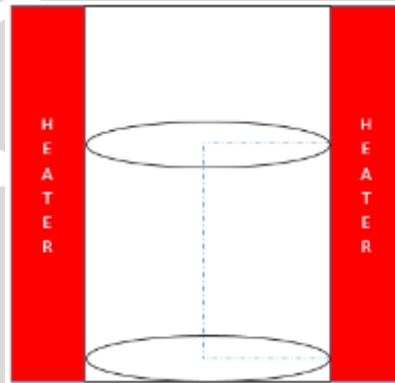


BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Asumsi Dalam Bentuk 2D

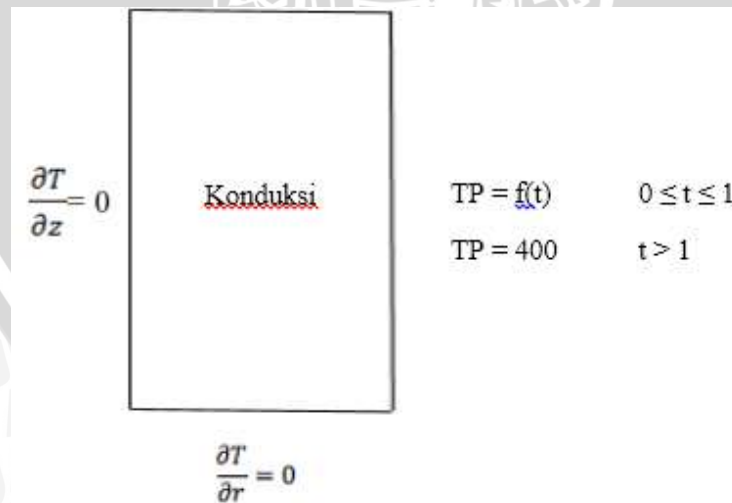
Masalah yang akan dikaji dan diselesaikan dalam pembahasan penelitian ini adalah berupa setengah dari proses perpindahan panas yang terjadi pada silinder seperti pada gambar 4.1



Gambar 4.1 Asumsi 2D

Tabung ini diberi keadaan isolasi dari *glass wool* dan konduksi dari serbuk kayu yang terjadi di dalam *furnace*. Seperti pada gambar berikut

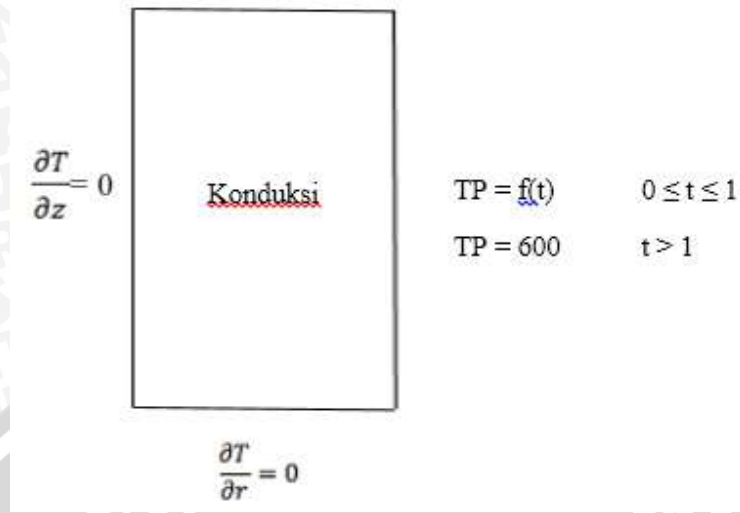
$$\text{Konveksi} = \frac{h}{k} (T_{\infty} - T)$$



(a)

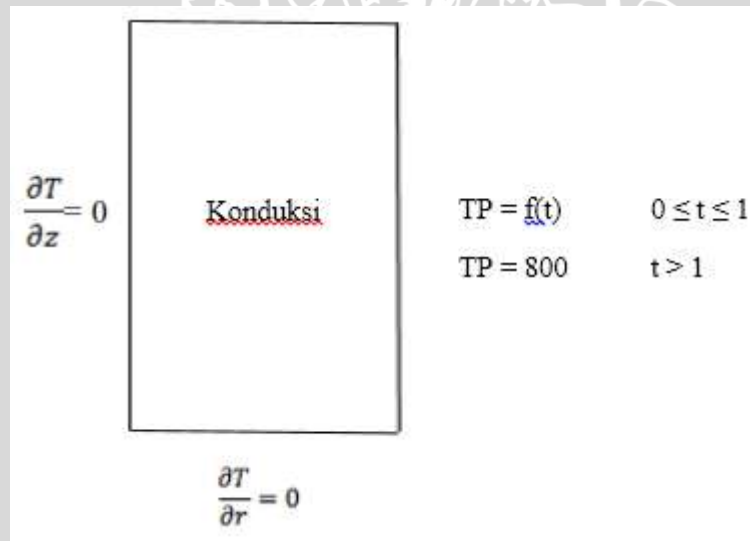


$$\text{Konveksi} = \frac{h}{k}(T_{\infty} - T)$$



(b)

$$\text{Konveksi} = \frac{h}{k}(T_{\infty} - T)$$



(c)

Gambar 4.2 Kondisi batas pada bentuk 2D dengan laju pemanasan (a) 400°C/jam, (b) 600°C/jam, (c) 800°C/jam

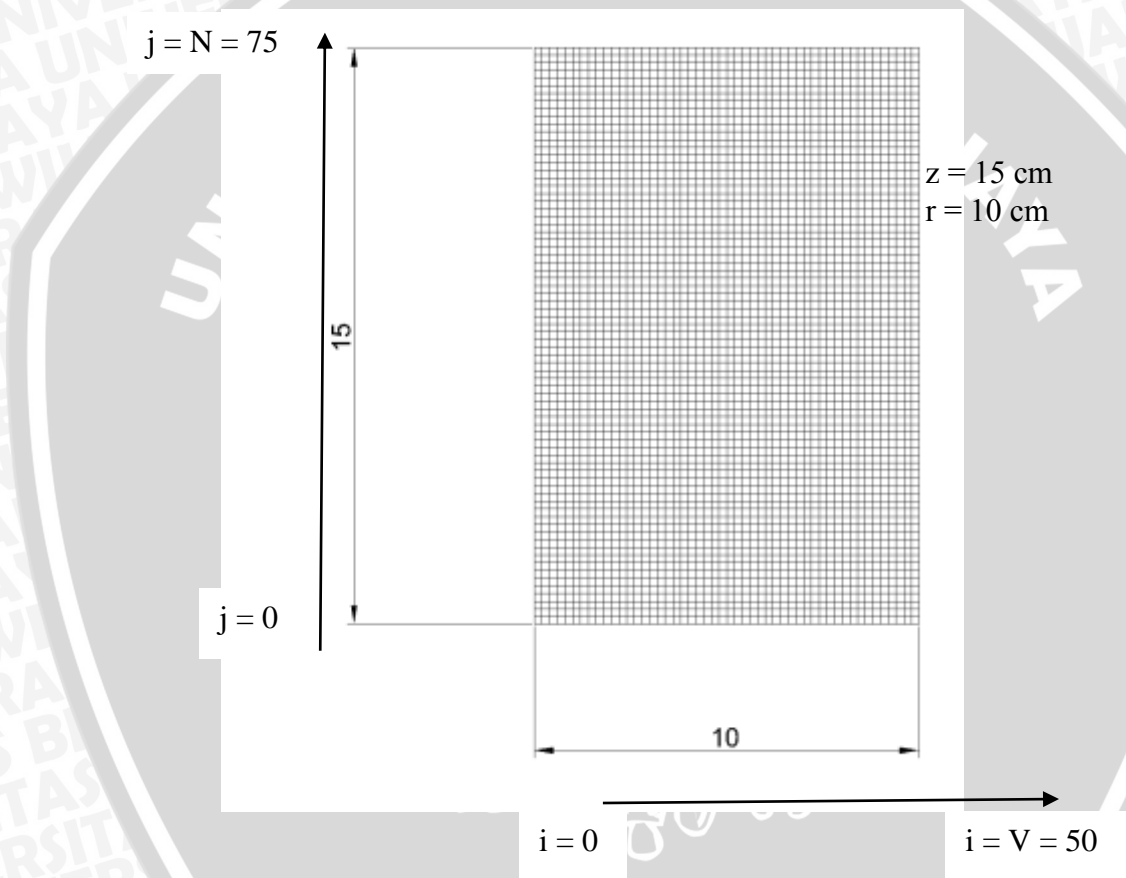
Pada gambar diatas untuk kondisi batas bawah dan kiri bernilai $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ dan $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$ karena merupakan representasi tabung yang diberi isolator. Untuk kondisi batas kanan bernilai $TP = f(t)$ ketika $0 \leq t \leq 1$ dan $TP = 400$ ketika $t > 1$ untuk laju pemanasan 400°C/jam. Untuk laju pemanasan 600°C/jam $TP = 600$ ketika $t > 1$ sedangkan untuk laju

pemanasan $800^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ TP = 800 ketika $t > 1$. Nilai TP tersebut merupakan representasi panas dari heater. Sedangkan kondisi konduksi merupakan representasi panas yang terjadi di dalam tabung.

4.2 Preprocessing

4.2.1 Meshing

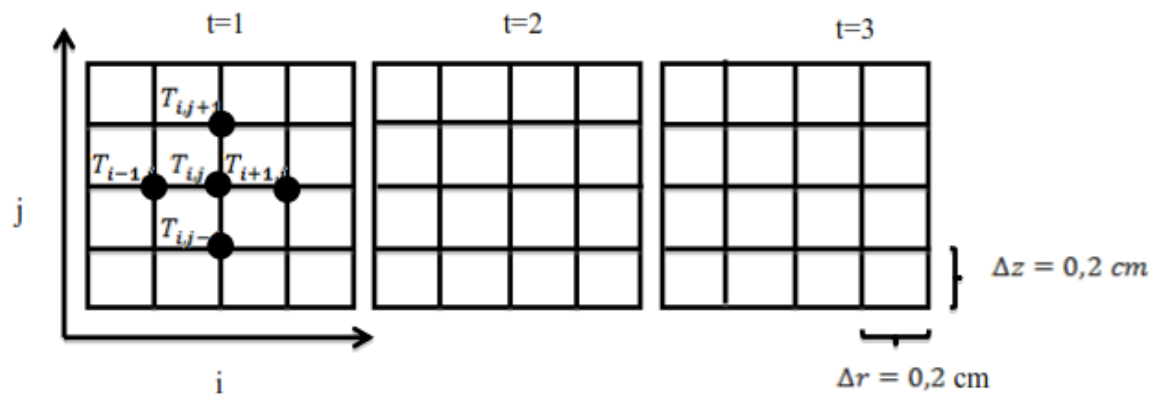
Domain yang digunakan dalam simulasi distribusi temperatur pada silinder ini dapat dijelaskan pada gambar 4.3



Gambar 4.3 Geometri

Domain tersebut kemudian akan dipartisi menjadi elemen-elemen kecil berupa node-node dan digunakan dalam perhitungan komputasi secara elemen hingga. Semakin kecil elemen yang dibentuk maka semakin banyak pula persamaan yang harus diselesaikan oleh *software* sehingga hasil yang diperoleh akan semakin akurat, tetapi beban komputer akan semakin besar.

Jarak *mesh* untuk arah z sepanjang 15 cm adalah $\Delta z = 0,2$ dengan jumlah titik sebanyak $j = 75$. Sedangkan *mesh* untuk arah r sepanjang 10 cm adalah $\Delta r = 0,2$ dengan jumlah titik sebanyak $i = 50$.



Gambar 4.4 *Mesh* domain 2D

$\Delta z = \frac{L}{N}$, dengan L adalah panjang z dan N adalah banyaknya partisi (node) searah sumbu z sedangkan Δr diasumsikan sama dengan Δz .

4.2.2 Persamaan Atur

Persamaan atur yang digunakan untuk perpindahan panas konduksi dengan keadaan transien pada silinder adalah sebagai berikut

$$\frac{\partial \rho c T}{\partial t} = \frac{1}{r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4-1)$$

dengan ρ = massa jenis

c = kalor jenis

k = konduktivitas termal

4.2.3 Kondisi Batas

Penentuan kondisi batas sangat berpengaruh pada saat menyelesaikan persamaan. Oleh karena itu kondisi batas harus ditentukan dengan tepat untuk menghasilkan profil temperatur yang sesuai dengan hukum fisika.

$$\text{Konveksi} = -\frac{h}{k}(T_{\infty} - T)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

Konduksi

$$y = (y_2 \cdot x) - (25 \cdot x) + 25$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

- Permukaan kiri ($i = 0$)

Pada permukaan kiri diberikan kondisi termal simetris bernilai $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$. Sehingga pada permukaan kiri memiliki nilai temperatur yang dipengaruhi oleh *heating rate*

- Permukaan bawah ($j = 0$)

Pada permukaan bawah diberikan kondisi isolasi bernilai $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$. Sehingga pada permukaan bawah memiliki nilai temperatur yang dipengaruhi oleh *heating rate*.

- Permukaan kanan ($i = V + 1$)

Pada permukaan kanan diberikan 2 kondisi yaitu ketika $0 \leq t \leq 1$ temperturnya bernilai $f(t)$ dan $t > 1$ temperturnya bernilai sesuai dengan variabel laju pemanasannya. Oleh karena itu ditentukan terlebih dahulu nilai $f(t)$ yaitu dengan menggunakan persamaan garis $(x_1, y_1) = (0, 25)$ dan $(x_2, y_2) = (1, y_2)$. Dimana x_1, x_2 adalah nilai waktu dan y_1, y_2 adalah nilai suhu minimal dan maksimal. Oleh karena itu diperoleh persamaan berikut :

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

$$\frac{y - 25}{y_2 - 25} = \frac{x - 0}{1 - 0}$$

$$y - 25 = x(y_2 - 25)$$

$$y = y_2 \cdot x - 25 \cdot x + 25$$

(4-2)

Persamaan (4-2) digunakan untuk menentukan kondisi batas pada sisi kanan tiap satuan waktu bila $t < 1$.

- Permukaan atas ($j = N + 1$)

Pada kondisi batas sisi atas digunakan kondisi batas konveksi dengan menggunakan rumus

$$-kA \frac{\partial T}{\partial z} = hA(T_{\infty} - T)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{h}{k}(T_{\infty} - T)$$
(4-3)

Dimana, $h = 0.0003$

$A = 0.15$

4.3 Processing

4.3.1 Diskritisasi Persamaan Atur

Persamaan perpindahan panas konduksi dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(kr \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

Term 1
Term 2
Term 3

(4-4)

Dengan

kalor jenis	$(c) = 1,7 \text{ J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
massa jenis	$(\rho) = 0,64 \text{ gr cm}^{-3}$
konduktivitas termal	$(k) = 0,001 \text{ W cm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Persamaan (4-4) diselesaikan dengan cara metode *finite difference* (beda hingga) untuk mendapatkan skema numerik. Pada kasus ini metode yang digunakan adalah metode Crank – Nicolson, dimana diterapkan beda maju pada turunan pertama terhadap waktu dan beda pusat pada turunan kedua terhadap bangun ruang.

Term 1

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \rho C \frac{T_{i,j}^{t+1} - T_{i,j}^t}{\Delta t}$$
(4-5)

Term 2

Penurunan *term 2* menurut (Ernesto, 2009) adalah sebagai berikut

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{k}{r_i \Delta r^2} (r_{i-\frac{1}{2}} T_{i-1,j}^t - 2r_i T_{i,j}^t + r_{i+\frac{1}{2}} T_{i+1,j}^t)$$
(4-6)

Term 3

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial}{\partial z} \right) &= k \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{T_{i,j+\frac{1}{2}}^t - T_{i,j-\frac{1}{2}}^t}{\Delta z} \right) \\ &= \frac{k}{\Delta z} \left(\frac{T_{i,j+1}^t - T_{i,j}^t}{\Delta z} \right) - \left(\frac{T_{i,j}^t - T_{i,j-1}^t}{\Delta z} \right) \\ &= \frac{k}{\Delta z^2} (T_{i,j+1}^t - 2T_{i,j}^t + T_{i,j-1}^t) \end{aligned} \quad (4-7)$$

Dengan menurunkan persamaan (4-4) seperti pada lampiran 1, akan diperoleh persamaan sebagai berikut

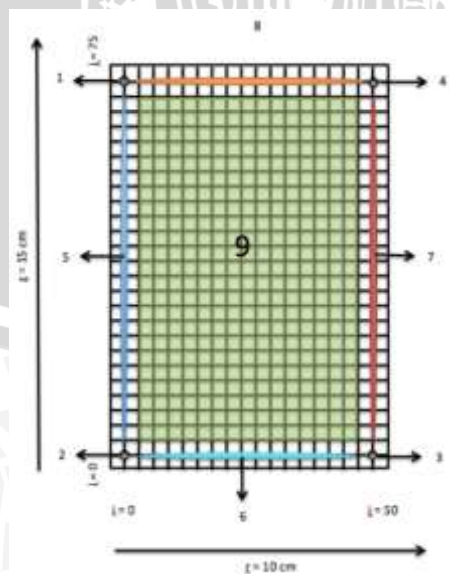
$$T_{i,j}^{t+1} = \frac{T_{i,j}^t (M - 4) + \frac{1}{r_i} (r_{i-\frac{1}{2}} T_{i-1,j}^t + r_{i+\frac{1}{2}} T_{i+1,j}^t) + (T_{i,j+1}^t + T_{i,j-1}^t)}{M} \quad (4-8)$$

Dengan

$$M = \frac{\Delta r^2 \rho C}{\Delta t k} = \frac{0.04 \times 0.64 \times 1.7}{\frac{1}{60} \times 0.001} = 26.06$$

4.3.2 Penyelesaian Persamaan Terdiskritisasi

Berikut ini adalah contoh penyelesaian persamaan tiap *node* pada *mesh* yang telah dibuat. Setiap titik memiliki penyelesaian yang berbeda pada setiap bagian..



Gambar 4.5 Penyelesaian tiap *node* pada *mesh*

- Titik nomor 1

Pada titik ini (1,75) digunakan rumus :

$$T_{1,75}^{t+1} = \frac{T_{1,75}^t(26.06 - 4) + \frac{1}{r_1} \left(r_{1-\frac{1}{2}} T_{0,75}^t + r_{1+\frac{1}{2}} T_{2,75}^t \right) + (T_{1,76}^t + T_{1,74}^t)}{26.06}$$

- Titik nomor 2

Pada titik ini (1,1) digunakan rumus :

$$T_{1,1}^{t+1} = \frac{T_{1,1}^t(26.06 - 4) + \frac{1}{r_1} \left(r_{1-\frac{1}{2}} T_{0,1}^t + r_{1+\frac{1}{2}} T_{2,1}^t \right) + (T_{1,2}^t + T_{1,0}^t)}{26.06}$$

- Titik nomor 3

Pada titik ini (50,1) digunakan rumus :

$$T_{50,1}^{t+1} = \frac{T_{50,1}^t(26.06 - 4) + \frac{1}{r_{50}} \left(r_{50-\frac{1}{2}} T_{49,1}^t + r_{50+\frac{1}{2}} T_{51,1}^t \right) + (T_{50,2}^t + T_{50,0}^t)}{26.06}$$

- Titik nomor 4

Pada titik ini (50,75) digunakan rumus :

$$T_{50,75}^{t+1} = \frac{T_{50,75}^t(26.06 - 4) + \frac{1}{r_{50}} \left(r_{50-\frac{1}{2}} T_{49,75}^t + r_{50+\frac{1}{2}} T_{51,75}^t \right) + (T_{50,76}^t + T_{50,74}^t)}{26.06}$$

- Titik nomor 5

Pada titik ini (1,2...74) digunakan rumus :

$$T_{1,j}^{t+1} = \frac{T_{1,j}^t(M - 4) + \frac{1}{r_1} \left(r_{1-\frac{1}{2}} T_{0,j}^t + r_{1+\frac{1}{2}} T_{2,j}^t \right) + (T_{1,j+1}^t + T_{1,j-1}^t)}{26.06}$$

dengan $j = 2 \dots 74$

- Titik nomor 6

Pada titik ini (2...49,1) digunakan rumus :

$$T_{i,1}^{t+1} = \frac{T_{i,1}^t(26.06 - 4) + \frac{1}{r_i} \left(r_{i-\frac{1}{2}} T_{i-1,1}^t + r_{i+\frac{1}{2}} T_{i+1,1}^t \right) + (T_{i,2}^t + T_{i,0}^t)}{26.06}$$

dengan $i = 2 \dots 49$

- Titik nomor 7

Pada titik ini (50,2...74) digunakan rumus :

$$T_{50,j}^{t+1} = \frac{T_{50,j}^t(26.06 - 4) + \frac{1}{r_{50}} \left(r_{50-\frac{1}{2}} T_{49,j}^t + r_{50+\frac{1}{2}} T_{51,j}^t \right) + (T_{50,j+1}^t + T_{50,j-1}^t)}{26.06}$$

dengan $j = 2 \dots 74$

- Titik nomor 8

Pada titik ini (2...49,75) digunakan rumus :

$$T_{i,75}^{t+1} = \frac{T_{i,75}^t(26.06 - 4) + \frac{1}{r_i} \left(r_{i-\frac{1}{2}} T_{i-\frac{1}{2}}^t + r_{i+\frac{1}{2}} T_{i+\frac{1}{2}}^t \right) + (T_{i,76}^t + T_{i,74}^t)}{26.06}$$

dengan $i = 2 \dots 49$

- Titik nomor 9

Pada titik ini (2...49,2...74) digunakan rumus :

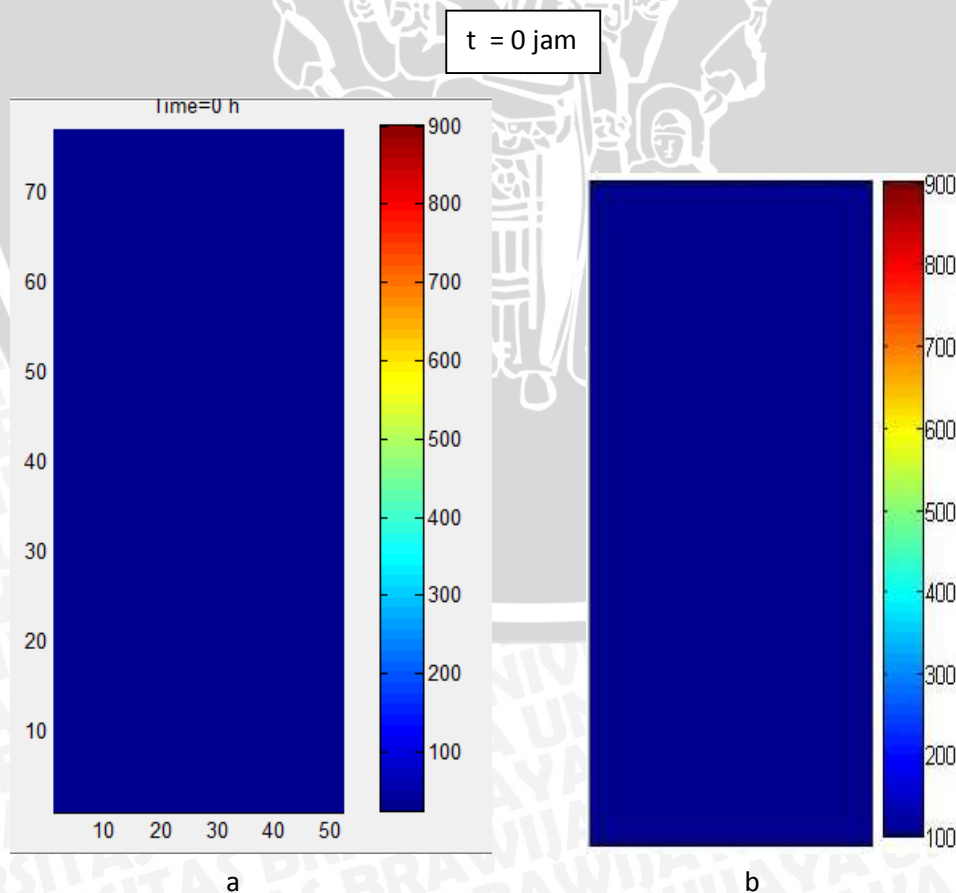
$$T_{i,j}^{t+1} = \frac{T_{i,j}^t(26.06 - 4) + \frac{1}{r_i} \left(r_{i-\frac{1}{2}} T_{i-\frac{1}{2},j}^t + r_{i+\frac{1}{2}} T_{i+\frac{1}{2},j}^t \right) + (T_{i,j+1}^t + T_{i,j-1}^t)}{26.06}$$

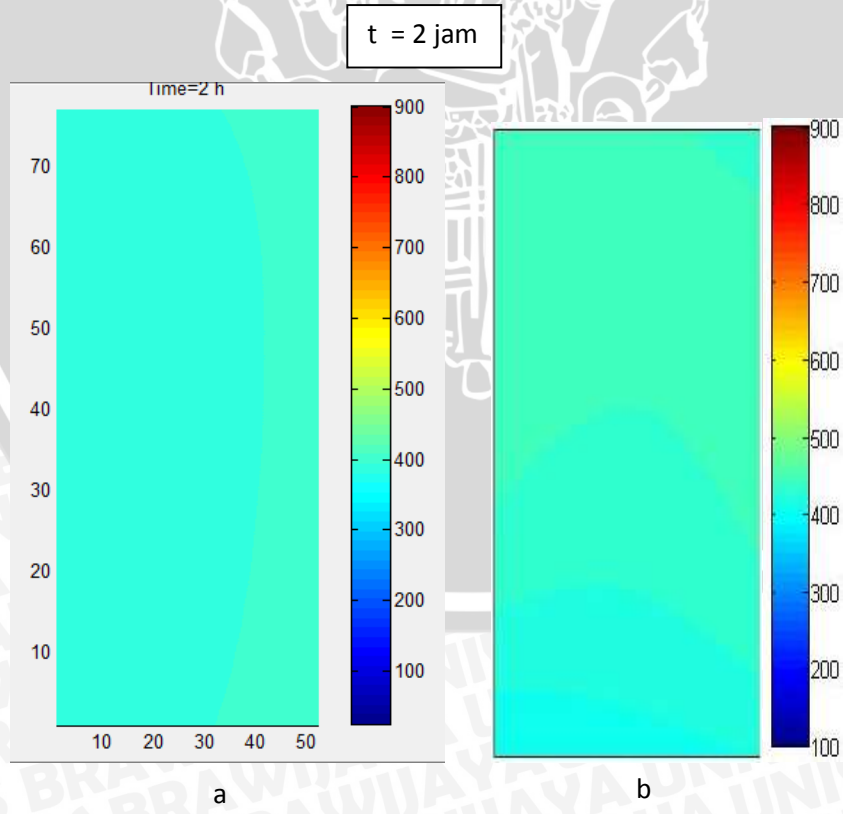
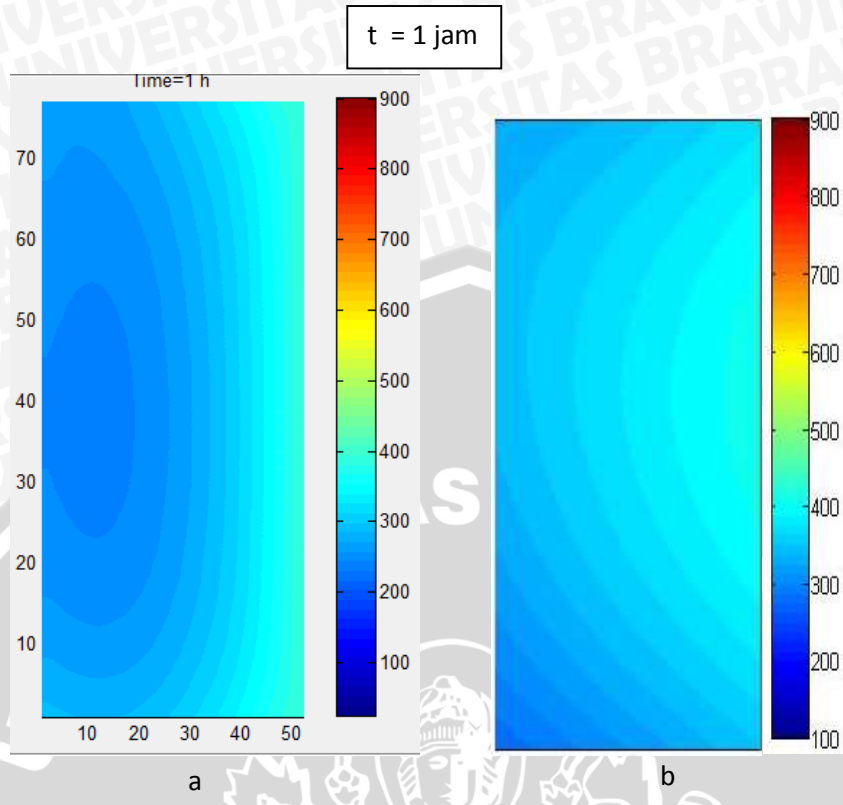
Dengan $i = 2 \dots 49$ dan $j = 2 \dots 74$

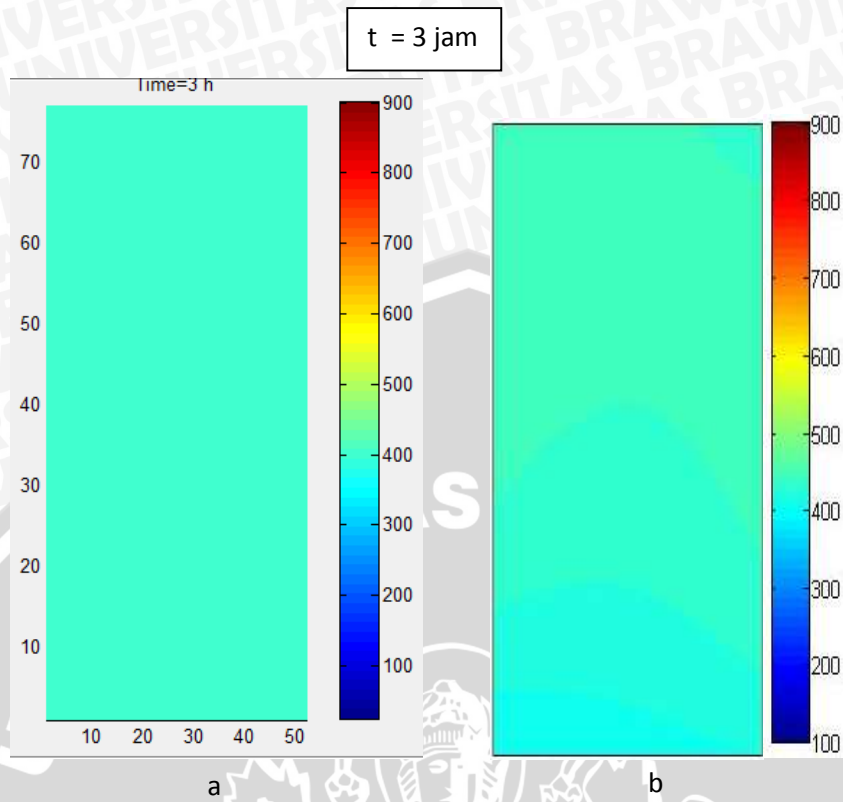
4.4 Postprocessing (Tampilan Hasil)

Hasil yang diperoleh dari simulasi distribusi temperatur perpindahan panas konduksi ini divisualisasikan menggunakan plot pada MATLAB dengan *command pcolor*.

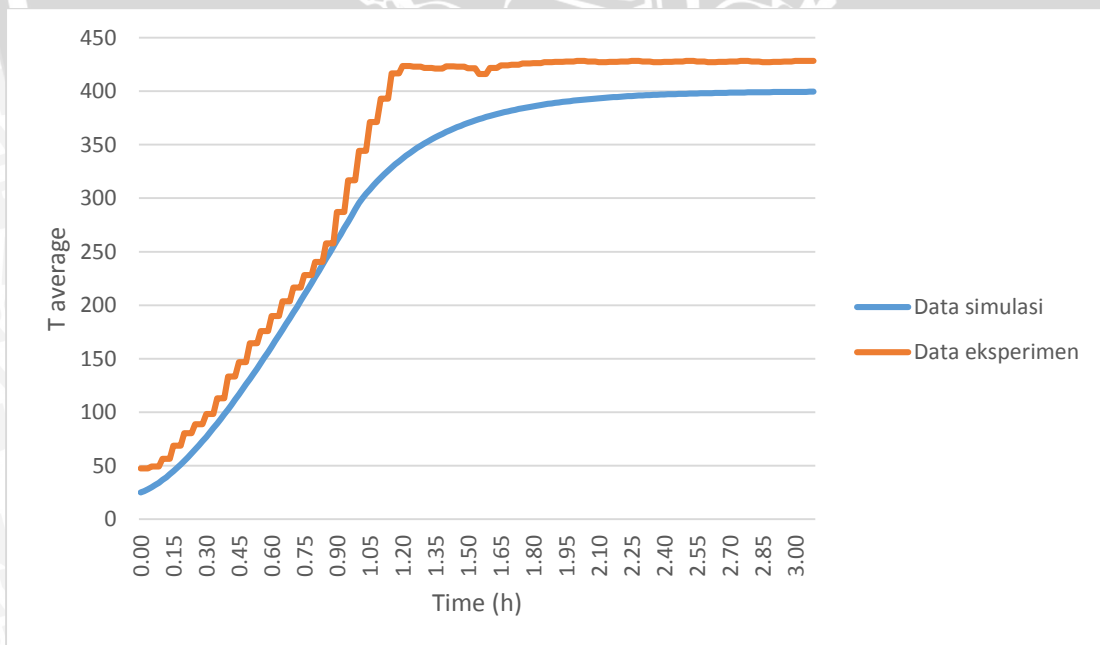
- Laju pemanasan $400^\circ\text{C}/\text{jam}$







Gambar 4.6 *Plot* distribusi temperatur dengan laju pemanasan 400°C/jam untuk t = 0 jam : (a) hasil simulasi, (b) data validasi; t = 1 jam (a) hasil simulasi, (b) data validasi; t = 2 jam (a) hasil simulasi, (b) data validasi; t = 3 jam (a) hasil simulasi, (b) data validasi



Gambar 4.7 Grafik temperatur rata-rata terhadap waktu dengan laju pemanasan 400°C/jam

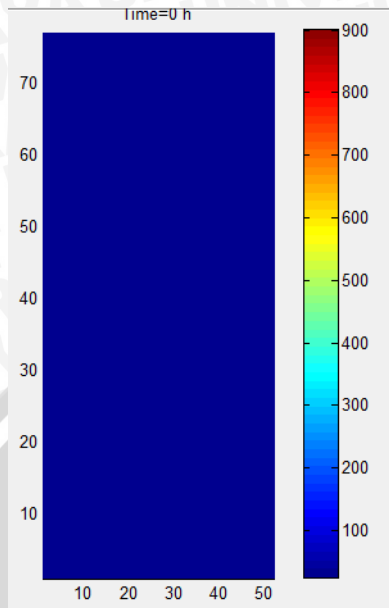
Pada hasil *plot* simulasi dengan laju pemanasan $400^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ dapat dilihat bahwa perbedaan warna *plot* sangat signifikan setelah simulasi berjalan selama 1 jam, hal ini disebabkan karena panas yang masuk ke dalam *furnace* berasal dari sisi kanan dan *boundary condition* pada sisi kanan memiliki nilai fungsi terhadap waktu. Ketika simulasi berjalan diatas 1 jam, *boundary condition* pada sisi kanan yang merupakan sumber panas masuk di*holding* sebesar $400^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ agar distribusi temperaturnya merata sesuai dengan yang diharapkan. Oleh karena itu distribusi temperatur dapat merata sampai dengan 3 jam.

Dapat dilihat bahwa hasil *plot* simulasi laju pemanasan $400^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ memiliki perbedaan pola distribusi dengan hasil *plot* dari data penelitian eksperimental dengan laju pemanasan $400^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ yang sudah ada. Hal ini dikarenakan oleh penentuan kondisi batas yang digunakan pada simulasi. Untuk kondisi batas kiri dan kondisi batas bawah pada simulasi menggunakan nilai temperatur awal sebesar 25°C sedangkan untuk kondisi batas atas menggunakan kondisi batas konveksi dan kondisi batas didalam model *piroliser* adalah konduksi. Pada eksperimen kondisi batas atas tidak hanya dipengaruhi oleh konveksi saja, radiasi juga mempengaruhi proses pirolisis yang ada di dalam *furnace* pirolisisnya. Pada saat proses pirolisis dilakukan, proses perpindahan panas yang terjadi di dalam *furnace* juga tidak hanya dipengaruhi oleh konduksi. Oleh karena itu persamaan atur yang digunakan juga sangat berpengaruh pada hasil perhitungan simulasi dan hasil *plotting* warna pada model 2D-nya

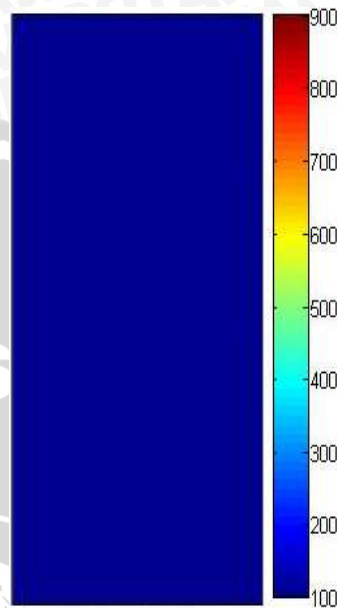
Grafik diatas menunjukkan grafik hasil simulasi dan grafik data validasi. Dapat dilihat pada kedua grafik diatas memiliki kecenderungan naik, hal ini disebabkan karena panas akan masuk ke dalam *furnace* sampai dengan waktu 1 jam. Setelah melebihi waktu 1 jam, laju pemanasan di*holding* sebesar $400^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ sehingga kenaikan temperatur rata-rata diatas 1 jam sedikit. Hasil dari simulasi dan data validasi tidak terlalu berbeda jauh.

- Laju pemanasan 600°C/jam

t = 0 jam

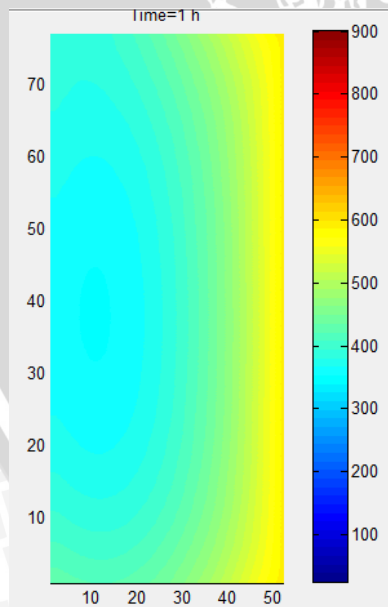


a

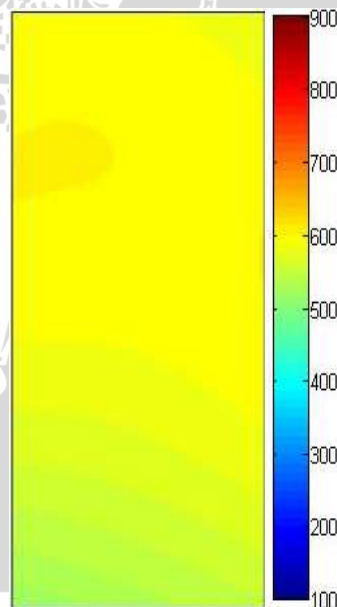


b

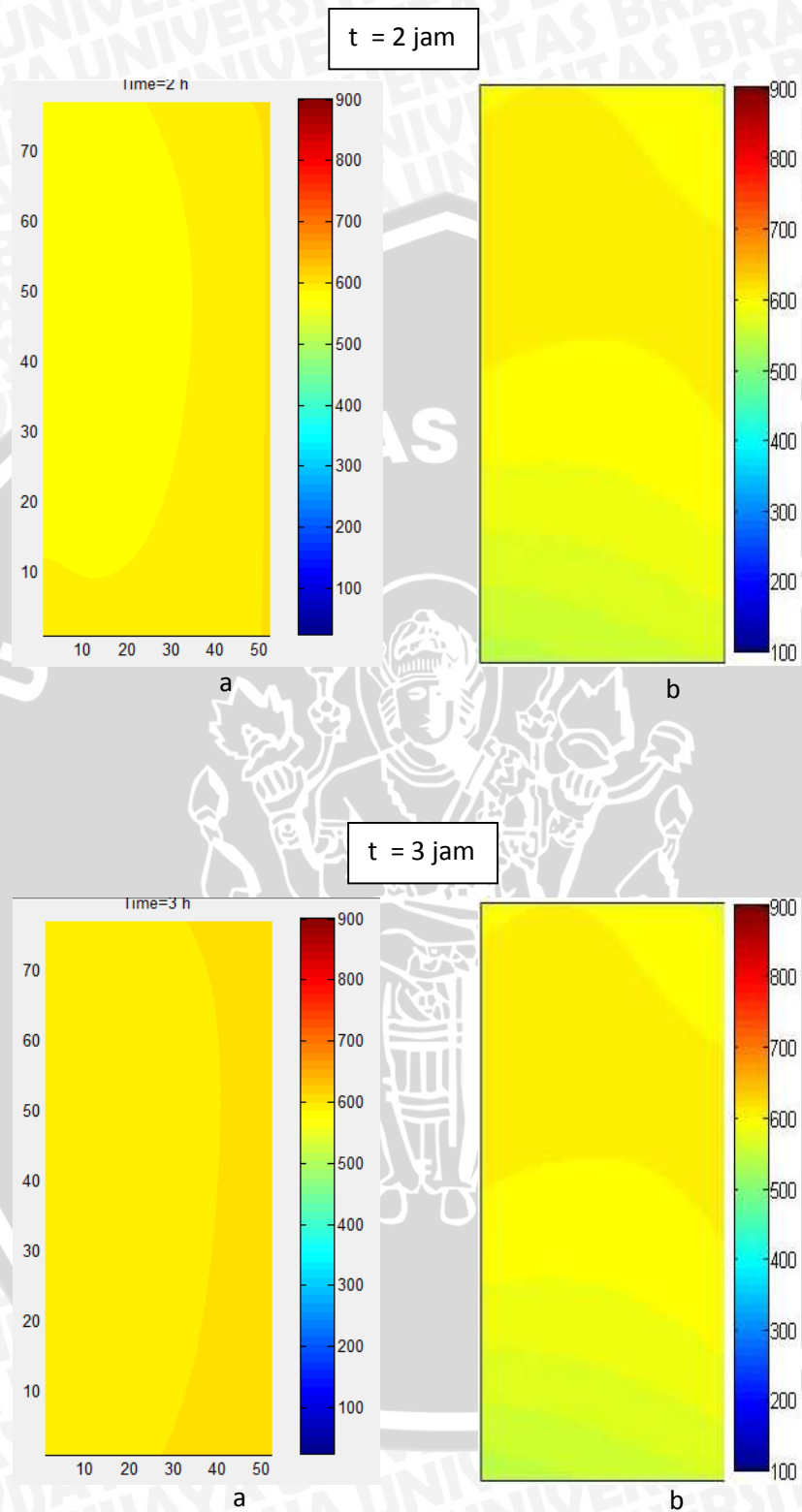
t = 1 iam



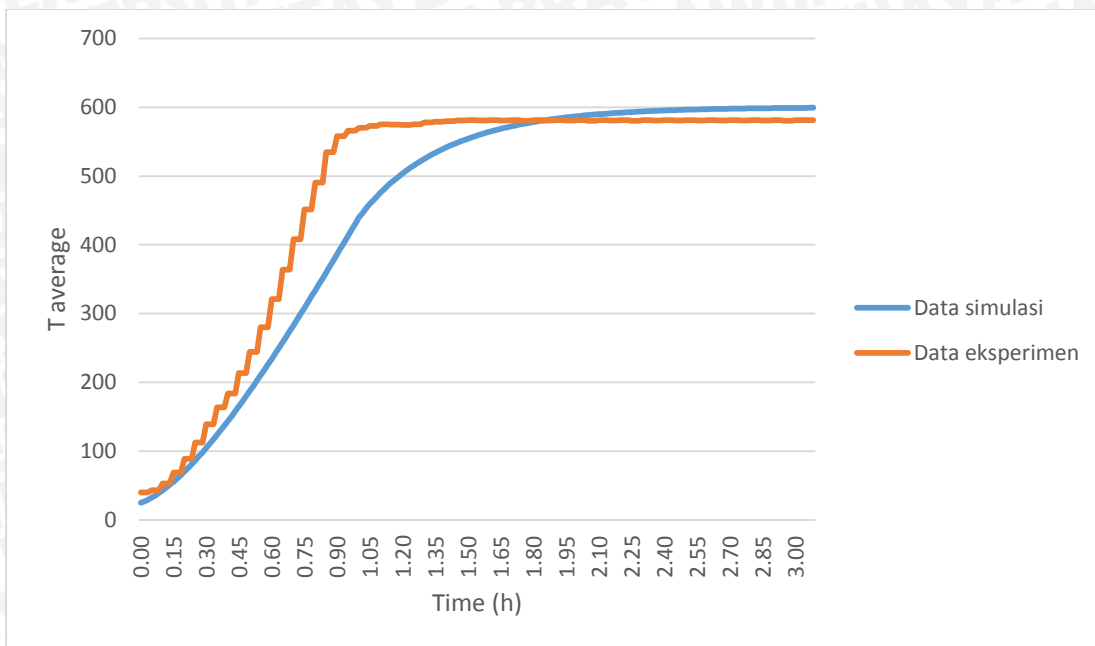
a



b



Gambar 4.8 *Plot* distribusi temperatur dengan laju pemanasan 600°C/jam untuk t = 0 jam : (a) hasil simulasi, (b) data validasi; t = 1 jam (a) hasil simulasi, (b) data validasi; t = 2 jam (a) hasil simulasi, (b) data validasi; t = 3 jam (a) hasil simulasi, (b) data validasi



Gambar 4.9 Grafik temperatur rata-rata terhadap waktu dengan laju pemanasan $600^{\circ}\text{C}/\text{jam}$

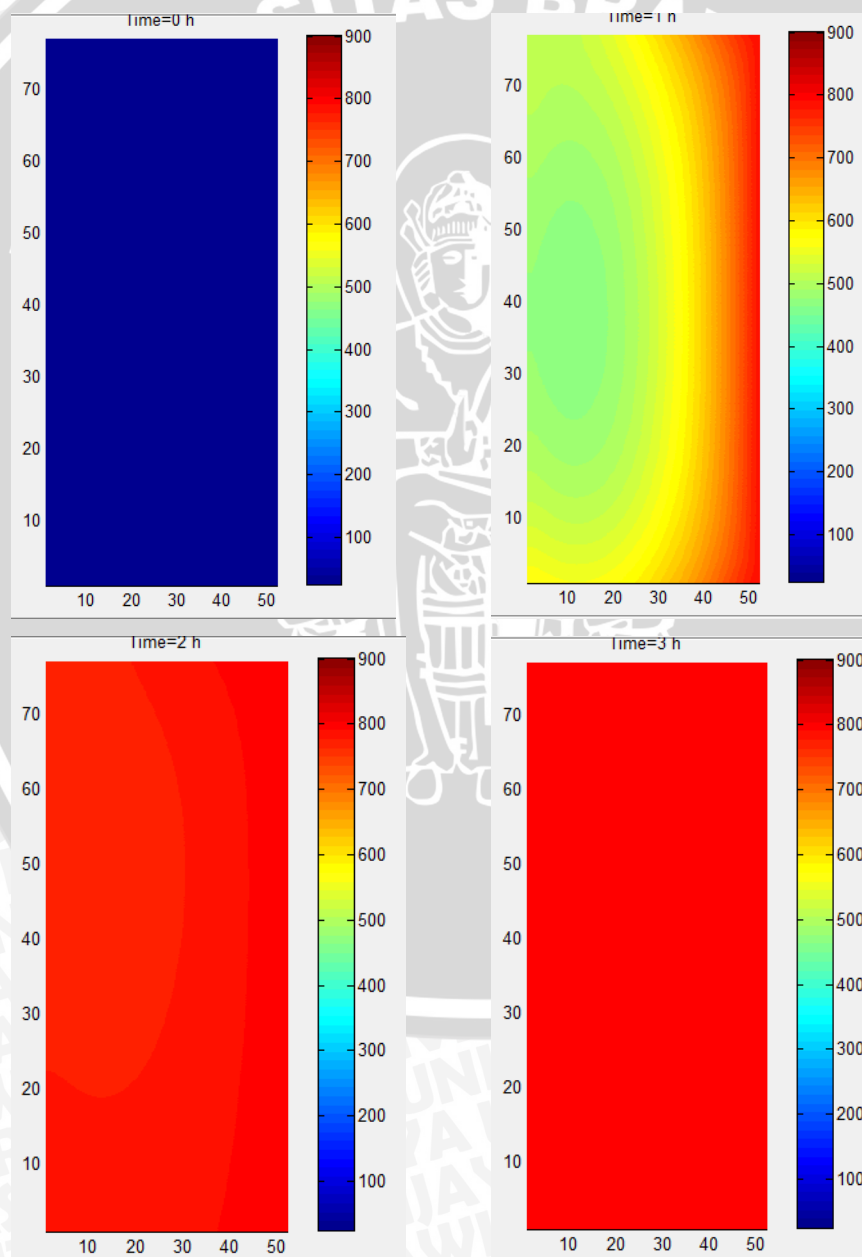
Pada hasil *plot* dengan laju pemanasan $600^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ dapat dilihat bahwa perbedaan warna *plot* sangat signifikan setelah simulasi berjalan selama 1 jam, hal ini disebabkan karena panas yang masuk ke dalam *furnace* berasal dari sisi kanan dan *boundary condition* pada sisi kanan memiliki nilai fungsi terhadap waktu. Ketika simulasi berjalan diatas 1 jam, *boundary condition* pada sisi kanan yang merupakan sumber panas masuk di*holding* sebesar $600^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ agar distribusi temperaturnya merata sesuai dengan yang diharapkan. Oleh karena itu distribusi temperatur dapat merata sampai dengan 3 jam.

Dapat dilihat bahwa hasil *plot* simulasi laju pemanasan $600^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ memiliki perbedaan pola distribusi dengan hasil *plot* dari data penelitian eksperimental dengan laju pemanasan $600^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ yang sudah ada. Hal ini dikarenakan oleh penentuan kondisi batas yang digunakan pada simulasi. untuk kondisi batas kiri dan kondisi batas bawah pada simulasi menggunakan nilai temperatur awal sebesar 25°C sedangkan untuk kondisi batas atas menggunakan kondisi batas konveksi dan kondisi batas didalam model *piroliser* adalah konduksi. Pada eksperimen kondisi batas atas tidak hanya dipengaruhi oleh konveksi saja, radiasi juga mempengaruhi proses pirolisis yang ada di dalam *furnace* pirolisisnya. Pada saat proses pirolisis dilakukan, proses perpindahan panas yang terjadi di dalam *furnace* juga tidak hanya dipengaruhi oleh konduksi. Oleh karena itu persamaan atur yang digunakan juga sangat

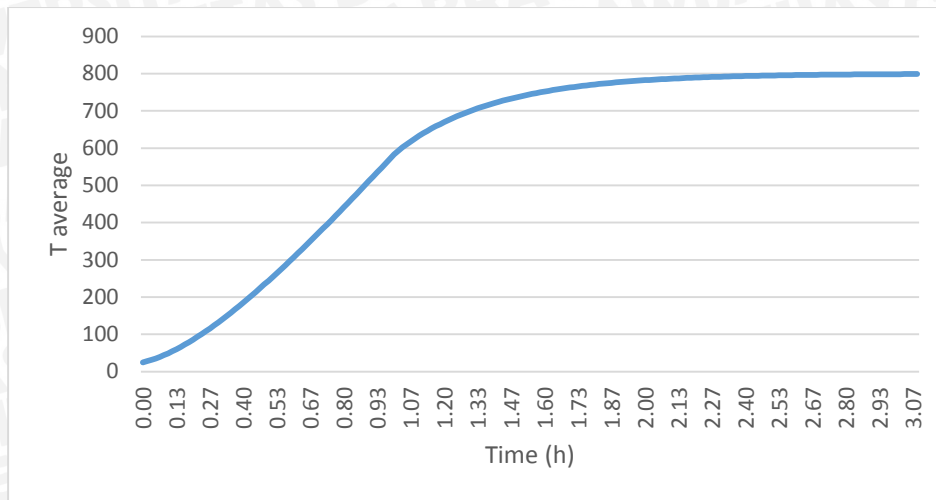
berpengaruh pada hasil perhitungan simulasi dan hasil *plotting* warna pada model 2D-nya

Grafik diatas menunjukkan grafik hasil simulasi dan grafik data validasi. Dapat dilihat pada kedua grafik diatas memiliki kecenderungan naik, hal ini disebabkan karena panas akan masuk ke dalam *furnace* sampai dengan waktu 1 jam. Setelah melebihi waktu 1 jam, laju pemanasan *diholding* sebesar $600^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ sehingga kenaikan temperatur rata-rata diatas 1 jam sedikit. Hasil dari simulasi dan data validasi tidak terlalu berbeda jauh.

- Laju pemanasan $800^{\circ}\text{C}/\text{jam}$



Gambar 4.10 *Plot* distribusi temperatur dengan laju pemanasan $800^{\circ}\text{C}/\text{jam}$



Gambar 4.11 Grafik temperatur rata-rata terhadap waktu dengan laju pemanasan $800^{\circ}\text{C}/\text{jam}$

Pada hasil *plot* dengan laju pemanasan $800^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ dapat dilihat bahwa perbedaan warna *plot* sangat signifikan setelah simulasi berjalan selama 1 jam, hal ini disebabkan karena panas yang masuk ke dalam *furnace* berasal dari sisi kanan dan *boundary condition* pada sisi kanan memiliki nilai fungsi terhadap waktu. Ketika simulasi berjalan diatas 1 jam, *boundary condition* pada sisi kanan yang merupakan sumber panas masuk di *holding* sebesar $800^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ agar distribusi temperaturnya merata sesuai dengan yang diharapkan. Oleh karena itu distribusi temperatur dapat merata sampai dengan 3 jam.

Pola distribusi pada hasil *plot* dipengaruhi oleh penentuan kondisi batas yang digunakan pada simulasi. Untuk kondisi batas kiri dan kondisi batas bawah pada simulasi menggunakan nilai temperatur awal sebesar 25°C sedangkan untuk kondisi batas atas menggunakan kondisi batas konveksi dan kondisi batas didalam model *piroliser* adalah konduksi. Pada eksperimen kondisi batas atas tidak hanya dipengaruhi oleh konveksi saja, radiasi juga mempengaruhi proses pirolisis yang ada di dalam *furnace* pirolisisnya. Pada saat proses pirolisis dilakukan, proses perpindahan panas yang terjadi di dalam *furnace* juga tidak hanya dipengaruhi oleh konduksi. Oleh karena itu persamaan atur yang digunakan juga sangat berpengaruh pada hasil perhitungan simulasi dan hasil *plotting* warna pada model 2D-nya

Dapat dilihat pada grafik diatas memiliki kecenderungan naik, hal ini disebabkan karena panas akan masuk ke dalam *furnace* sampai dengan waktu 1 jam. Setelah melebihi waktu 1 jam, laju pemanasan di *holding* sebesar $800^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ sehingga kenaikan temperatur rata-rata diatas 1 jam sedikit.