

ANALISIS PENJALARAN SUHU TINGGI PADA PENAMPANG BALOK BETON BERTULANG

Reni Suryanita¹, Florisa² dan Zulfikar Djauhari³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Sipil, Universitas Riau, Kampus Bina Widya Km 12,5 Simpang Baru, Pekanbaru
Email:reni.suryanita@eng.unri.ac.id

ABSTRAK

Peristiwa kebakaran merupakan peristiwa yang dapat mempengaruhi kestabilan elemen struktur, salah satunya adalah elemen balok beton bertulang. Suhu tinggi akibat kebakaran dari luar balok mempengaruhi kekuatan elemen struktur. Suatu elemen harus dapat mempertahankan kekuatannya selama terpapar suhu tinggi. Oleh karena itu, analisis mengenai distribusi temperatur akibat suhu tinggi pada penampang elemen balok beton bertulang merupakan suatu hal yang penting untuk diidentifikasi. Distribusi temperatur berkaitan dengan transfer panas pada elemen balok beton bertulang akibat perbedaan temperatur pada penampang balok, yang dipengaruhi oleh sifat thermal material balok. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi distribusi temperatur pada penampang balok bertulang akibat suhu tinggi pada durasi tertentu. Model yang digunakan adalah elemen balok beton bertulang dengan mutu beton 35 MPa dan mutu tulangan 400 MPa. Analisis distribusi temperatur menggunakan metode Wickström dan analisis program elemen hingga LUSAS v.16. Berdasarkan hasil analisis kedua metode tersebut, dapat disimpulkan bahwa semakin lama durasi pemanasan pada balok, maka bagian dalam penampang balok akan semakin mengalami kenaikan temperatur. Sedangkan perbandingan antara kedua metode tersebut didapatkan bahwa nilai suhu pada titik tengah penampang pada metode LUSAS lebih besar 245,237°C daripada hasil perhitungan metode Wickström, sedangkan penjaralan panas pada metode Wickström kurang lebih 3 jam lebih lambat daripada penjaralan panas analisis LUSAS.

Kata kunci : balok beton bertulang, pemanasan, suhu tinggi, LUSAS, Wickström.

1. PENDAHULUAN

Semenjak manusia mengenal teknik dan rekayasa konstruksi, struktur bangunan tidak luput dari resiko kecelakaan ataupun bencana, salah satunya adalah peristiwa kebakaran. Peristiwa kebakaran tersebut dapat mempengaruhi kestabilan elemen-elemen struktur gedung, salah satunya adalah elemen balok beton bertulang.

Beton bertulang memiliki daya tahan api yang baik, karena beton memiliki daya hantar panas yang rendah sehingga dapat menghalangi rambatan panas masuk kebagian dalam struktur. Walaupun daya tahan beton terhadap api relatif baik, namun saat terbakar beton akan menyerap panas sehingga terjadi peningkatan suhu yang tinggi. Suhu yang tinggi inilah yang menyebabkan kerusakan pada beton bertulang, sehingga menimbulkan penurunan kekuatan pada komponen struktur tersebut. Temperatur yang tinggi saat kebakaran akan memberikan pengaruh yang besar pada kekuatan elemen struktur. Selain itu, pengaruh siklus pemanasan dan pendinginan akan mengakibatkan proses perubahan fase fisis dan kimiawi secara kompleks pada struktur bangunan beton. Peristiwa ini mengakibatkan elemen beton menjadi getas dan mempengaruhi kualitas/kekuatan struktur beton secara keseluruhan (Wahyuni dan Anggraini, 2010).

Penurunan kekuatan pada beton tidak hanya dipengaruhi oleh suhu tinggi akibat kebakaran, tapi juga dipengaruhi oleh durasi waktu kebakaran. Meningkatnya durasi kebakaran mempengaruhi distribusi temperatur dari permukaan balok ke bagian dalam balok. Dampak yang ditimbulkan pada suatu balok beton bertulang yang terbakar berbeda-beda setiap durasi waktu. Zandi dan Branch (2012) melakukan analisis pada balok bertulang 2D yang terbakar suhu tinggi menggunakan beberapa metode sehingga didapatkan distribusi temperatur pada penampang balok bertulang pada setiap metode akibat suhu tinggi.

Penelitian mengenai pengaruh temperatur tinggi pada beton masih menjadi hal yang menarik untuk diteliti. Pengaruh temperatur tinggi pada suatu elemen struktur dapat diperkirakan dengan melakukan analisis numerik menggunakan beberapa metode pada literatur teknis yang ada berdasarkan elemen struktur yang akan ditinjau. Analisis mengenai distribusi temperatur akibat suhu tinggi pada penampang elemen balok beton bertulang merupakan suatu hal yang penting untuk diidentifikasi. Distribusi temperatur berkaitan dengan transfer panas pada elemen balok beton bertulang akibat perbedaan temperatur pada penampang balok, yang dipengaruhi oleh sifat thermal material balok.

Pada penelitian ini, akan dilakukan analisis distribusi temperatur pada penampang balok akibat suhu tinggi dan durasi waktu tertentu menggunakan dua metode, yaitu metode Wickström dan analisis program elemen hingga LUSAS v.16. Analisis permodelan balok beton bertulang dengan beton mutu normal 35 MPa dan mutu tulangan 400 MPa yang divariasikan terhadap suhu pemanasan elemen, yaitu suhu 200°C, 400°C, 700°C, dan 1000°C. Adapun variasi durasi waktu pembakaran dimulai dari waktu 30 menit, 1 jam, 1,5 jam, 2 jam, 3 jam, dan 4 jam. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi distribusi temperatur pada penampang balok bertulang akibat suhu tinggi pada durasi tertentu. Adapun manfaat penelitian ini adalah hasil analisis perilaku balok beton bertulang akibat suhu tinggi dengan variasi suhu bakar dapat berkontribusi bagi perencana sebagai rujukan dalam mendesain suatu elemen struktur tahan api, dan dapat dijadikan sebagai acuan dalam menentukan material yang baik dalam menahan suhu tinggi atau material tambahan yang mampu menahan suhu tinggi. Lalu, dapat bermanfaat sebagai bahan tambahan informasi dalam penyusunan penelitian selanjutnya atau penelitian-penelitian sejenis.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Thermal Conductivity dan Specific Heat pada Beton

Sifat thermal beton ditemukan sangat bervariasi dengan jenis dan jumlah agregat dalam beton. Konduktivitas thermal merupakan fenomena transport dimana perbedaan temperatur mengakibatkan adanya transfer energi thermal dari satu benda panas ke daerah yang sama pada suhu yang lebih rendah. Konduktivitas thermal juga menyatakan kemampuan dari suatu bahan untuk mengantarkan kalor (Intansari, 2012).

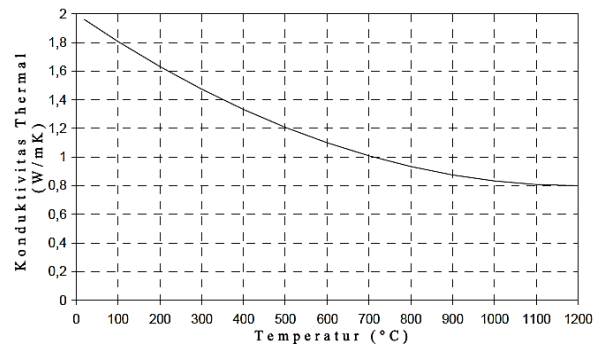
Nilai konduktivitas thermal pada beton silika merupakan fungsi dari temperatur yang dinyatakan oleh persamaan berikut dengan grafik hubungan nilai konduktivitas thermal dan suhu pada Gambar 1.

$$\lambda_c = 2 - 0,24 \frac{T}{120} + 0,012 \left(\frac{T}{120} \right)^2 \quad (1)$$

Dimana:

λ_c = konduktivitas thermal (W/mK)

T = temperatur (°C)



Gambar 1. Grafik Hubungan *Thermal Conductivity* terhadap Suhu pada Beton (EN 1992-1-2, 2004)

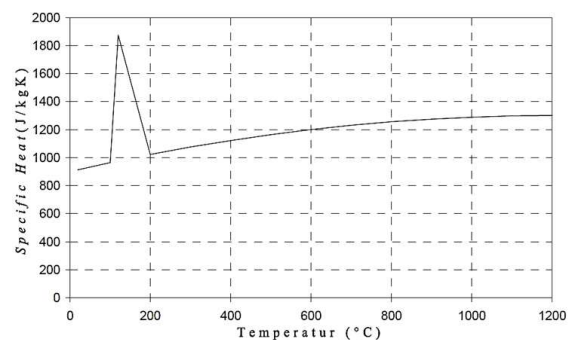
Nilai *specific heat* merupakan karakteristik yang menggambarkan jumlah input panas yang dibutuhkan untuk menaikkan satu satuan massa material satu satuan temperatur dan dinyatakan pada persamaan (2). Berdasarkan Eurocode, persamaan tersebut valid untuk beton silika dan beton kapur (EN 1992-1-2, 2004).

$$c_c = 900 + 80 \frac{T}{120} - 4 \left(\frac{T}{120} \right)^2 \quad (2)$$

Dimana:

c_c = *specific heat* (J/kgK)

T = temperatur (°C)



Gambar 2. Grafik Hubungan *Specific Heat* terhadap Suhu pada Beton (EN 1992-1-2, 2004)

Thermal Conductivity dan Specific Heat pada Baja

Nilai *thermal conductivity* pada tulangan baja dapat dihitung dengan rumus berikut, dengan grafik hubungan *thermal conductivity* dan temperatur dapat dilihat pada Gambar 3.

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} T$$

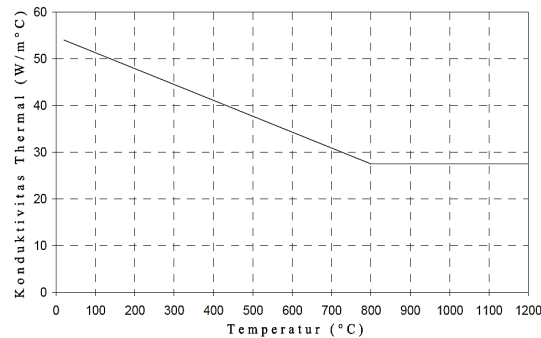
untuk $20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C}$ (3)

$$\lambda_a = 27,3 \text{ untuk } 800^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C} \quad (4)$$

Dimana:

λ_a = Thermal conductivity (W/mK)

T = Suhu pada baja ($^\circ\text{C}$)



Gambar 3. Grafik Hubungan *Thermal Conductivity* terhadap Suhu pada Baja (EN 1993-1-2,2005)

Nilai *specific heat* pada tulangan baja dapat dihitung dengan rumus berikut, dengan grafik hubungan *thermal conductivity* dan temperatur dapat dilihat pada Gambar 4.

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} T - 1,69 \times 10^{-3} T^2 + 222 \times 10^{-6} T^3$$

untuk $20^\circ\text{C} \leq T \leq 600^\circ\text{C}$ (5)

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - T}$$

untuk $600^\circ\text{C} \leq T \leq 735^\circ\text{C}$ (6)

$$c_a = 545 + \frac{17820}{T - 731}$$

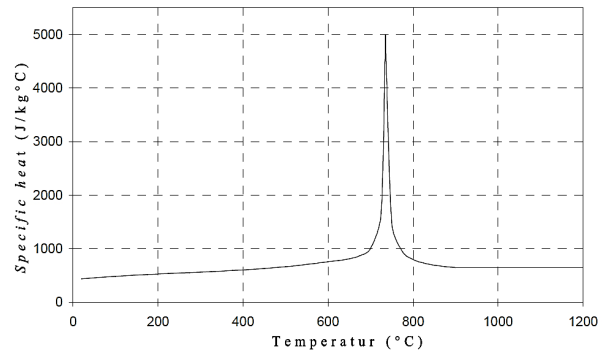
untuk $735^\circ\text{C} \leq T \leq 900^\circ\text{C}$ (7)

$$c_a = 650 \text{ untuk } 900^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C} \quad (8)$$

Dimana:

c_a = *specific heat* pada baja (J/kgK)

T = Suhu pada baja ($^\circ\text{C}$)

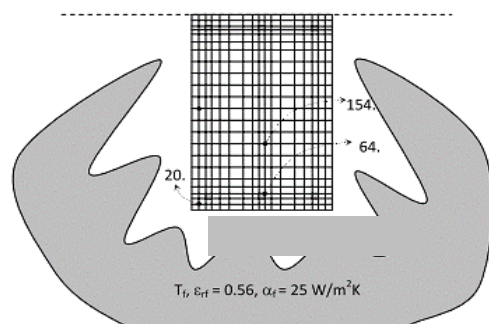


Gambar 4. Grafik Hubungan *Specific Heat* terhadap Suhu pada Baja (EN 1993-1-2,2005)

Distribusi Temperatur Penampang Balok Bertulang pada Suhu Tinggi

Metode Wickström adalah metode perhitungan sederhana yang dikemukakan oleh Ulf Wickström pada tahun 1987. Metode ini dapat digunakan untuk menghitung suhu pada penampang bentang tengah balok beton bertulang yang terpapar suhu

tinggi pada tiga sisi balok. Perlu diketahui bahwa metode ini tidak memperhitungkan kemungkinan hancurnya beton. Metode ini telah dipublikasikan pada ASTM (2000).



Gambar 5. Ilustrasi Penampang Balok Beton Bertulang yang Terpapar Api pada Tiga Sisi (Zandi dan Branch, 2012)

Untuk balok beton bertulang dengan beton normal dan terpapar suhu tinggi, Wickström memprediksi temperatur $T(x,y)$ pada suatu titik di penampang balok (x,y) pada kondisi terbakar suhu θ_f dengan waktu terpapar api t dengan persamaan sebagai berikut.

$$T(x,y) = [n_w(n_x + n_y - 2n_x n_y) + n_x n_y] \theta_f \quad (9)$$

Dimana θ_f adalah suhu tinggi ($^\circ\text{C}$) dan n_w adalah rasio antara temperatur bakar pada permukaan balok dengan suhu atmosfer, dimana nilainya dipengaruhi oleh durasi paparan api dengan persamaan sebagai berikut.

$$n_w = 1 - 0,0616 t^{-0,88} \quad (10)$$

Pada persamaan 10, t (dalam jam) adalah waktu durasi terpaparnya api; n_x (atau n_y) adalah fungsi dari waktu terpaparnya api dan rasio antara *thermal diffusivity* balok beton bertulang (α) dan nilai referensi α_c yaitu $417 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Adapun persamaan n_x adalah sebagai berikut.

$$n_x = 0,18 \ln u_x - 0,81 \quad (11)$$

$$u_x = \frac{\alpha}{\alpha_c} \times \frac{t}{x^2} \quad (12)$$

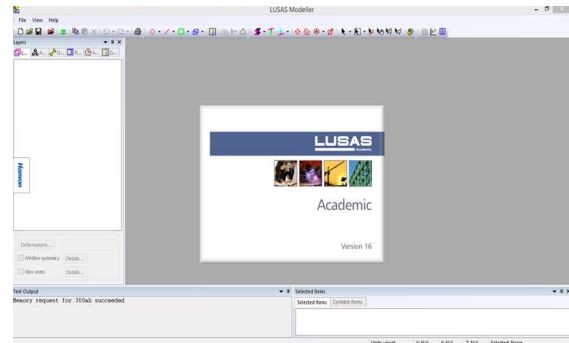
Dimana x (dalam m) adalah jarak antara titik yang ditinjau dengan sisi yang terpapar oleh api pada arah lebar balok. Adapun α adalah *thermal diffusivity* berdasarkan EN 1992-1-2 memberikan persamaan *thermal diffusivity* yaitu sebagai berikut.

$$\alpha = \frac{\lambda_c}{\rho_c \times c_c} \quad (13)$$

Dimana λ_c adalah nilai *thermal conductivity* pada suhu tertentu, c_c adalah nilai *specific heat* pada suhu tertentu, dan ρ_c adalah berat jenis beton yaitu 2400 kg/m^3 . Rumus yang sama juga dapat digunakan untuk menghitung nilai n_y dengan menggantikan nilai x dengan nilai y yang merupakan jarak antara titik yang ditinjau dan sisi balok yang terpapar api pada arah tinggi balok.

Program Elemen Hingga LUSAS v.16

LUSAS v.16 adalah salah satu program elemen hingga. Permodelan disajikan dalam bentuk grafis yang terdiri dari berbagai macam geometri seperti titik, garis, bidang, volume dan definisi atribut yang berupa material, beban, tumpuan dan mesh. Program elemen hingga LUSAS v.16 menyediakan 100 jenis elemen yang dikelompokkan sesuai dengan fungsinya yaitu: *Bars*, *Beams*, *2D Continuum elements*, *3D Continuum elements*, *Plates*, *Shell*, *Membranes*, *Joints*, *Field Elements* dan *Interface Elements*.



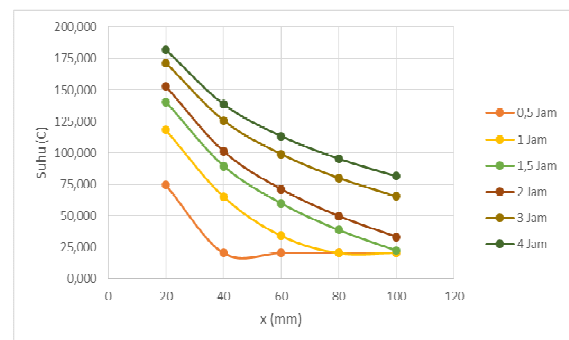
Gambar 6. Tampilan Pembuka LUSAS v.16

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

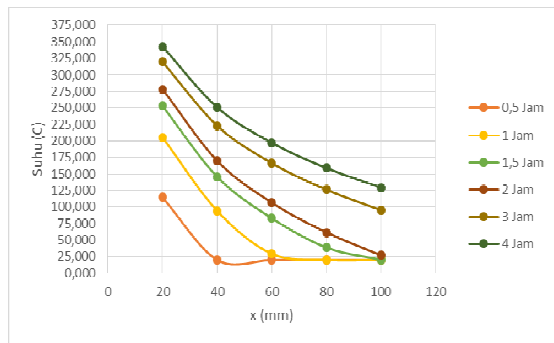
Setelah dilakukan perhitungan secara manual menggunakan metode Wickström dan analisis menggunakan program elemen hingga LUSAS v.16 dengan variasi suhu pemanasan 200°C , 400°C , 700°C , dan 1000°C dan variasi durasi pemanasan tiap suhu adalah 30 menit, 1 jam, 1,5 jam, 2 jam, 3 jam, dan 4 jam, didapatkan hasil analisis seperti berikut.

Hasil Perhitungan Manual menggunakan Metode Wickström

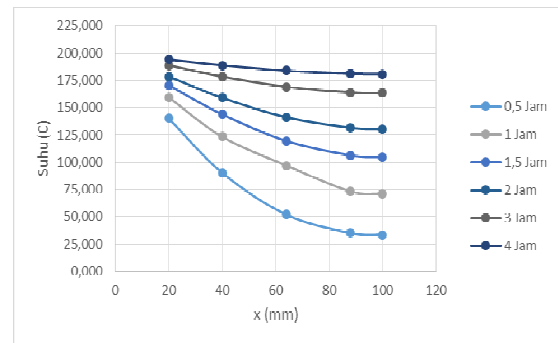
Untuk distribusi temperatur pada penampang balok dengan perhitungan menggunakan metode Wickström, akan ditinjau beberapa titik pada kedalaman dari sisi permukaan balok yang terpapar api, yaitu pada kedalaman $x=20 \text{ mm}$, 40 mm , 60 mm , 80 mm , dan 100 mm dengan posisi $y=200 \text{ mm}$.



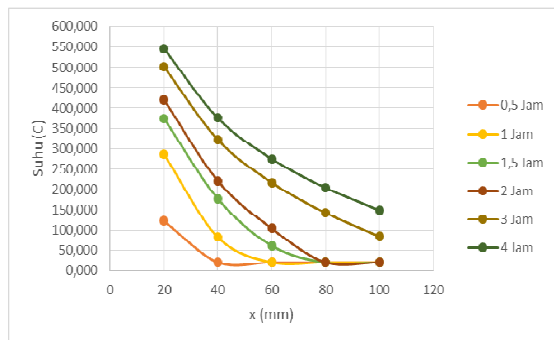
Gambar 7. Kurva Distribusi Temperatur Penampang Balok pada Suhu 200°C



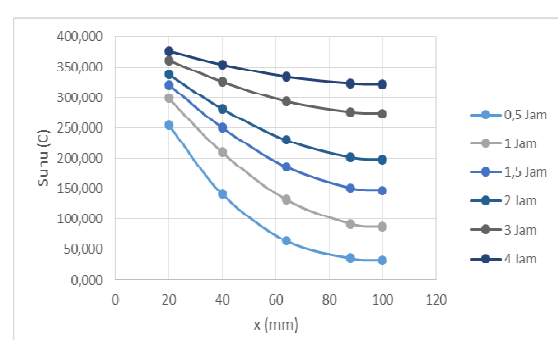
Gambar 8. Kurva Distribusi Temperatur Penampang Balok pada Suhu 400°C



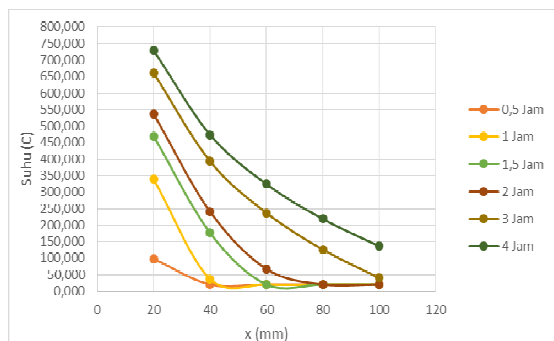
Gambar 11. Kurva Distribusi Temperatur Penampang Balok pada Suhu 200°C



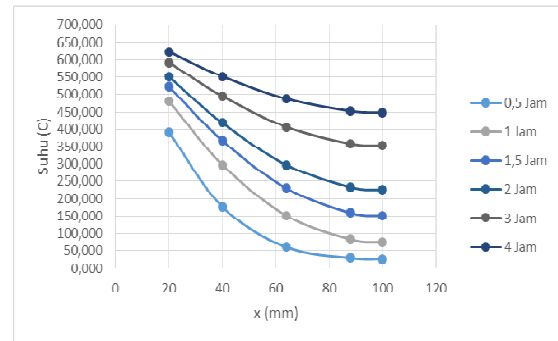
Gambar 9. Kurva Distribusi Temperatur Penampang Balok pada Suhu 700°C



Gambar 12. Kurva Distribusi Temperatur Penampang Balok pada Suhu 400°C



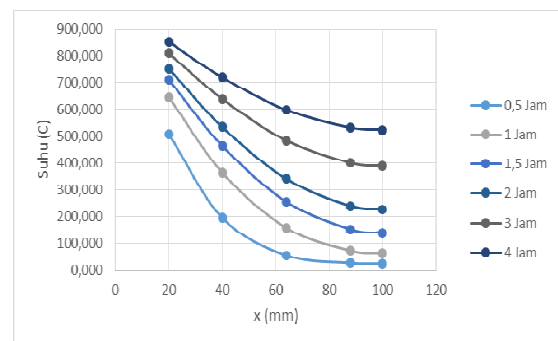
Gambar 10. Kurva Distribusi Temperatur Penampang Balok pada Suhu 1000°C



Gambar 13. Kurva Distribusi Temperatur Penampang Balok pada Suhu 700°C

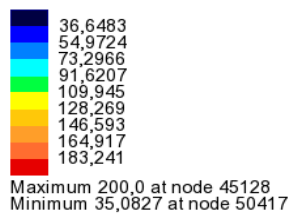
Hasil Analisis menggunakan Program Elemen Hingga LUSAS v.16

Untuk distribusi temperatur pada penampang balok dengan analisis menggunakan program elemen hingga LUSAS v.16, akan ditinjau beberapa titik pada kedalaman dari sisi permukaan balok yang terpapar api, yaitu pada kedalaman $x=20$ mm, 40 mm, 64 mm, 88 mm, dan 100 mm dengan posisi $y=200$ mm.

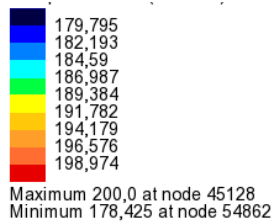


Gambar 14. Kurva Distribusi Temperatur Penampang Balok pada Suhu 1000°C

Hasil output analisis dari program elemen hingga LUSAS v.16 berupa pola kontur distribusi temperatur pada penampang balok pada setiap variasi suhu tinggi dengan durasi pemanasan 30 menit dan 4 jam adalah sebagai berikut.

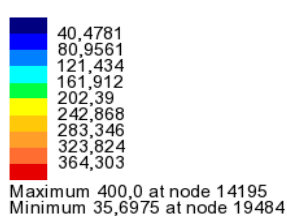


(a)

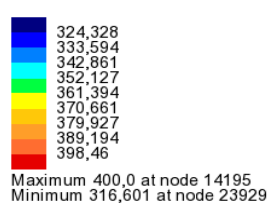


(b)

Gambar 15. Distribusi Temperatur pada Penampang Tengah Balok dengan Suhu 200°C
(a) selama 30 menit, (b) selama 4 jam

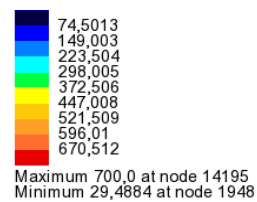


(a)

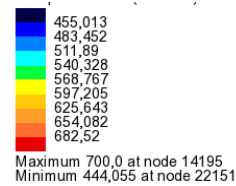


(b)

Gambar 16. Distribusi Temperatur pada Penampang Tengah Balok dengan Suhu 400°C
(a) selama 30 menit, (b) selama 4 jam

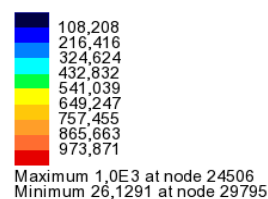


(a)

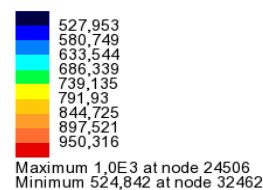


(b)

Gambar 17. Distribusi Temperatur pada Penampang Tengah Balok dengan Suhu 700°C
(a) selama 30 menit, (b) selama 4 jam



(a)



(b)

Gambar 18. Distribusi Temperatur pada Penampang Tengah Balok dengan Suhu 1000°C
(a) selama 30 menit, (b) selama 4 jam

Berdasarkan hasil distribusi temperatur menggunakan perhitungan manual metode Wickström dan analisis menggunakan program

elemen hingga *LUSAS v.16*, dapat disimpulkan bahwa semakin lama durasi pemanasan yang terjadi pada balok, maka panas api akan semakin menjalar dari sisi permukaan yang terpapar suhu tinggi hingga ke bagian dalam penampang balok. Semakin lama durasi pemanasan, maka bagian dalam penampang balok akan semakin mengalami kenaikan temperatur. Pada kurva distribusi temperatur menggunakan metode Wickström, dapat dilihat pada durasi 0,5 jam hingga 2 jam, beberapa titik pada kedalaman tertentu pada seluruh variasi suhu pemanasan masih belum terpengaruh oleh suhu tinggi dari luar balok karena temperatur pada beberapa titik tersebut masih pada suhu normal 20°C. Sedangkan pada kurva distribusi temperatur menggunakan analisis *LUSAS*, mulai dari durasi 0,5 jam hingga 4 jam, seluruh bagian penampang balok telah terpengaruh oleh suhu tinggi dari luar balok, dengan suhu pada bagian dalam penampang

telah mengalami peningkatan dengan temperatur lebih dari suhu normal 20°C.

Perbandingan Hasil Perhitungan Manual Metode Wickström dan Hasil Analisis Program Elemen Hingga *LUSAS v.16*

Setelah melakukan perhitungan manual menggunakan metode Wickström dan melakukan analisis menggunakan program *LUSAS v.16*, selanjutnya adalah membandingkan hasil distribusi temperatur perhitungan manual metode Wickström dan analisis program *LUSAS v.16*. Hasil yang akan dibandingkan berupa nilai temperatur pada titik tengah penampang balok antara kedua metode, sehingga akan dibandingkan penjaran panas antara kedua metode. Contoh yang diambil adalah pada durasi pemanasan 4 jam dengan variasi suhu pemanasan.

Tabel 1. Nilai Temperatur pada Titik Tengah Penampang Balok pada Kedalaman $x=100$ mm dengan Durasi Pemanasan 4 Jam

Suhu pemanasan (°C)	Suhu pada Titik Tengah Penampang	
	Metode Wickström	Analisis <i>LUSAS v.16</i>
200	81,324	180,764
400	129,424	321,864
700	148,328	448,508
1000	136,330	525,217

Berdasarkan Tabel 1. diatas, dapat dilihat bahwa nilai temperatur yang diberikan oleh analisis *LUSAS* lebih besar daripada hasil perhitungan metode Wickström, dengan perbedaan hasil antara kedua metode tersebut pada suhu 200°C adalah 99,44°C, pada suhu 400°C perbedaan hasil kedua metode adalah sebesar 192,44°C, pada suhu 700°C perbedaan hasil kedua metode adalah sebesar 300,180°C, dan pada suhu 1000°C perbedaan hasil kedua metode adalah sebesar 388,887°C. Sehingga didapatkan rata-rata perbedaan hasil suhu pada titik tengah penampang balok antara metode Wickström

dan analisis *LUSAS* dengan waktu pemanasan selama 4 jam adalah sebesar 245,237°C. Nilai suhu pada titik tengah penampang pada metode *LUSAS* lebih besar 245,237°C daripada hasil yang diberikan perhitungan metode Wickström menandakan bahwa penjaran panas pada perhitungan metode Wickström lebih lambat daripada penjaran panas hasil analisis *LUSAS*. Adapun hasil nilai suhu pada titik tengah penampang pada kedalaman $x=100$ mm pada setiap suhu dengan variasi durasi pemanasan dapat dilihat pada Tabel berikut.

Tabel 2. Rangkuman Nilai Temperatur pada Titik Tengah Penampang Balok pada Kedalaman $x=100$ mm

Suhu pemanasan (°C)	Durasi pemanasan (jam)	Suhu pada Titik Tengah Penampang		Suhu pemanasan (°C)	Durasi pemanasan (jam)	Suhu pada Titik Tengah Penampang	
		Metode Wickström	Analisis <i>LUSAS v.16</i>			Metode Wickström	Analisis <i>LUSAS v.16</i>
200	0,5	20,000	33,132	700	0,5	20,000	26,685
	1	20,000	70,965		1	20,000	75,898
	1,5	22,021	104,574		1,5	20,000	150,401
	2	32,988	130,311		2	20,000	225,079
	3	65,209	163,332		3	83,793	352,443
	4	81,324	180,764		4	148,328	448,508

Suhu pemanasan (°C)	Durasi pemanasan (jam)	Suhu pada Titik Tengah Penampang		Suhu pemanasan (°C)	Durasi pemanasan (jam)	Suhu pada Titik Tengah Penampang	
		Metode Wickström	Analisis LUSAS v.16			Metode Wickström	Analisis LUSAS v.16
400	0,5	20,000	32,679	1000	0,5	20,000	23,859
	1	20,000	87,256		1	20,000	63,249
	1,5	20,000	146,979		1,5	20,000	139,853
	2	26,755	198,276		2	20,000	226,864
	3	95,132	273,924		3	40,016	390,249
	4	129,424	321,864		4	136,330	525,217

Berdasarkan keseluruhan hasil analisis pada Tabel 2, nilai temperatur pada titik tengah penampang balok pada metode Wickström pada durasi 4 jam merupakan nilai temperatur pada titik tengah penampang balok pada analisis LUSAS pada durasi antara 1 hingga 1,5 jam. Hal tersebut menandakan bahwa penjalaran panas pada metode Wickström kurang lebih 3 jam lebih lambat daripada penjalaran panas analisis LUSAS.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Semakin lama durasi pemanasan yang terjadi pada balok, maka panas api akan semakin menjalar dari sisi permukaan yang terpapar suhu tinggi hingga ke bagian dalam penampang balok. Semakin lama durasi pemanasan, maka bagian dalam penampang balok akan semakin mengalami kenaikan temperatur.
2. Nilai suhu pada titik tengah penampang pada metode LUSAS lebih besar 245,237°C daripada hasil yang diberikan oleh perhitungan metode Wickström.
3. Penjalaran panas pada metode Wickström kurang lebih 3 jam lebih lambat daripada penjalaran panas analisis LUSAS.

Beberapa saran untuk melengkapi penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penggunaan LUSAS v.16 sebagai alat bantu khususnya untuk analisa thermal untuk menghitung distribusi temperatur pada penampang elemen balok beton bertulang hendaknya dapat digunakan secara cermat. Data yang diinput pada LUSAS harus dipelajari lebih matang agar dapat memberikan hasil yang lebih akurat.
2. Untuk perhitungan manual yang telah dilakukan berdasarkan standar yang berlaku sebaiknya dilakukan studi lainnya agar dapat dijadikan sebagai pembandingan dengan perhitungan manual yang telah dilakukan.

3. Analisis dapat dilakukan dengan menggunakan material beton lain atau dengan menggunakan material tambahan lainnya, agar dapat mengetahui pengaruh suhu tinggi terhadap distribusi temperatur penampang balok pada variasi lainnya.

5. DAFTAR PUSTAKA

- ASTM E 119. (2000). Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. *American Society for Testing and Materials*, 552(1), 21. <https://doi.org/10.1520/E0119-14>
- European Committee for Standardization. (2005). EN 1993-1-2: Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design. *British Standards Institution*, 2(2005). <https://doi.org/10.1201/9781420034882.ch13>
- European Union, T. (2004). Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design. *Design of Concrete Structures - Part 1-2: General Rules-Structural Fire Design*, 2(2004), 1–99. Retrieved from [papers2://publication/uuid/1B0960C1-28E7-4B6A-ADFE-19C0455EDFD3](https://publication/uuid/1B0960C1-28E7-4B6A-ADFE-19C0455EDFD3)
- Intansari, Wi. R. O. (2012). Pemanfaatan Program Bantu Analisa Struktur LUSAS untuk Mengevaluasi Ketahanan Api Elemen Struktur Beton Bertulang pada Contoh Kasus ACI 216R-89, 1–26.
- Wahyuni, E., dan Anggraini, R. (2010). Pengaruh Perbedaan Proses Pendinginan Terhadap Perubahan Fisik dan Kuat Tekan Beton Pasca Bakar. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 4(1), 1–9.
- Zandi, Y., and Branch, T. (2012). Determining the Temperature Distributions of Fire Exposed Reinforced Concrete Cross-Sections with Different Methods, 4(8), 782–788.