

PENGARUH Bi TERHADAP POLA DISTRIBUSI SUHU BENDA PADAT BERBANGKIT ENERGI ALIRAN KALOR 1 DIMENSI

Pippie Arbiyanti

*Program Studi D3 Mekatronika Universitas Sanata Dharma Yogyakarta
E-mail: pipie@staff.usd.ac.id*

Abstract :

This paper is to show the influence of Bi number to temperature distribution of 1D's solid matter with heat flow energized in non-steady state environment, and to find the Bi number that spread evenly time by time in that solid matter. The matter was placed in the uniform temperature and uniform convection coefficient environment. At the same time, the matter was energized by uniform heat energy continuously time by time. This research was done by computation method, with an assumption that matter's characteristics are same and uniform.

According to this research, the rising the Bi number, temperature distribution of the energized matter is un-uniform. And temperature distribution of the energized matter is spread evenly time by time if Bi number ≤ 0.01 , and $\theta_{max} = 0,040715971$.

Keywords : Bi number, heat flow energized, θ (Theta)

1. PENDAHULUAN

Jika pada sebuah benda padat dikenai kalor (dipanaskan), kalor akan mengalir dalam benda bermula dari bagian yang paling dekat dengan sumber kalor, yaitu dari bagian permukaan menuju ke bagian terjauhnya, yaitu menuju pusatnya. Hal ini terjadi misalnya dalam perancangan benda yang mengalami proses pendinginan atau pemanasan seperti yang diinginkan, seperti pada proses *quenching*, *annealing* maupun proses *tempering*. Pada kasus benda padat aliran kalor 1D pada keadaan tak tunak tanpa adanya pembangkitan energi, pola distribusi suhu dari waktu ke waktu akan merata bila nilai Bilangan Biot (Bi) $< 0,1$ (Holman, Kreith, Incropera). Hal ini berlaku untuk benda slab, silinder panjang, dan bola.

Untuk kasus benda uji dengan aliran kalor 1D dengan pembangkitan energi, bagaimanakah pola distribusi suhu dari waktu ke waktu? Berapakah nilai perbedaan suhu tertinggi dan terendah yang terjadi selama proses keadaan tak tunak berlangsung dapat diabaikan? Timbulnya pertanyaan ini mendorong penulis untuk mengadakan penelitian tentang pengaruh bilangan Biot terhadap pola distribusi suhu dari waktu ke waktu pada benda padat berbangkit energi kasus aliran kalor 1D. Selain itu juga ingin memastikan apakah metode beda hingga cara eksplisit dapat dipergunakan untuk menyelesaikan persoalan tersebut.

2. DASAR TEORI

a. Kesetimbangan Energi

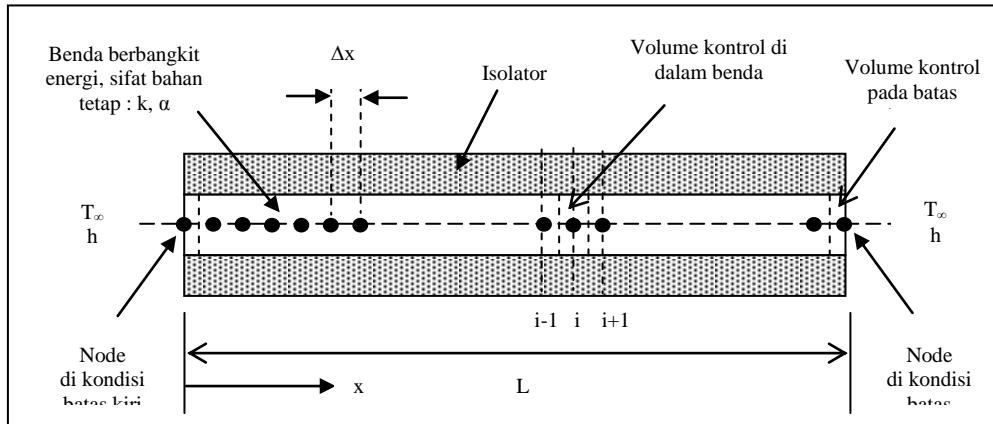
Persamaan numerik dengan metode beda hingga cara eksplisit didapatkan dengan mempergunakan prinsip kesetimbangan energi pada volume kontrol benda sebagai berikut:

$$\left[\begin{array}{c} \text{seluruh energi yang} \\ \text{masuk melalui permukaan} \\ \text{volumekontrol selama} \\ \text{selang waktu } \Delta t. \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{energi pembangkitan} \\ \text{di dalam volume} \\ \text{kontrol selama} \\ \text{selang waktu } \Delta t \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{perubahan energi} \\ \text{dalam di volume} \\ \text{kontrol selama} \\ \text{selang waktu } \Delta t \end{array} \right]$$

$$\left[\sum_{i=1}^n q_i \right] + \left[\dot{q} \cdot V \right] = \left[\rho c V \frac{\partial T}{\partial t} \right] \quad \dots(1)$$

b. Persamaan Numerik Beda Hingga Cara Eksplisit

Untuk mendapatkan persamaan numerik, benda dibagi menjadi bagian-bagian kecil, yang dinamakan dengan volume kontrol benda. Suhu pada volume kontrol dihitung dengan persamaan numerik yang sesuai dengan posisi volume kontrol, yang diwakili dengan titik-titik seperti pada Gambar 1.



Gambar 1: Titik-titik pada benda uji

b.1. Persamaan untuk titik di kondisi batas kiri

Dengan prinsip kesetimbangan energi pada volume kontrol untuk titik di kondisi batas kiri diperoleh persamaan:

$$T_i^{n+1} = 2FoBiT_\infty - (2FoBi + 2Fo - 1)T_i^n + 2FoT_{i+1}^n + Fo \frac{q(\Delta x)^2}{k} \quad \dots(2)$$

dengan syarat stabilitas:

$$Fo \leq \left(\frac{1}{2(Bi + 1)} \right) \quad \dots(3)$$

b.2. Persamaan untuk titik di dalam benda

Dengan prinsip kesetimbangan energi pada volume kontrol untuk titik di dalam benda diperoleh persamaan:

$$T_i^{n+1} = Fo(T_{i-1}^n + T_{i+1}^n + q(\Delta x)^2) + (1 - 2Fo)T_i^n \quad \dots(4)$$

dengan syarat stabilitas:

$$Fo \leq \frac{1}{2} \quad \dots(5)$$

b.3. Persamaan untuk titik di kondisi batas kanan

Dengan prinsip kesetimbangan energi pada volume kontrol untuk titik di kondisi batas kanan diperoleh persamaan:

$$T_i^{n+1} = 2FoBiT_\infty - (2FoBi + 2Fo - 1)T_i^n + 2FoT_{i-1}^n + Fo \frac{q(\Delta x)^2}{k} \quad \dots(6)$$

dengan syarat stabilitas :

$$Fo \leq \left(\frac{1}{2(Bi + 1)} \right) \quad \dots(7)$$

dengan;

T_i^n : suhu pada posisi x saat t, °C

T_{i-1}^n : suhu pada titik sebelah kiri x saat t, °C

T_i^{n+1} : suhu pada titik sebelah kanan x saat t, °C

k : konduktivitas termal bahan, W/m²°C

q : daya yang dibangkitkan persatuan volume, W/m³.

T_∞ : suhu fluida, °C
 T_i : suhu awal benda, °C
 Δx : jarak antar titik, m

t : waktu, detik
Bi : bilangan Biot
Fo : bilangan Fourier

c. Bilangan Biot (Bi)

Bilangan Biot (Bi) adalah bilangan tidak berdimensi yang merupakan perbandingan antara hambatan konduksi di dalam benda dengan hambatan konveksi di permukaan benda (Cengel). Dinyatakan dengan persamaan:

$$Bi = \frac{\text{hambatan konduksi}}{\text{hambatan konveksi}} = \frac{(L_c / k)}{(1/h)} = \frac{(hL_c)}{k} \quad \dots(8)$$

dimana L_c dinyatakan dengan persamaan:

$$L_c = \frac{\text{Volume benda}}{\text{Luas perpindahan panas}} = \frac{V}{A} = \frac{AxL}{2A} = \frac{1}{2}L \quad \dots(9)$$

dengan;

L : panjang benda uji, m
 L_c : panjang karakteristik, m
A : luas permukaan benda yang bersentuhan dengan fluida, m^2
V : Volume benda uji, m^3
h : koefisien perpindahan panas konveksi, $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$
k : koefisien perpindahan panas konduksi benda uji, $W/m\text{ }^\circ\text{C}$.

d. Nilai θ

Nilai θ merupakan beda suhu maksimum yang terjadi di dalam benda selama proses tak tunak berlangsung dengan beda suhu maksimum yang mungkin terjadi di dalam benda, yang dinyatakan dengan persamaan:

$$\theta = \frac{\text{beda suhu maks pd benda}}{\text{beda suhu maks pd benda yg mungkin terjadi}} = \left| \frac{T_{tepi} - T_{pst}}{T_\infty - T_i} \right| \quad \dots(10)$$

dengan;

T_{tepi} : suhu pada tepi benda, °C.
 T_{pst} : suhu titik tengah benda, °C.

3. PEMBAHASAN

a. Hasil

Penelitian dilakukan dengan metode komputasi beda hingga cara eksplisit. Beberapa asumsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah: a) sifat bahan tetap terhadap perubahan suhu, b) sifat bahan seragam, c) tidak terjadi perubahan bentuk dan volume selama proses tak tunak, d) energi yang dibangkitkan di dalam benda bersifat seragam dan merata, dan e) suhu fluida dan nilai koefisien perpindahan panas konveksi tetap.

Perhitungan dilakukan dengan memilih nilai Bi yang dapat mewakili, seperti terlihat pada Tabel 1, dengan memperhatikan syarat stabilitas berdasarkan persamaan (3), (5), dan (7).

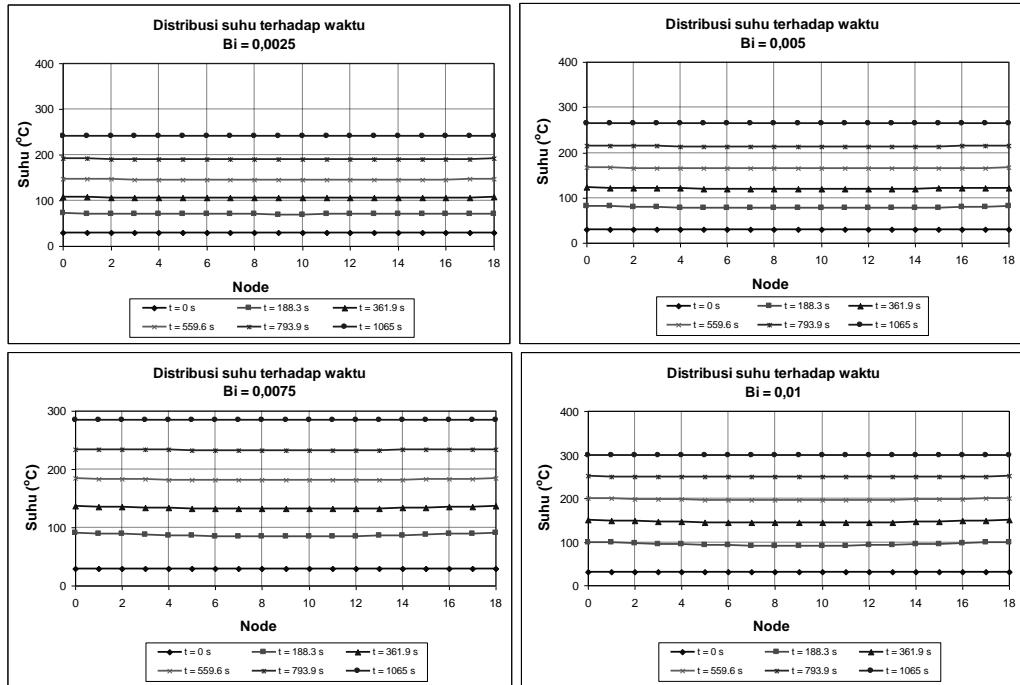
Tabel 1: Wakil Bilangan Bi untuk penelitian

| No | Kasus | Kisaran Bilangan Biot | Wakil Bilangan Biot yang dipilih |
|----|---------|-------------------------|---|
| 1 | Kasus 1 | $Bi \leq 0,01$ | $Bi = 0,0025 : 0,0050 : 0,0075 : 0,010$ |
| 2 | Kasus 2 | $0,01 \leq Bi \leq 0,1$ | $Bi = 0,025 : 0,05 : 0,075 : 0,1$ |
| 3 | Kasus 3 | $Bi \geq 0,1$ | $Bi = 0,25 : 0,5 : 0,75 : 1$ |

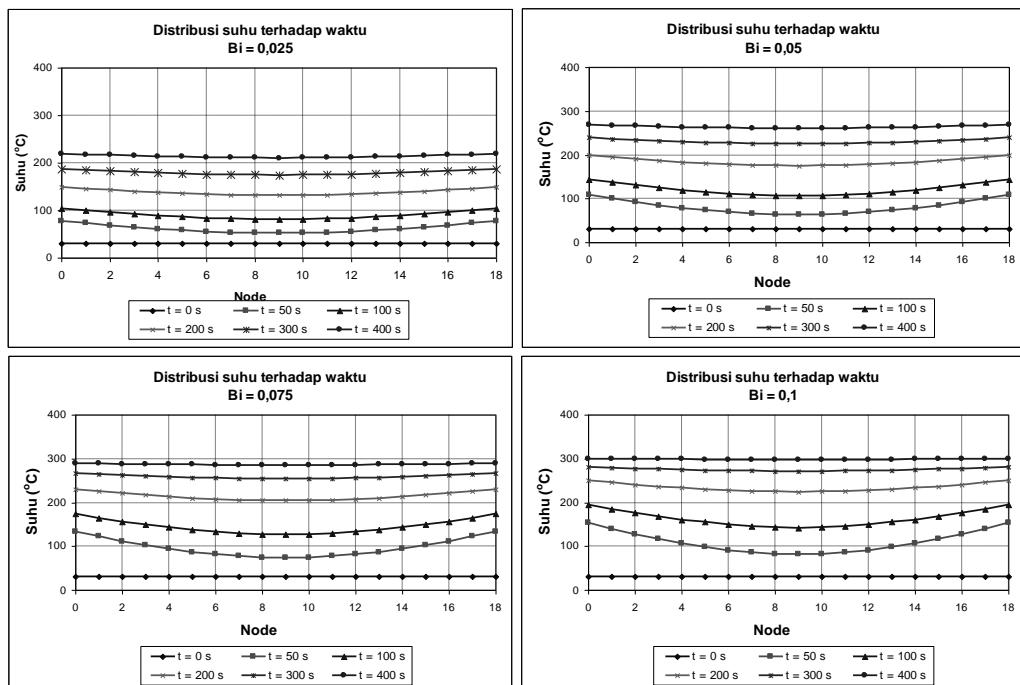
Dalam penelitian ini benda uji yang digunakan adalah baja karbon ($k=60,5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$), dengan 19 jumlah titik pada jarak antar titik 0,005 m, harga $h= 1.000 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, harga $q= 10.000 \text{ W/m}^3$, suhu fluida= 300 °C, dan suhu awal benda = 30 °C.

a.1. Pola Distribusi Suhu Dari Waktu Ke Waktu Untuk Berbagai Nilai Bi

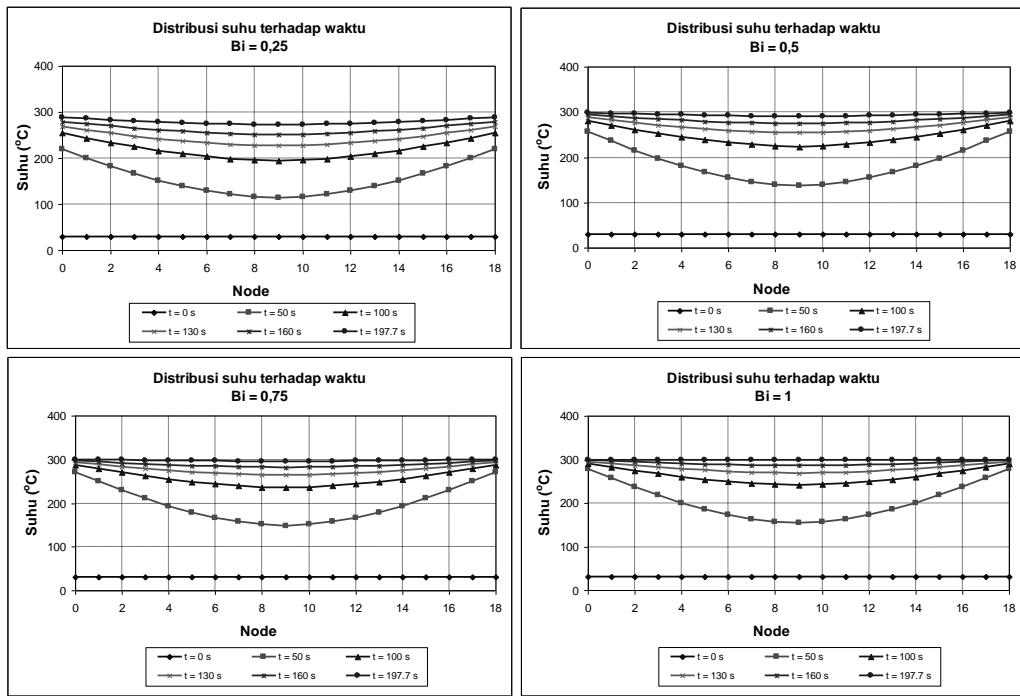
Hasil perhitungan penelitian pola distribusi suhu dari waktu ke waktu untuk berbagai nilai bilangan Bi disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 2 sampai dengan Gambar 4.



Gambar 2: Pola distribusi suhu untuk $\text{Bi} \leq 0,01$



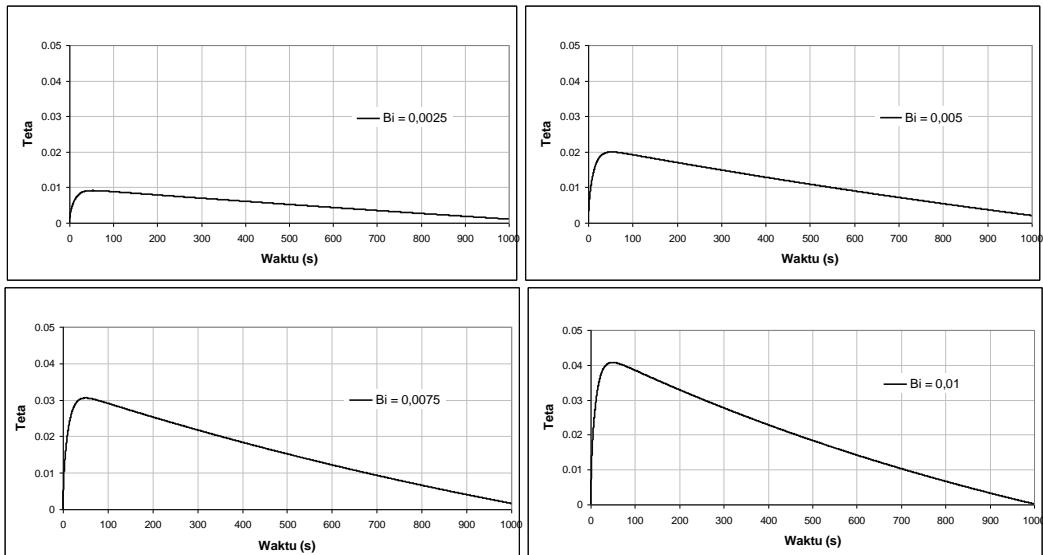
Gambar 3: Pola distribusi suhu untuk $0,01 \leq \text{Bi} \leq 0,1$



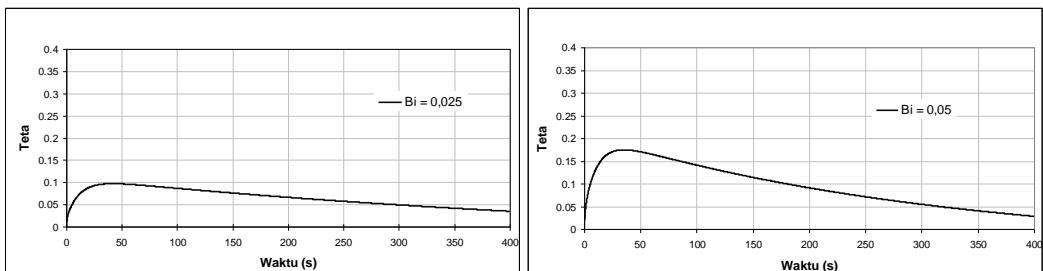
Gambar 4: Pola distribusi suhu untuk $Bi \geq 0,1$

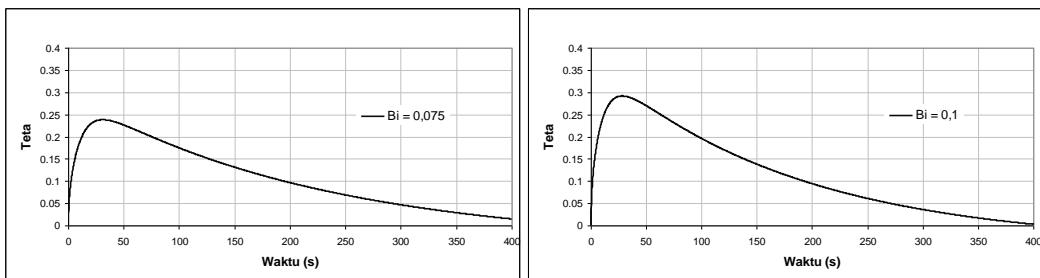
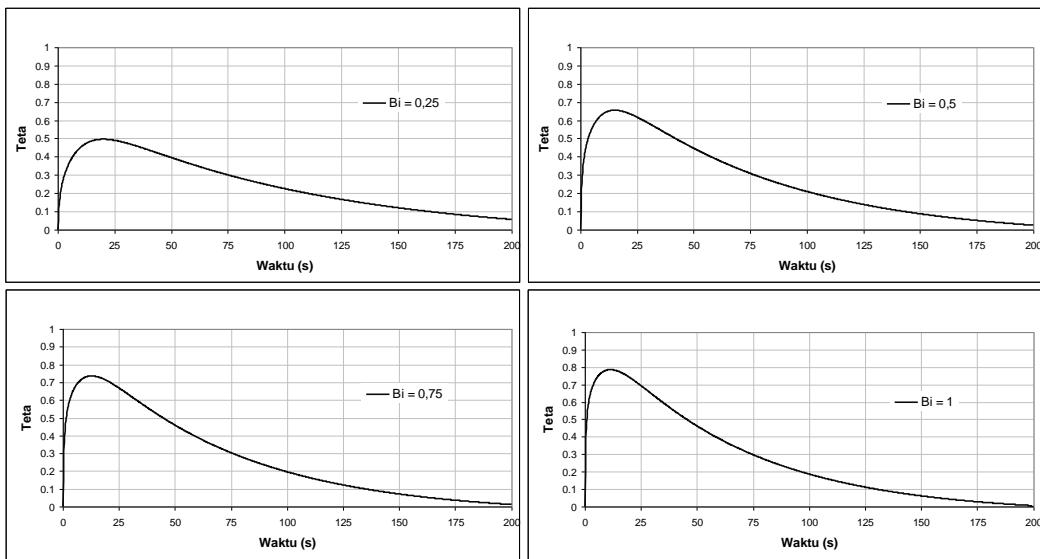
a.2. Nilai θ Dari Waktu Ke Waktu Untuk Berbagai Nilai Bi

Hasil perhitungan nilai θ dari waktu ke waktu untuk berbagai nilai Bi disajikan dalam grafik-grafik pada Gambar 5 sampai dengan Gambar 7.



Gambar 5: Nilai θ dari waktu ke waktu untuk $Bi \leq 0,01$



Gambar 6: Nilai θ dari waktu ke waktu untuk $0,01 \leq Bi \leq 0,1$ Gambar 7: Nilai θ dari waktu ke waktu untuk $Bi \geq 0,1$

b. Pembahasan

Berdasarkan hasil penelitian dan perhitungan yang didapat (Gambar 2-4), pola distribusi suhu pada benda bergantung pada nilai Bi . Semakin besar nilai Bi , pola distribusi suhu dari waktu ke waktu semakin tidak merata. Tidak merata berarti untuk waktu t tertentu yang diambil, harga suhu di setiap posisi pada benda berbangkit energi tidak seragam.

Pada nilai Bi rendah, pola distribusi suhu dari waktu ke waktu dapat dikatakan merata setiap saat. Artinya, misalnya untuk waktu $t = t_1$, suhu pada benda dapat dikatakan merata di setiap posisi titip pada benda berada pada harga suhu T_1 , pada saat t_2 suhu benda merata pada T_2 , pada saat t_3 suhu benda merata pada T_3 , pada saat t_4 suhu benda merata pada T_4 , dan seterusnya. Harga suhu T_1 tidak sama dengan T_2 , tidak sama dengan T_3 , dan juga tidak sama dengan T_4 . Suhu benda berubah dari waktu ke waktu, tetapi suhu pada waktu tertentu di setiap posisi benda berbangkit energi dapat dianggap merata/seragam.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, nilai Bi yang menghasilkan keadaan tersebut adalah pada nilai $Bi \leq 0,01$, dan nilai $\theta_{\max} = 0,040715971$. Semakin kecil nilai Bi dari $0,01$, pola distribusi suhu dari waktu ke waktu semakin merata.

4. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan:

- Semakin besar nilai Bi , pola distribusi suhu dari waktu ke waktu pada benda padat berbangkit energi kalor untuk kasus 1D semakin tidak merata.
- Pada nilai $Bi \leq 0,01$, dengan nilai q maksimum 10.000 W/m^3 , pola distribusi suhu dari waktu ke waktu pada benda padat berbangkit energi kalor untuk kasus 1D dapat dianggap seragam dengan nilai kesalahan $\theta_{\max} = 0,040715971$.

DAFTAR PUSTAKA

- Chung Yau Lam**, 1994. “*Applied Numerical Methods For Partial Differential Equation*”. Singapore : Prentice Hall
- Holman, JP.** 1984.”*Perpindahan Kalor*”, Jakarta : Penerbit Erlangga.
- Incropera, FP, dan Dewit, DP.** 1985. “*Introduction to Heat Transfer*”, New York : John Wiley & Son.
- Kreith, F. & Arko Prijono.** 1991. “*Prinsip Prinsip Perpindahan Panas*”. Jakarta : Penerbit Erlangga.
- Purwadi,PK.** 1999 “*Metode Beda Hingga Dalam Penyelesaian Persoalan Perpindahan Panas Konduksi Dua Dimensi Keadaan Tak Tunak*”, Sigma, Vol 3 No1, hal 67-79
- Purwadi, PK.** 2002, “*Pengaruh Bilangan Biot Terhadap Distribusi Suhu Pada Keadaan Tak Tunak Benda Padat 1D*”, Proseding Seminar UMS
- Purwadi, PK.** 2003, “*Distribusi Suhu Dari Waktu Ke Waktu Pada Benda Padat Satu Dimensi Dengan $K=K(T)$* ”, Sigma Vol. 8, No.1, Januari 2005.
- Wirawan, Made.** 2000. “*Modelisasi Perpindahan Kalor Konduksi pada Proses Perubahan Fasa (Pembekuan)*”. Thesis Pasca Sarjana. Yogyakarta : Teknik Mesin UGM.