memiliki kandungan karbon terikat yang tinggi (ditunjukkan dalam Tabel 1) dan nilai kalor yang tinggi dibandingkan kayu (Gomez-Serrano et al. 1993) sehingga proses degradasi panas material arang ini dalam uji pembakaran mengeluarkan panas dengan suhu yang tinggi seperti yang dilaporkan Sulistyo et al. (2012) pada suhu 500 – 800 °C. Oleh karenanya contoh uji kayu pinus CFR, meranti merah CFR dan jati CFR dalam uji pembakaran suhunya meningkat tajam dalam waktu yang singkat, suhu 260 °C dicapai dalam 102 detik pada pinus CFR, 60 detik pada meranti merah CFR dan 50-120 detik pada jati CFR.



Gambar 4. Kurva suhu pada kayu (a) pinus, (b) meranti merah, dan (c) jati dengan pelapisan CFR dan kontrol dalam pengujian pembakaran; kayu jati menggunakan 2 ulangan yaitu jati dan jati-2

Figure 4. The curves of temperature of (a) pinus, (b) red meranti and (c) teak timbers overlaid by CFR and controls in fire test; teak used 2 replications i.e. teak and teak-2

Kehilangan berat

Tabel 3 menunjukkan persen kehilangan berat kayu (%) terhadap berat asal selama pengujian pembakaran pada ketiga jenis kayu dengan pelapisan CFR dan kontrol. Kayu Jati memiliki ketahanan api yang paling tinggi dengan persen kehilangan berat yang paling rendah hanya 10,14% dan 12,57% sehingga beratnya menjadi 90% dari berat awal setelah 1500 detik sesuai dengan hasil yang dilaporkan Gaff et al. (2019) sebesar 13%. Sementara itu kayu pinus dan meranti merah kehilangan berat 76,98% dan 30,72% dalam waktu 1500 detik. Hasil ini sesuai dengan hasil bagian sebelumnya bahwa kayu jati memiliki sifat ketahanan terhadap api yang lebih tinggi dikarenakan berat jenisnya yang lebih tinggi, morfologinya yang lebih padat dan kandungan ligninnya yang lebih tinggi dibandingkan dengan kayu pinus dan kayu meranti merah (Haurie et al. 2019). Sebagai perbandingan kehilangan berat pada beberapa kayu yang lain antara lain kayu red gum sebesar 62,10% (Wu et al. 2014) dan kayu lapis pinus radiata dilapisi finis port oford cedar 0,6 mm sebesar lebih dari 90% walaupun telah diberi pengawet boron yang dicampur dalam perekatnya (Su et al. 1998).

Pelapisan material CFR pada permukaan kayu pinus, meranti merah dan jati berpengaruh terhadap perubahan persen kehilangan berat dibandingkan kayu kontrolnya seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 3. Keberadaan material CFR pada permukaan kayu pinus dan meranti merah dapat menurunkan persentase kehilangan berat. Persentase kehilangan

berat pada kayu pinus CFR sebesar 50,56% lebih rendah dari kayu pinus sebesar 76,98%. Adapun persentase kehilangan berat pada kayu meranti merah CFR sebesar 26,57% lebih rendah dari kehilangan berat kayu meranti sebesar 30,72%. Hal yang berbeda dijumpai pada kayu jati CFR yang memiliki kehilangan berat sebesar 28,39%, 19,95% dan 26,96% yang lebih besar dibandingkan dengan kayu jati kontrol dengan kehilangan berat hanya 10,14% dan 12,57%. Perbedaan nilai persentase kehilangan berat pada kayu dengan pelapisan material CFR dibandingkan kayu kontrol dalam uji pembakaran, menunjukkan terjadinya proses degradasi panas pada material CFR pada kayu jati CFR, pinus CFR dan meranti merah CFR yang berbeda dengan degradasi panas pada kayu kontrol. Seperti dibahas pada bagian sebelumnya, keberadaan material CFR efektif berfungsi sebagai material solid penghambat (*solid barrier material*) (Lee et al. 2019; Yan et al. 2019; Wang et al. 2019) karena ketahanan oksidasinya (Ishihara 1996) yang memberikan perlindungan bagi material kayu dalam uji pembakaran. Oleh karenanya kehilangan berat pada pinus CFR dan meranti merah CFR lebih rendah daripada kayu kontrolnya. Hasil yang berbeda ditunjukkan persentase kehilangan berat kayu jati kontrol yang lebih rendah dibandingkan kehilangan berat pada kayu jati CFR. Hasil ini menandakan sifat ketahanan api pada kayu jati lebih tinggi dibandingkan material CFR dari arang sengon. Kayu jati dengan berat jenis 0,67 memiliki morfologi yang padat dengan kandungan lignin yang tinggi (Martawijaya et al. 1981) memiliki stabilitas termal dan ketahanan terhadap api yang

Tabel 3. Waktu yang dibutuhkan mencapai suhu 260 °C (detik) dan kehilangan berat (%) kayu pinus CFR, meranti merah CFR, jati CFR dan kayu kontrol pada uji pembakaran

Table 3. Time to reach temperature of 260 °C (seconds) and weight loss (%) of pinus (CFR), red meranti CFR and teak CFR and control timbers in the fire test

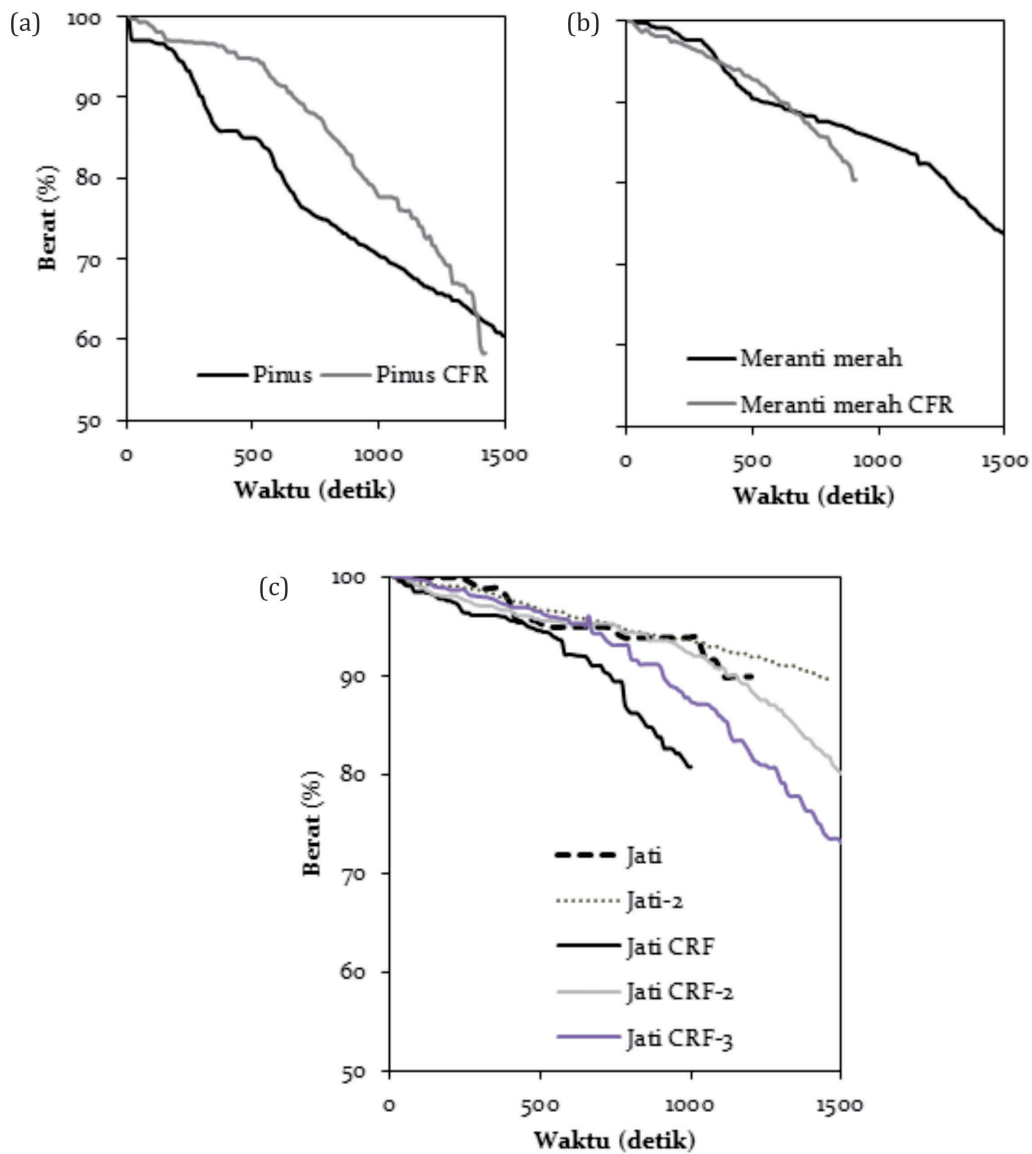
| Jenis Kayu | Waktu mencapai 260 °C (detik) | Kehilangan berat (%) |
|-------------------|-------------------------------|----------------------|
| Pinus | 230 | 76,98 |
| Pinus CFR | 102 | 50,56 |
| Meranti merah | 120 | 30,72 |
| Meranti merah CFR | 60 | 26,57 |
| Jati | 510 | 10,14 |
| Jati-2 | 410 | 12,57 |
| Jati CFR | 50 | 28,39 |
| Jati CFR-2 | 110 | 19,95 |
| Jati CFR-3 | 120 | 26,96 |

lebih tinggi (Haurie et al. 2019) sehingga degradasi panas berjalan perlahan, dibandingkan material CRF dengan kerapatan $0,59 \text{ g/cm}^3$ yang morfologinya kurang padat. Pengaruh kerapatan kayu dalam sifat penyalaan api juga dinyatakan oleh White dan Diertenberger (1999). Meskipun material CFR dari arang kayu sengon menunjukkan persen kehilangan berat lebih tinggi dibandingkan kayu jati kontrol, akan tetapi material CFR menunjukkan efektifitas fungsinya sebagai material solid penghambat degradasi panas bagi material kayu jati di dalamnya seperti ditunjukkan Gambar 1(e) dan 2(b).

Perubahan berat

Gambar 5 menunjukkan perbedaan perubahan berat pada kayu kontrol dan kayu dengan pemberian perlakuan pelapisan CFR pada uji pembakaran. Perubahan berat pada kayu pinus paling besar dibandingkan perubahan berat pada kedua jenis kayu lainnya yang ditandai slop grafik yang lebih tajam menunjukkan stabilitas termal paling rendah (Costes et al. 2017) seperti pada Gambar 5(a). Perubahan berat kayu pinus dalam uji pembakaran bila dikaitkan dengan degradasi komponen kimia kayu berdasarkan Haurie et al. (2019) dan pembahasan bagian sebelumnya, pada kisaran suhu degradasi hemiselulosa $180\text{-}350 \text{ }^\circ\text{C}$ dan suhu degradasi selulosa $275\text{-}350 \text{ }^\circ\text{C}$ antara $140\text{-}200$ detik menunjukkan perubahan berat kayu pinus menjadi $96\text{-}97\%$ dari berat awalnya, dan pada kisaran suhu degradasi lignin $250\text{-}500 \text{ }^\circ\text{C}$ mulai dari 330 detik menunjukkan berat kayu pinus sebesar 88% dari berat awalnya. Uji pembakaran sampai dengan 1000 detik dan 1500 detik menyebabkan penurunan berat yang drastis pada kayu pinus menjadi berturut-turut 70% dan 60% dari berat awalnya, dengan bentuk fisik contoh uji yang tidak utuh dan hancur seperti dalam Gambar 1(b). Gambar 5(b) menunjukkan

perubahan berat kayu meranti merah bila dikaitkan dengan suhu degradasi komponen kimia menurut Haurie et al. (2019) maka didapati penurunan berat yang kecil pada suhu dekomposisi hemiselulosa dan selulosa serta lignin sampai 330 detik dengan berat kayu meranti merah masih 97% dari berat awalnya. Selanjutnya berat kayu meranti merah pada uji pembakaran menurun menjadi 85% dari berat awalnya dalam 1000 detik dan 74% dari berat awalnya dalam 1500 detik, dengan contoh uji yang relatif utuh bentuk fisiknya namun terdegradasi pada hampir seluruh permukaan dan terbentuk lapisan arang yang terpecah-pecah seperti dalam Gambar 1(c). Perubahan berat kayu jati pada uji pembakaran dalam Gambar 5 (c) menunjukkan perubahan yang relatif kecil yang ditunjukkan dari grafik yang relatif landai dibandingkan grafik pada kayu pinus dan meranti merah. Grafik landai ini menunjukkan bahwa kayu jati memiliki stabilitas termal paling tinggi (Costes et al. 2017). Perubahan berat kayu jati bila dikaitkan dengan suhu degradasi komponen hemiselulosa ($180\text{-}350 \text{ }^\circ\text{C}$), selulosa ($275\text{-}350 \text{ }^\circ\text{C}$) dan lignin ($250\text{-}500 \text{ }^\circ\text{C}$) menurut (Haurie et al. 2019) sampai dengan 980 detik hanya menimbulkan perubahan berat menjadi 92% dari berat awalnya. Uji pembakaran lebih lanjut mempengaruhi perubahan berat kayu jati hanya 8% dan beratnya 92% dari berat awalnya setelah 1000 detik dan berkurang sedikit menjadi 90% dari berat awal setelah 1450 detik, dengan bentuk fisik kayu yang masih utuh dan degradasi panas pada sebagian besar permukaannya seperti dalam Gambar 1(d) serta sesuai dengan hasil yang dilaporkan Gaff et al. (2019). Perbedaan karakteristik perubahan berat pada ketiga jenis kayu ini disebabkan karena kerapatan dan morfologi kayunya (Haurie et al. 2019) serta perbedaan kandungan lignin (Martawijaya et al. 1981; 1989) seperti didiskusikan pada bagian sebelumnya.



Gambar 5. Kurva perubahan berat (%) pada kayu (a) pinus, (b) meranti merah dan (c) Jati (2 ulangan yaitu jati dan jati-2) dengan pelapisan CFR dan kontrol dalam pengujian pembakaran; kayu jati menggunakan 2 ulangan yaitu jati dan jati-2

Figure 5. The curves of weight change (%) of (a) pinus, (b) red meranti and (c) teak timbers overlaid by CFR and controls in fire test; teak used 2 replications i.e. teak and teak-2

Pelapisan material CFR pada kayu pinus memberikan pengaruh pada perubahan berat sekitar 22% dan beratnya menjadi 78% dari berat awalnya pada uji pembakaran. Hal ini menunjukkan bahwa material CFR efektif memberikan perlindungan bagi material kayu pinus pada uji pembakaran. Hasil yang berbeda dijumpai pada pelapisan material CFR pada kayu meranti merah dan kayu jati yang menghasilkan perubahan berat yang relatif sama dengan perubahan berat pada kayu kontrolnya pada uji pembakaran sampai 700 detik pada kayu

meranti merah CFR (Gambar 5(b)) dan sampai 670-1.160 detik pada jati CFR (Gambar 5 (c)). Hasil pada Gambar 4 menunjukkan bahwa suhu pada kayu meranti merah CFR antara 260 – 650 detik dan jati CFR antara 600 – 1.300 detik pada uji pembakaran mengindikasikan suhu dari terjadinya dekomposisi panas material CFR. Oleh karenanya material kayu dalam meranti merah CFR dan jati CFR terlindungi pada uji pembakaran seperti yang ditunjukkan Gambar 1(e) dan 2(b). Setelah 700 detik uji pembakaran, perubahan berat terjadi menjadi

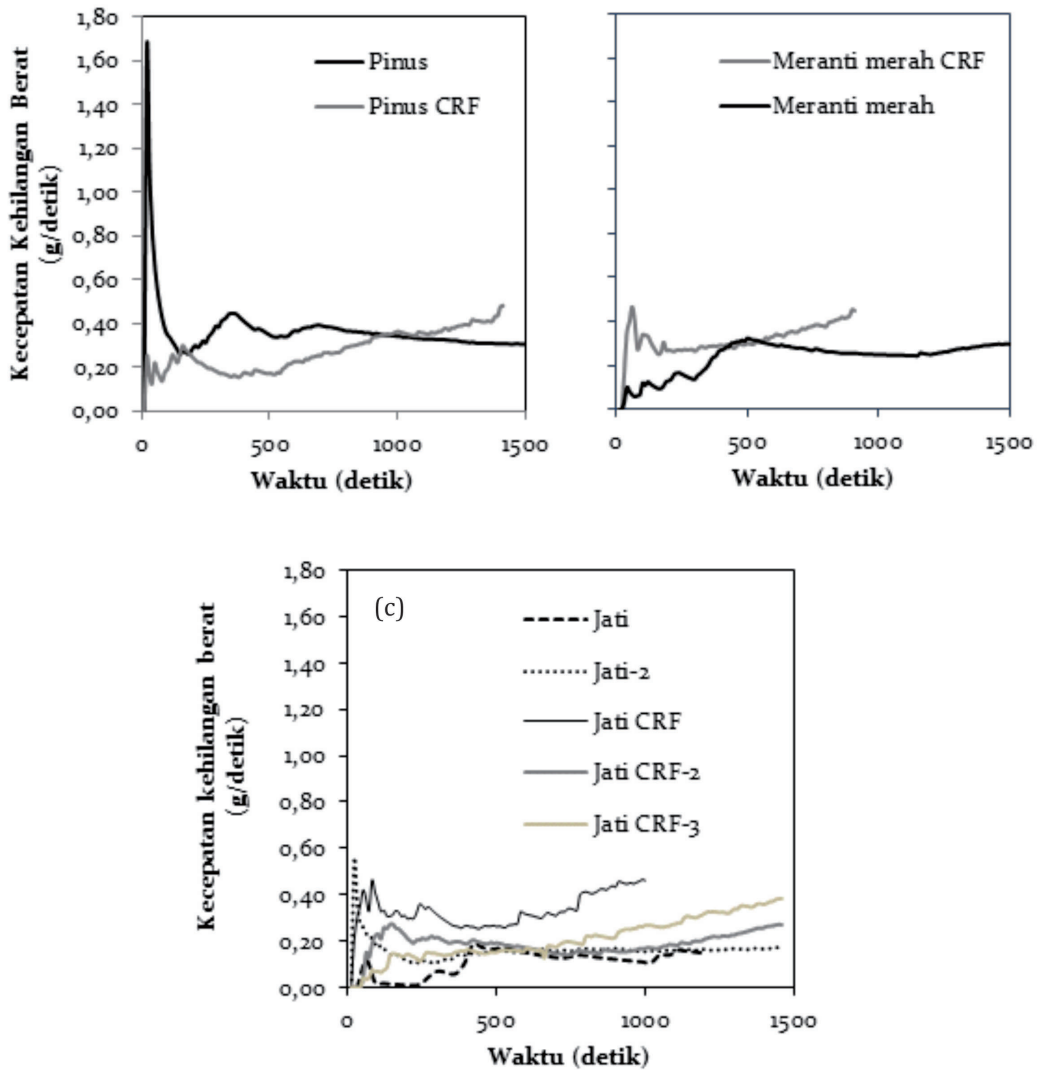
lebih drastis terjadi pada kayu meranti CFR dengan beratnya mencapai 80% dari berat awal dalam waktu 900 detik, sedangkan berat meranti merah kontrol 86% dari berat awal. Hal yang sama juga terjadi pada contoh uji kayu jati. Uji pembakaran selama 1000 detik menunjukkan perubahan berat pada jati CFR, jati CFR-2 dan jati CFR-3 yang lebih tajam dan bervariasi berturut-turut beratnya menjadi 81%, 92% dan 87% dari berat awalnya, yang cenderung lebih rendah dari kayu jati kontrolnya dengan berat sekitar 92% dari berat awalnya. Uji pembakaran sampai dengan 1500 detik memberikan berat jati CFR-2 dan jati CFR-3 berturut-turut menjadi 80% dan 73% dari berat awalnya. Meskipun berat jati CFR lebih rendah daripada kayu jati kontrol yang beratnya menjadi 90% dari berat awalnya pada uji pembakaran sampai 1500 detik, namun Gambar 1(e) dan 2 (b) menunjukkan pelapisan CFR pada kayu jati dapat mengurangi panas pembakaran untuk mendekomposisi material kayu di bagian dalam lembaran CFR dengan bertindak sebagai material solid penghambat (*solid barrier material*) panas (Lee et al. 2019; Yan et al. 2019; Wang et al. 2019). Oleh karena itu uji pembakaran pada jati CFR mendekomposisi lembaran CFR dan sebagian material kayu jati namun tidak sebesar dekomposisi material kayu pada kayu jati kontrol.

Kecepatan kehilangan berat

Gambar 6 menunjukkan kurva kecepatan kehilangan berat pada kayu pinus, meranti merah dan jati dengan perlakuan pelapisan CFR dan kontrol. Kayu pinus memiliki kecepatan meningkat tajam sampai 1,65 g/detik pada tahap awal uji pembakaran sampai 20 detik, kemudian cenderung mendatar dengan kecepatan sekitar 0,31-0,38 g/detik sampai dengan akhir uji pembakaran. Adapun contoh uji kayu pinus CFR menunjukkan peningkatan kecepatan kehilangan berat dari 0,20 g/detik sampai 0,40 g/detik pada 1500 detik. Contoh uji kayu meranti merah dan jati memiliki kecenderungan yang sama yaitu meningkat perlahan dari 0,07 g/detik menjadi 0,31 g/detik pada 500 detik kemudian stabil sampai dengan waktu 1500 detik. Kayu jati menunjukkan kecepatan kehilangan berat yang tinggi di awal uji

bakar (0,55 g/detik) kemudian mendatar dengan nilai sekitar 0,11 – 0,17 g/detik. Kayu jati-2 menunjukkan kecepatan kehilangan berat yang rendah pada tahap awal uji pembakaran, kemudian meningkat perlahan mencapai 0,18 g/detik pada 420 detik dan setelah itu cenderung mendatar. Perlakuan pelapisan CFR pada kayu meranti merah dan jati berpengaruh terhadap peningkatan kecepatan kehilangan berat mencapai 0,40 g/detik pada tahap awal uji pembakaran, yang diikuti dengan peningkatan kecepatan kehilangan berat secara perlahan. Subyakto et al. (2003) melaporkan kecenderungan kurva kecepatan kehilangan berat dengan tren yang relatif sama, yaitu nilai kecepatan kehilangan berat meningkat tajam di awal uji bakar kemudian menurun dan relatif sama hingga waktu 600 detik pada sengon atau 900 detik pada gmelina, setelah itu diikuti kenaikan yang tajam dan menurun hingga pengujian selesai.

Adapun pelapisan material CFR pada permukaan kayu menyebabkan perubahan grafik kecepatan kehilangan berat dengan kecenderungan yang berbeda dalam uji pembakaran. Kayu pinus CFR, meranti merah CFR dan jati CFR menunjukkan kenaikan perlahan kecepatan kehilangan berat pada awal uji pembakaran, yang diikuti sedikit mendatar dari sekitar 260 sampai sekitar 540-750 detik serta diakhiri kecenderungan kenaikan pada akhir pengujian setelah 1.030 detik pada pinus CFR, 600 pada meranti merah CFR, 700-1.000 detik pada kayu jati CFR. Karakteristik ini kemungkinan dipengaruhi material arang penyusun CFR yang memiliki ketahanan oksidasi (Ishihara 1996) sehingga pada tahap awal uji pembakaran menunjukkan kenaikan perlahan. Keberadaan pelapisan CFR efektif melindungi material kayu di dalamnya bertindak sebagai material solid penghambat (*solid barrier material*) panas (Lee et al. 2019; Yan et al. 2019; Wang et al. 2019) dengan memblokir panas dari api pada uji pembakaran sehingga degradasi panas terjadi pada lapisan CFR sampai menuju kenaikan kecepatan kehilangan berat setelah 1.030 detik pada kayu pinus CFR, 600 detik pada kayu meranti merah CFR dan sekitar 700-1.000 detik pada kayu jati CFR.



Gambar 6. Kurva kecepatan kehilangan berat (g/detik) contoh uji kayu (a) pinus, (b) meranti merah dan (c) jati dengan pelapisan CFR dan kontrol dalam pengujian pembakaran; kayu jati menggunakan 2 ulangan yaitu jati dan jati-2

Figure 6. The curves of weight loss rate (g/s) of (a) pinus, (b) red meranti and (c) teak timbers overlaid by CFR and controls in fire test; teak used 2 replications i.e. teak and teak-2

Kesimpulan

Pelapisan lembaran CFR dari arang kayu sengon efektif meningkatkan ketahanan api pada kayu pinus, meranti merah dan jati. Keberadaan lapisan CFR pada permukaan kayu efektif berfungsi sebagai solid material penghambat panas yang mampu memblok panas dari api dan melindungi dari terjadinya degradasi material kayu pada uji pembakaran yang ditunjukkan dengan persentase luas penampang melintang yang tidak terbakar pada jati CFR sebesar 68,6% yang lebih besar dibandingkan jati kontrol sebesar 57,9%. Suhu pada kayu jati CFR dan meranti merah CFR yang lebih tinggi dari kontrol dalam uji

pembakaran menunjukkan proses dekomposisi panas terjadi pada lapisan material CFR. Pengaruh pelapisan material CFR pada peningkatan ketahanan api kayu pinus, meranti merah dan jati pada uji pembakaran ditunjukkan dengan rendahnya persentase kehilangan berat pada kayu pinus CFR dan meranti merah CFR sebesar 50,56% dan 26,57% dibandingkan kontrolnya sebesar 76,98% dan 30,72%, perubahan berat yang relatif sama dengan kontrol pada kayu jati dan meranti merah sampai 700-1.160 detik, dan kecepatan kehilangan berat dengan kecenderungan kenaikan yang lambat pada awal uji pembakaran diikuti kecenderungan mendatar sampai sekitar 1.000 detik dan meningkat pada akhir pengujian

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian yang didanai DPP Fakultas Kehutanan Universitas Gadjah Mada tahun 2015.

Daftar Pustaka

- Anonim. 1976. Vademecum Kehutanan Indonesia, Departemen Pertanian, Direktorat Jenderal Kehutanan
- BNPB. 2014. Data Kejadian Bencana Kebakaran Perumahan dalam 1 Bulan Terakhir, geospasial.bnpb.go.id/pantauanbencana/data/dataakbmukim.php. Diakses Maret 2014.
- Bakirtzis D, Delichatsios MA, Liodakis S, Ahmed W. 2009. Fire Retardancy Impact of Sodium Bicarbonate on Ligno-Cellulosic Materials. *Thermochimica Acta* **486**: 11-19.
- Byrne CE, Nagle DC. 1997. Carbonization of Wood for Advanced Materials Applications. *Carbon* **35**: 259-266.
- Byrne CE, Nagle DC. 1997. Carbonized Wood Monolith – Characterization. *Carbon* **35**: 267-273.
- Costes L, Laoutid F, Brohez S, Dubois P. 2017. Bio-based Flame Retardants: When Nature Meets Fire Protection. *Material Science and Engineering R* **117**: 1-25.
- Dinwoodie JM. 2000. Timber: Its nature and behavior. Second Edition. E & FN Spon. New York.
- Gaff M, Kacik F, Gasparik M, Todaro L, Jones D, Corleto R, Osvaldova LM, Cekovska H. 2019. The Effect of Synthetic and Natural Fire-Retardants on Burning and Chemical Characteristics of Thermally Modified Teak (*Tectona grandis* L.f.) Wood. *Construction and Building Materials* **200**: 551-558.
- Garcia M, Hidalgo J, Garmedia I, Garcia-Jaca J. 2009. Wood-Plastic Composites with Better Fire Retardancy and Durability Performance. *Composites: Part A*. **40**: 1772-1776.
- Gomez-Serrano V, Valenzuela-Calahorra C, Pastor-Villegas J. 1993. Characterization of Rockrose Wood, Char and Activated Carbon. *Carbon* **4**: 355-364.
- Haurie L, Gilardo MP, Lacasta AM, Monton J, Sonnier R. 2019. Influence of Different Parameters in the Fire Behaviour of Seven Hardwood Species. *Fire Safety Journal* **107**: 193-201.
- Ishihara S. 1996. Carbon Composites. In Salamone JC (ed) *Polymeric material encyclopedia 2*. CRC Press. Boca Raton
- Kim DY, Kwon GJ, Kang JH. 2015. Dependence of the Characteristics of Wood Charcoal on the Carbonization Conditions. *Journal of the Korean Physical Society* **67**: 694-699.
- Kretschmann DE, Hernandez R. 2006. Grading Timber and Glued Structural Members. In J.C.F. Walker (ed) *Primary Wood Processing: Principles and Practice*. 2nd Edition. Springer. Dordrecht. The Netherlands.
- Lee YR, Kim SC, Le H, Jeong HM, Raghu AV, Reddy KR, Kim BK. 2011. Graphite Oxides as Effective Fire Retardant of Epoxy Resin. *Macromolecular Research* **19**: 66-71.
- Martawijaya A, Kartasujana I, Kadir K, Prawira SA. 1981. Atlas Kayu Indonesia. Jilid I. Pusat Penelitian dan Pengembangan Kehutanan.
- Martawijaya A, Kartasujana I, Mandang YI, Prawira SA, Kadir K. 1989. Atlas Kayu Indonesia. Jilid II. Departemen Kehutanan. Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan.
- Mlaouhi A, Khouaja A, Saoudi H, Depeyre D. 1999. Trials of Wood Carbonization of Some Forest and Fruit-Bearing Species. *Renewable Energy* **16**: 1118-1121.
- Qi J, Zhao J, Xu Y, Wang Y, Han K. 2018. Segmented Heating Carbonization of Biomass: Yields, Property and Estimation of Heating Value of Chars. *Energy* **144**: 301-311.
- Su WY, Subyakto, Hata T, Nishimiya K, Imamura Y, Ishihara S. 1998. Improvement of Fire Retardancy of Plywood by Incorporating Boron or Phosphate Compounds in the Glue. *Journal of Wood Science* **44**: 131-136.
- Subyakto, Subiyanto B, Hata T, Kawai S. 2003. Evaluation of Fire-Retardant Properties of Edge-Joint Lumber from Tropical Fast-Growing Wood Using Cone Calorimeter and a Standard Fire Test. *Journal of Wood Science* **49**: 241-247.
- Subyakto, Hata T, Ide I, Yamane T, Kawai S. 2004. Fire Protection of a Laminated Veneer Lumber Joint by Wood Carbon Phenolic Spheres Sheeting. *Journal of Wood Science* **50**: 157-161.
- Sulistyo J, Hata T, Marsoem SN. 2012. Microstructure of Charcoal Produced by Traditional Technique. In *Proceedings of the 3rd International Symposium of Indonesia Wood Research Society*. Faculty of Forestry Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Silva FTM, Ataide CH. 2019. Valorization of Eucalyptus urograndis wood via carbonization: Product Yields and Characterization. *Energy* **172**: 509-516.
- Tomak ED, Cavdar AD. 2013. Limited Oxygen Index Levels of Impregnated Scots Pine Wood. *Thermochimica Acta* **573**: 181-185.
- Tsoumis G. 1991. *Science and Technology of Wood: Structure, Properties, Utilization*. Van Nostrand Reinhold. New York.
- White RH, Dietsberger MA. 1999. *Fires Safety in Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. USDA. Forest Service.
- Wu Y, Yao C, Hu Y, Yang S, Qing Y, Wu Q. 2014. Flame Retardancy and Thermal Degradation Behavior of Red Gum Wood Treated with Hydrate Magnesium Chloride. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* **22**: 3536-3542.
- Wang YC, Zhao JP, Meng X. 2019. Effect of Expandable Graphite on Polyester Resin-Based Intumescent Flame Retardant Coating. *Progress in Organic Coatings* **132**: 178-183.
- Yan L, Xu Z, Lu D. 2019. Synthesis and Application of Novel Magnesium Phosphate Ester Flame Retardants for Transparent Intumescent Fire-Retardant Coatings Applied on Wood Substrate. *Progress in Organic Coatings* **129**: 327-337.