

Evaluasi Laju Pembentukan Arang pada Papan Kayu Akasia Terpapar Temperatur Kebakaran Standar ISO 834

R.T. Seilina¹, A. Awaludin^{1*}, I. S. Irawati¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: ali.awaludin@ugm.ac.id

INTISARI

Ketahanan api kayu sangat dipengaruhi oleh pembentukan lapisan arang (*char layer*) yang berfungsi sebagai pelindung termal alami terhadap rambatan panas. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi laju pembentukan arang pada papan kayu akasia yang terpapar temperatur kebakaran standar ISO 834 melalui simulasi numerik berbasis elemen hingga menggunakan Abaqus. Sebagai pembandingan, analisis juga dilakukan pada kondisi suhu konstan 300°C untuk mengamati respon termal material. Model kayu berdimensi 1060 × 1050 × 75 mm dengan parameter konduktivitas termal 0,0002 W/mm·K, kapasitas panas jenis 1700 J/kg·K, dan densitas 0,0000052 kg/mm³. Hasil simulasi menunjukkan pembentukan arang berkembang dari permukaan menuju bagian dalam dengan ketebalan ±35 mm dan laju 0,58 mm/menit setelah 60 menit paparan. Verifikasi dengan data eksperimen menunjukkan selisih rata-rata 1,9%, sehingga model dinyatakan valid. Temuan ini menegaskan bahwa papan kayu akasia memiliki ketahanan termal yang baik terhadap paparan api, dan nilai *charring rate* yang diperoleh dapat dijadikan acuan dalam desain ketahanan api struktur kayu sesuai pedoman ISO 834 dan Eurocode 5.

Kata kunci: kayu akasia, pembentukan arang, ketahanan api, ISO 834, simulasi numerik

1 PENDAHULUAN

Kayu merupakan material alami yang banyak digunakan dalam konstruksi karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi serta bersifat ramah lingkungan. Karakteristik mekanik yang baik membuat kayu cocok untuk berbagai aplikasi struktural (Kretschmann & Hernandez, 2006). Namun, salah satu keterbatasan utama kayu adalah sifatnya yang mudah terbakar, sehingga aspek ketahanan terhadap api menjadi faktor penting dalam penggunaannya sebagai elemen struktural. Risiko kebakaran menjadi salah satu tantangan utama dalam penerapan kayu sebagai material bangunan (Östman, 2017).

Ketika terpapar panas, kayu mengalami proses degradasi termal yang menyebabkan perubahan kimia dan fisik, termasuk penguapan air, pelepasan gas volatil, serta pembentukan lapisan arang (*char layer*) di permukaan. Pada suhu sekitar 250°C, kayu mulai melepaskan gas volatil akibat dekomposisi senyawa organik (Sulistyo et al., 2020). Proses ini kemudian berlanjut hingga terbentuk lapisan arang yang berfungsi sebagai pelindung alami terhadap rambatan panas lebih lanjut (Maake et al., 2020).

Dalam perkembangan terkini, pendekatan berbasis kinerja digunakan dalam regulasi bangunan dengan penilaian ketahanan api kayu dilakukan berdasarkan performa aktualnya terhadap panas dan api (Klippel et al., 2014). Lapisan arang yang terbentuk akibat proses pirolisis berperan penting dalam memperlambat laju perpindahan panas ke bagian dalam kayu. Laju terbentuknya lapisan arang, yang dikenal sebagai *charring rate*, merupakan parameter utama dalam menentukan waktu ketahanan api (*fire resistance rating*) suatu elemen kayu (Mikkola, 1991). Nilai laju karbonisasi digunakan untuk memperkirakan berkurangnya penampang efektif kayu selama paparan api (EN 1995-1-2: Eurocode 5: Design of Timber Structures - Part 1-2: General - Structural Fire Design, 2004).

Standar kebakaran internasional ISO 834 memberikan kurva temperatur terhadap waktu yang merepresentasikan kondisi kebakaran bangunan secara terstandar. Penggunaan kurva ini memungkinkan evaluasi performa material kayu terhadap paparan panas ekstrem secara konsisten dan dapat dibandingkan antar penelitian (ISO, 1999). Dalam beberapa tahun terakhir, analisis berbasis elemen hingga telah menjadi pendekatan yang efektif untuk mempelajari perilaku termal kayu karena mampu memprediksi distribusi suhu dan kedalaman arang secara detail (Eremina & Korolchenko, 2023).

Akasia (*Acacia auriculiformis* dan *Acacia mangium*) merupakan salah satu jenis kayu tropis dengan potensi tinggi sebagai bahan konstruksi berkelanjutan karena ketersediaannya yang melimpah dan pertumbuhan cepat. Kayu akasia memiliki kandungan kimia dan sifat fisik yang mendukung penggunaannya sebagai material konstruksi, meskipun data ketahanan termalnya masih terbatas (Longui et al., 2024). Oleh sebab itu, diperlukan kajian yang lebih mendalam untuk memahami perilaku termal kayu akasia, khususnya dalam hal pembentukan arang saat terpapar kondisi kebakaran.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi laju pembentukan arang pada papan kayu akasia yang terpapar temperatur kebakaran standar ISO 834 melalui pendekatan simulasi numerik menggunakan perangkat lunak Abaqus. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah dalam memahami karakteristik termal kayu akasia serta mendukung penerapannya sebagai material konstruksi yang aman dan berkelanjutan terhadap bahaya kebakaran.

2 METODE

2.1 Spesimen Uji

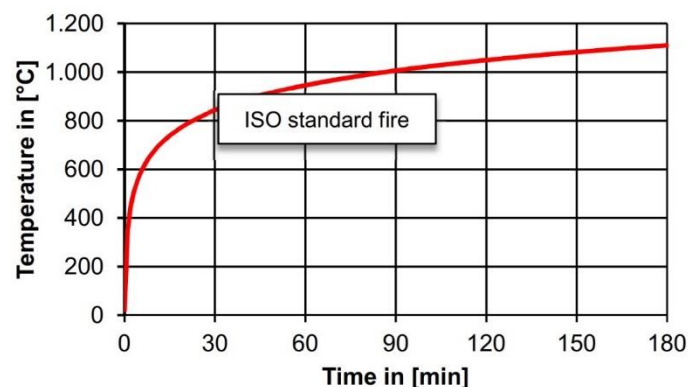
Spesimen yang digunakan berupa balok kayu akasia dengan dimensi 1060 mm × 1050 mm × 75 mm. Densitas kayu akasia digunakan sebesar 0,00000052 kg/mm³ (Gérard et al., 2017) dan konduktivitas termal kayu sebesar 0,0002 W/mm·K (EN 1995-1-2: Eurocode 5: Design of Timber Structures - Part 1-2: General - Structural Fire Design, 2004.) Kapasitas panas spesifik ditentukan sebesar 1700 J/kg·K sesuai rentang kayu kering (Radmanović et al., 2014). Ringkasan dimensi dan spesifikasi kayu material kayu akasia disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Dimensi dan spesifikasi material kayu akasia.

Parameter	Nilai	Satuan
Panjang	1060	mm
Lebar	1050	mm
Tebal	75	mm
Densitas	0,00000052	kg/mm ³
Konduktivitas Termal	0,0002	W/mm·K
Kapasitas Panas	1700	J/kg·K
Waktu Simulasi	3600	s

2.2 Instrumen dan Parameter Uji

Temperatur dicatat menggunakan termokopel yang ditempatkan pada beberapa titik permukaan spesimen. Parameter yang diamati meliputi temperatur pada permukaan belakang, tengah dan permukaan depan pada spesimen uji. Pengujian dilakukan pada dua kondisi: (1) suhu konstan, dan (2) paparan temperatur berdasarkan kurva standar ISO 834. Untuk memodelkan kondisi pembebanan termal akibat kebakaran, digunakan kurva standar kebakaran ISO 834 yang telah banyak dipakai dalam penelitian maupun standar peraturan bangunan terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kurva ISO 834 (BS EN 1363-1, 2012).

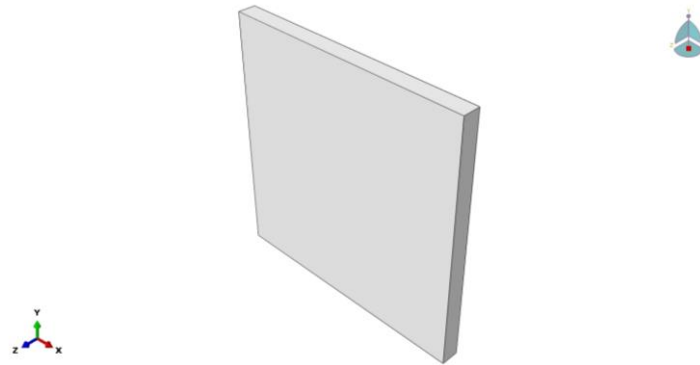
Kurva ini menggambarkan hubungan antara waktu paparan dan kenaikan temperatur lingkungan ditunjukkan secara sistematis pada Persamaan (1).

$$T_{(t)} = T_0 + 345 \log_{10} (8t + 1) \quad (1)$$

Dengan $T_{(t)}$ = suhu pada waktu t ($^{\circ}\text{C}$), T_0 = suhu awal ($^{\circ}\text{C}$) dan t = waktu dalam menit.

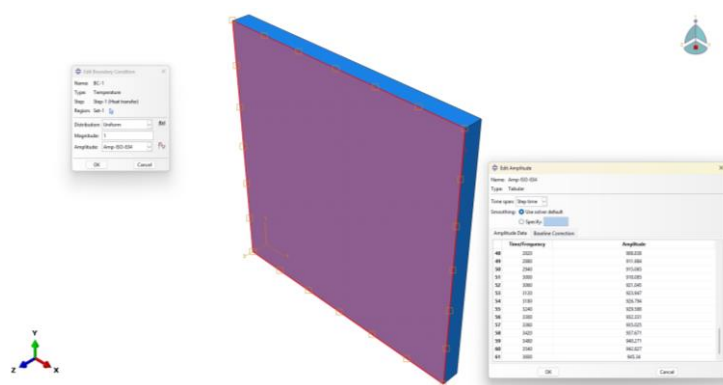
2.3 Pemodelan Numerik

Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak Abaqus. Geometri dimodelkan sesuai dimensi spesimen terlihat pada Gambar 2.

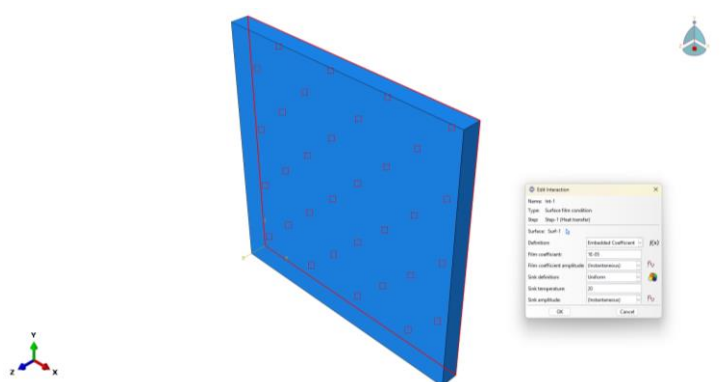


Gambar 2. Model geometri.

Kayu dimodelkan sebagai material isotropik homogen dengan properti material yang telah ditentukan berdasarkan data eksperimen dan literatur. Analisis dilakukan dalam *heat transfer step* tipe *transient* dengan total durasi simulasi 3600 detik, sehingga respon termal kayu terhadap waktu dapat diamati. Kondisi batas ditetapkan dengan satu sisi spesimen dikenai *boundary condition* konstan ditunjukkan pada Gambar 3 sebagai representasi paparan api, sementara sisi lainnya diasumsikan mengalami konveksi bebas dengan udara sekitarnya (Gambar 4).

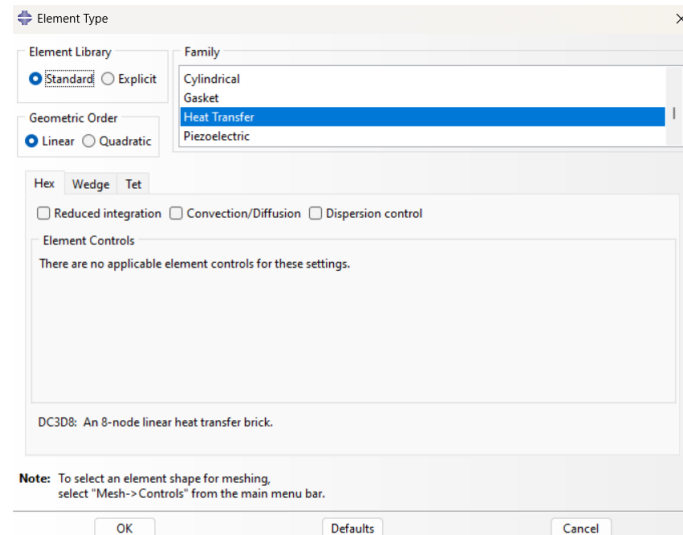


Gambar 3. Boundary condition.



Gambar 4. *Surface film condition.*

Untuk memastikan hasil simulasi stabil dan konvergen, proses *meshing* menggunakan elemen DC3D8 (*An 8-node linear heat transfer brick*) dengan pengaturan ukuran mesh yang disesuaikan agar distribusi suhu dapat dimodelkan secara akurat yang tertera pada Gambar 5 berikut.

Gambar 5. *Element type.*

2.4 Perhitungan Laju Pembentukan Arang (*Charring Rate*)

Laju pembentukan arang (β_0) dihitung dari rasio ketebalan lapisan arang terhadap waktu paparan panas sesuai Persamaan (2):

$$\beta_0 = \frac{x_{char}}{t} \quad (2)$$

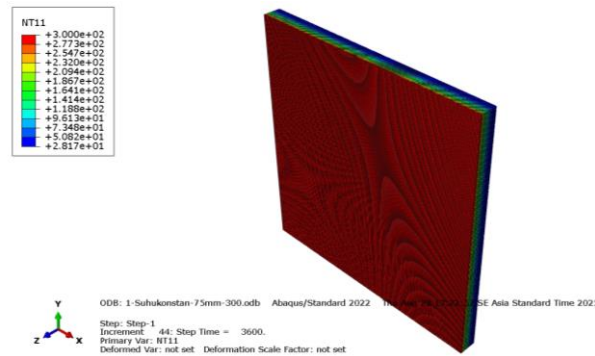
dengan x_{char} adalah ketebalan lapisan arang (mm), dan t adalah waktu paparan (menit).

Batas temperatur pembentukan arang ditetapkan sebesar 300°C, sesuai dengan ambang pirolisis cepat pada kayu (Bartlett et al., 2019). Ketebalan arang diperoleh dari kontur distribusi suhu hasil simulasi di Abaqus dengan menandai kedalaman area yang telah mencapai temperatur $\geq 300^\circ\text{C}$. Visualisasi distribusi temperatur pada beberapa interval waktu digunakan untuk memantau perkembangan lapisan arang selama simulasi.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

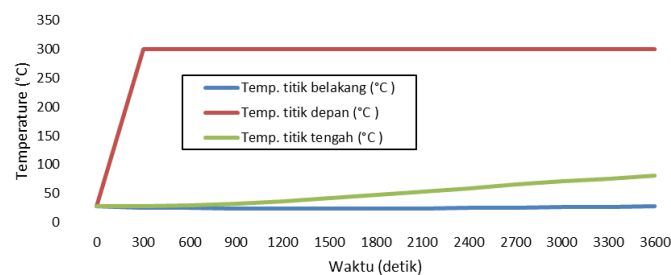
3.1 Respon Termal pada Suhu Konstan

Hasil simulasi numerik dengan kondisi suhu konstan memperlihatkan pola peningkatan temperatur yang berlangsung lambat dan bertahap dari permukaan depan menuju bagian dalam kayu. Permukaan yang terpapar panas langsung mencapai kondisi stabil dalam lima menit pertama, sementara bagian tengah dan belakang tetap berada pada temperatur jauh lebih rendah hingga akhir simulasi. Hal ini menunjukkan bahwa kayu akasia memiliki kemampuan isolasi termal yang tinggi akibat konduktivitas panasnya yang rendah. Kontur distribusi temperatur (Gambar 6) tampak jelas menunjukkan adanya gradien suhu yang cukup tajam antara permukaan dan inti kayu. Seiring bertambahnya waktu, panas semakin merambat ke dalam, meskipun laju peningkatan temperatur tetap lebih lambat pada bagian yang lebih jauh dari sumber panas.



Gambar 6. Plot kontur distribusi temperatur pada suhu konstan 300°C.

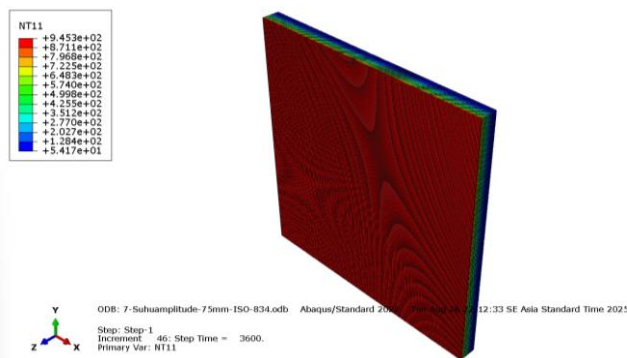
Titik pengamatan T1 (permukaan depan) mencapai suhu konstan sebesar 300°C pada menit ke-5 dan bertahan hingga menit ke-60. Sementara itu, titik pengamatan T2 (permukaan tengah bentang) mencapai 230°C pada menit ke-60, dan titik pengamatan T3 (permukaan belakang yang tidak terpapar api) hanya mencapai 55°C pada menit yang sama. Gambar 7 memperlihatkan grafik perubahan temperatur pada ketiga titik pengamatan tersebut. Grafik ini memperlihatkan bahwa temperatur pada titik terdekat dengan permukaan lebih cepat mencapai kondisi stabil, sedangkan titik yang lebih dalam mengalami keterlambatan respon termal. Fenomena ini konsisten dengan sifat alami kayu sebagai material berpori dengan konduktivitas termal rendah, sehingga panas tidak langsung merata melainkan bertahap merambat ke dalam. Hal ini menegaskan peran kayu sebagai insulator alami yang mampu menahan rambatan panas dari luar ke dalam secara signifikan.



Gambar 7. Hasil simulasi numerik grafik temperatur pada suhu konstan 300°C.

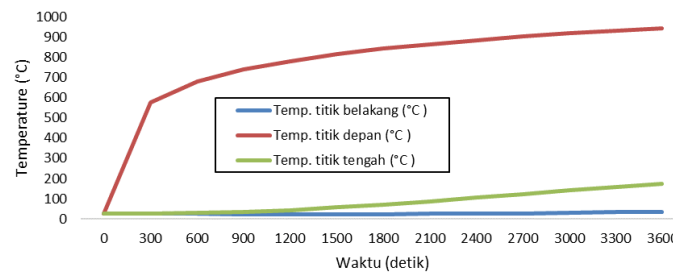
3.2 Respon Termal pada Paparan ISO 834

Simulasi dengan kurva suhu standar ISO 834 memperlihatkan karakteristik respon termal yang berbeda dibandingkan kondisi suhu konstan. Pada skenario ini, temperatur meningkat lebih cepat karena kurva ISO 834 merepresentasikan kondisi kebakaran standar dengan kenaikan suhu eksponensial terhadap waktu. Distribusi temperatur pada awal pemanasan ditunjukkan pada Gambar 8, yang memperlihatkan bahwa permukaan spesimen segera mengalami peningkatan temperatur tajam sesuai dengan kenaikan suhu pada kurva ISO.



Gambar 8. Plot kontur distribusi temperatur berdasarkan ISO 834.

Seiring berjalannya waktu, panas semakin menyebar ke bagian dalam kayu. Kontur suhu pada gambar tersebut menunjukkan bahwa meskipun terdapat gradien yang jelas antara permukaan dan bagian inti, daerah dengan temperatur tinggi mulai meluas. Setelah 3600 detik, distribusi temperatur (Gambar 8) memperlihatkan penyebaran panas yang jauh lebih merata dibandingkan kondisi suhu konstan, walaupun perbedaan suhu antara permukaan dan inti tetap ada. Pola ini menunjukkan bahwa kondisi ISO 834 mampu memberikan beban termal yang lebih berat terhadap spesimen kayu, sehingga mekanisme perpindahan panas berlangsung lebih intensif yang ditunjukkan pada Gambar 9.



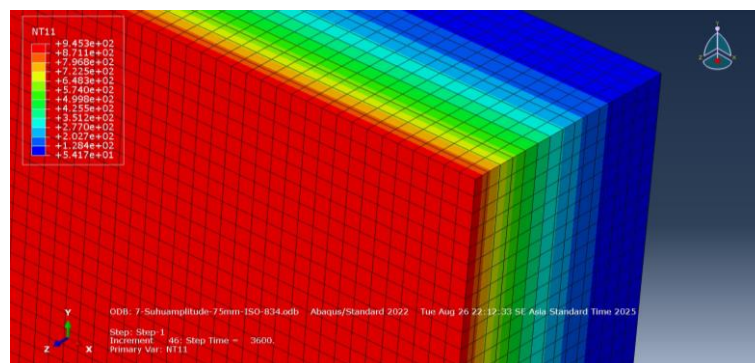
Gambar 9. Hasil simulasi numerik grafik temperatur pada ISO 834.

Grafik perbandingan temperatur pada titik-titik pengamatan memperkuat temuan ini. Titik terdekat dengan permukaan lebih cepat mencapai temperatur tinggi, sedangkan titik pada bagian dalam kayu mengalami penundaan. Hal ini menegaskan kembali bahwa kemampuan kayu dalam memperlambat rambatan panas masih bekerja, namun tekanan termal dari paparan ISO 834 lebih dominan sehingga distribusi suhu ke seluruh penampang lebih cepat tercapai dibandingkan kondisi suhu konstan.

3.3 Evaluasi Laju Pembentukan Arang (*Charring Rate*)

Berdasarkan kontur hasil simulasi, batas awal pembentukan arang ditentukan pada temperatur 300°C. Dari distribusi suhu setelah 60 menit, diperoleh ketebalan lapisan arang sekitar 35 mm dari sisi terpapar api. Berdasarkan persamaan (2), laju pembentukan arang dihitung sebesar 0,58 mm/menit. Nilai ini termasuk dalam kisaran yang umum ditemukan pada kayu tropis, yakni antara 0,5–0,7 mm/menit (Mikkola, 1991).

Hasil ini mengindikasikan bahwa pada kondisi paparan ISO 834, pembentukan arang berlangsung cepat akibat kenaikan suhu yang eksponensial terhadap waktu. Laju arang ini juga menunjukkan bahwa penampang efektif kayu mengalami penyusutan sekitar 47% setelah 60 menit paparan, sehingga penurunan kapasitas struktural harus diperhitungkan dalam desain ketahanan api (EN 1995-1-2: Eurocode 5: Design of Timber Structures - Part 1-2: General - Structural Fire Design, 2004). Visualisasi terbentuknya lapisan *char* pada kayu akasia disimulasikan secara numerik disajikan pada Gambar 10, yang memperlihatkan lapisan *char* (diindikasikan oleh suhu >300°C) mulai terbentuk pada area transisi antara warna hijau dan biru muda.



Gambar 10. Visualisasi terbentuknya *char* pada pemodelan.

Menurut Mikkola (1991), proses pembentukan *char* pada kayu diawali dengan tahap pirolisis, yaitu dekomposisi termal bahan organik akibat panas tanpa atau dengan sangat sedikit oksigen. Pirolisis ini terjadi dalam beberapa

tahap: (1) dehidrasi di bawah 200 °C, (2) awal pirolisis sampai sekitar 300 °C, dan (3) pirolisis cepat di atas 300 °C (Bartlett et al., 2019). Oleh karena itu didapatkan tebal *char* tersebut dari suhu yang telah mencapai 300 °C.

3.4 Verifikasi Hasil Simulasi

Untuk memperkuat hasil simulasi, dilakukan perbandingan antara distribusi *char* yang diperoleh dari pemodelan numerik dan hasil pengamatan eksperimental. Perbandingan ini bertujuan untuk melihat kesesuaian pola pembentukan *char* sehingga dapat menjadi dasar dalam menilai validitas pemodelan. Dalam pengujian, panel kayu akasia dimasukkan ke dalam tungku dan hanya satu sisi yang terpapar api.

Termokopel (TC) diletakkan pada permukaan yang tidak terpapar api yang dapat dilihat pada Gambar 11. Dengan adanya termokopel dapat diketahui hasil berupa data temperatur pada titik tersebut. Data pada tiap titik termokopel diambil rerata dan data tersebut digunakan untuk verifikasi. Hasil verifikasi menunjukkan bahwa selisih *error* antara hasil simulasi dan data eksperimen pada waktu uji 60 menit sebesar 1,9%. Nilai ini tergolong aman karena masih berada dalam rentang toleransi yang dilaporkan pada penelitian termal kayu yang berkisar <15% (Khelifa et al., 2024), sehingga model yang dikembangkan dapat dianggap valid untuk digunakan dalam analisis ini. Adapun hasil untuk temperatur terhadap waktu pada eksperimen dibandingkan dengan hasil pada simulasi sesuai dengan letak termokopel dalam waktu 60 menit disajikan dalam Tabel 2.



Gambar 11. Letak termokopel pada benda uji

Tabel 2. Perbandingan hasil temperatur pada simulasi numerik dan eksperimen dalam waktu 60 menit.

Waktu (menit)	Temperatur pada Eksperimen (°C)	Temperatur pada Simulasi Numerik (°C)	Error (%)
0	22,7	28,0	23,2
5	22,7	25,6	12,6
10	22,8	24,9	9,1
15	22,8	24,6	7,8
20	23,1	24,8	7,3
25	23,4	25,6	9,5
30	24,4	27,2	11,4
35	26,2	29,8	13,9
40	29,2	33,3	13,9
45	33,4	37,6	12,4
50	38,1	42,6	11,7
55	45,6	48,2	5,6
60	55,2	54,2	1,9

3.5 Implikasi Terhadap Pembentukan *Char*

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa pembentukan *char* dimulai dari permukaan kayu yang terpapar panas. Selanjutnya berkembang ke arah dalam seiring bertambahnya waktu pemanasan. Lapisan *char* ini berfungsi sebagai penghalang alami yang mampu memperlambat rambatan panas, sehingga meskipun permukaan telah mencapai suhu tinggi, bagian dalam kayu masih terlindungi dalam jangka waktu tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa ketahanan termal kayu sangat dipengaruhi oleh keberadaan dan ketebalan lapisan *char* yang terbentuk. Adapun untuk lapisan *char* yang terbentuk ditunjukkan pada Gambar 12 dimana benda uji baru keluar sesaat setelah diberi suhu tinggi.



Gambar 12. Benda uji sesaat setelah keluar dari tungku pembakaran

Fenomena tersebut konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menekankan bahwa perkembangan lapisan *char* menjadi faktor penting dalam menahan propagasi panas pada kayu (Wen et al., 2015). Pada kondisi suhu konstan, laju pembentukan *char* berlangsung lebih lambat dan terukur, sedangkan pada paparan ISO 834 prosesnya terjadi lebih cepat dengan intensitas yang lebih tinggi. Dengan demikian, hasil simulasi menunjukkan bahwa standar ISO 834 merepresentasikan kondisi kebakaran yang lebih ekstrem, sekaligus menegaskan peran fundamental lapisan *char* dalam mekanisme ketahanan api kayu akasia.

4 KESIMPULAN

Simulasi numerik berhasil menggambarkan perilaku termal kayu akasia pada dua kondisi, yaitu suhu konstan 300°C dan paparan kebakaran standar ISO 834. Pada suhu konstan, peningkatan temperatur terjadi secara bertahap tanpa pembentukan arang signifikan, sedangkan pada paparan ISO 834, lapisan arang terbentuk cepat di permukaan dan berkembang hingga kedalaman 35 mm dalam waktu 60 menit. Laju pembentukan arang yang dihasilkan sebesar 0,58 mm/menit, masih berada dalam kisaran umum kayu tropis.

Perbandingan hasil simulasi dengan data eksperimen menunjukkan selisih rata-rata 1,9%, sehingga model numerik dapat dinyatakan valid. Temuan ini membuktikan bahwa papan kayu akasia memiliki ketahanan termal yang baik terhadap paparan api, dan nilai *charring rate* yang diperoleh dapat dijadikan acuan untuk analisis kehilangan penampang efektif serta perancangan ketahanan api elemen kayu sesuai pedoman ISO 834 dan Eurocode 5.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Muhammad Nur Fajri Alfata dari Balai Teknik Sains Bangunan, Direktorat Bina Teknik Bangunan Gedung dan Penyehatan Lingkungan, atas bantuan dan dukungannya dalam pelaksanaan pengujian yang menjadi bagian penting dalam penelitian ini. Kontribusi yang telah diberikan sangat berarti bagi terselesaikannya penelitian ini.

REFERENSI

Bartlett, A. I., Hadden, R. M., & Bisby, L. A. (2019). A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction. In *Fire Technology* (Vol. 55, Issue 1). Springer New York LLC. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0787-y>

BS EN 1363-1. (2012).

- EN 1995-1-2: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design. (2004).
- Eremina, T., & Korolchenko, D. (2023). Fire resistance limit for wood constructions in high-rise buildings. *E3S Web of Conferences*, 389. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338906005>
- Gérard, Jean., Guibal, Daniel., Paradis, S., & Cerre, J.-Claude. (2017). *Tropical Timber Atlas: Technological characteristics and uses*.
- ISO. (1999). *ISO 834-1:1999: Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 1: General requirements*. 1999.
- Khelifa, M., Thi, V. D., Oudjène, M., Khennane, A., El Ganaoui, M., & Rogaume, Y. (2024). Modelling the Response of Timber Beams Under Fire. *International Journal of Civil Engineering*, 22(9), 1537–1549. <https://doi.org/10.1007/s40999-024-00973-2>
- Klippel, M., Leyder, C., Frangi, A., Fontana, M., Lam, F., & Ceccotti, A. (2014). Fire tests on loaded Cross-laminated timber wall and floor elements. *Fire Safety Science*, 11, 626–639. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.11-626>
- Kretschmann, D. E., & Hernandez, R. (2006). Grading timber and glued structural members. *Primary Wood Processing: Principles and Practice*, 9781402043, 339–390. https://doi.org/10.1007/1-4020-4393-7_10
- Longui, E. L., Lima, I. L. de, Ranzini, M., Barbosa, J. de A., Yamaji, F. M., Eufrade Junior, H. de J., Silva Júnior, F. G. da, & Assumpção, P. A. de. (2024). Wood chemical characterization of Acacia mangium and Calophyllum brasiliense grown in plantation. *Research, Society and Development*, 13(12), e147131246685. <https://doi.org/10.33448/rsd-v13i12.46685>
- Maake, T., Asante, J., & Mwakikunga, B. (2020). Fire performance properties of commonly used South African hardwood. *Journal of Fire Sciences*, 38(5), 415–432. <https://doi.org/10.1177/0734904120930342>
- Mikkola, E. (1991a). Charring Of Wood Based Materials. *Fire Safety Science*, 3, 547–556. <https://doi.org/10.3801/iafss.fss.3-547>
- Mikkola, E. (1991b). Charring Of Wood Based Materials. *Fire Safety Science*, 3, 547–556. <https://doi.org/10.3801/iafss.fss.3-547>
- Östman, B. A. L. (2017). Fire performance of wood products and timber structures. *International Wood Products Journal*, 8(2), 74–79. <https://doi.org/10.1080/20426445.2017.1320851>
- Radmanović, K., Dukić, I., & Pervan, S. (2014). Specific Heat Capacity of Wood. *Drvna Industrija*, 65(2), 151–157. <https://doi.org/10.5552/drind.2014.1333>
- Sulistyo, J., Marsoem, N., Listyanto, T., Andhini, Y., Pertiwi, B., Kehutanan, J. I., & Masuk, N. (2020). Sifat Ketahanan Api dan Degradasi Panas Tiga Jenis Kayu Dilapisi Arang Kayu Sengon Fire Retardancy Properties and Thermal Degradation of Three Timber Species Overlayed by Sengon Wood Charcoal HASIL PENELITIAN Riwayat Naskah. In *Jurnal Ilmu Kehutanan* (Vol. 14).
- Wen, L., Han, L., & Zhou, H. (2015). Factors Influencing the Charring Rate of Chinese Wood by using the Cone Calorimeter. *BioResources*, 10(4), 7263–7272. <https://doi.org/10.15376/biores.10.4.7263-7272>