

KOMPUTASI PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI DUA DIMENSI UNTUK KONVEKSI DAN RADIASI TERMAL

L. Buchori², Y. Bindar¹ dan Istadi²
Jurusan Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Bandung, 40132
E-mail : yazid@che.itb.ac.id

Abstrak

Paper ini bertujuan mempelajari efek kondisi batas kombinasi konveksi dan radiasi termal pada komputasi proses pendinginan slab baja dengan metode komputasi Volume Hingga. Metode komputasi ini diaplikasikan untuk menyelesaikan model perpindahan panas transien dua dimensi karena sulitnya penyelesaian secara analitis. Skim-skim diskritisasi seperti skim eksplisit, Crank-Nicholson, dan implisit penuh, akan diaplikasikan dan dibandingkan antara yang satu dengan yang lainnya. Kondisi-kondisi batas ini sangat mempengaruhi fluks panas yang melalui permukaan slab baja tersebut. Linierisasi suku sumber merupakan hal yang sangat penting pada komputasi ini terutama untuk persamaan-persamaan yang sangat non-linier seperti kondisi batas konveksi dan radiasi termal. Linierisasi suku sumber dengan metode Quasi-linierisasi merupakan metode yang sangat baik untuk mendapatkan prediksi penyelesaian persamaan yang lebih real secara fisik maupun matematis. Dalam paper ini, metode komputasi volume hingga telah berhasil diaplikasikan untuk menyelesaikan model persamaan perpindahan panas konduksi transien dua dimensi pada proses pendinginan slab baja, dengan kondisi batas kombinasi konveksi dan radiasi termal.

Kata kunci: *kondisi batas konveksi-radiasi, metode volume hingga, alternating direction implicit, quasi-linierization*

Pendahuluan

Proses pemanasan atau pendinginan untuk keperluan reaksi kimia atau untuk proses metalurgi dilangsungkan melalui tahap-tahap tertentu. Persyaratan proses terhadap hasil pemanasan atau pendinginan seperti keseragaman temperatur sangat menentukan kualitas produk dengan memperhatikan efek geometrinya. Secara umum, sebuah unit proses dikendalikan oleh hukum konservasi massa, momentum, dan energi. Hukum-hukum ini menggambarkan peristiwa-peristiwa perpindahan yang terjadi seperti perpindahan massa, perpindahan momentum dan energi. Persamaan-persamaan perpindahan ini dapat dituliskan dalam bentuk ketergantungannya pada ruang. Persamaan-persamaan ini biasanya dibentuk oleh suku transien, suku difusi dan suku generasi, dimana suku transien ditambah suku konveksi sama dengan suku difusi ditambah suku generasi. Dalam kasus pemanasan atau pendinginan suatu slab baja, suku yang terlibat dalam persamaan perpindahan adalah suku transien dan suku difusi (Bindar, 1998).

Perpindahan panas transien merupakan fenomena yang penting dalam proses pemanasan atau pendinginan slab baja atau lainnya di industri metalurgi. Dalam hal ini, ada 3 tipe perpindahan panas yang terjadi yaitu konduksi dalam slab baja, konveksi dan/atau radiasi dari permukaan baja ke sekeliling atau sebaliknya. Pada peristiwa pemanasan baja, panas dari sekeliling dipindahkan ke permukaan secara konveksi dan/atau radiasi termal kemudian secara konduksi dari permukaan ke bagian dalam slab baja tersebut. Fenomena yang sama terjadi pada peristiwa pendinginan baja panas dengan udara atau air pendingin. Konveksi dan radiasi termal sangat menentukan fluks panas yang melalui permukaan slab baja tersebut. Tipe perpindahan panas yang terjadi tergantung pada fenomena apa yang paling dominan, dapat secara radiasi termal murni atau konveksi murni atau bahkan kombinasi konveksi dan radiasi termal. Demikian juga, konveksi dapat berupa konveksi bebas (*free convection*) atau konveksi dipaksakan (*forced convection*) tergantung pada kondisi proses (Geankoplis, 1983).

Persoalan perpindahan panas transien pada slab baja menjadi non-linier jika sifat-sifat fisik bahan tergantung pada temperatur atau sumber panas yang dibangkitkan (fluks panas) di permukaan bahan merupakan fungsi non-linier terhadap temperatur. Studi tentang peristiwa pemanasan dan pendinginan plat

¹ Author to whom correspondence should be addressed

² **Afiliasi tetap:** Jurusan Teknik Kimia Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Sudarto, Semarang, Indonesia, 50239

baja dengan kondisi batas kombinasi konveksi dan radiasi telah dilakukan oleh peneliti terdahulu namun hanya untuk satu dimensi (Crosbie *et al.*, 1968) dengan menggunakan pendekatan persamaan integral Volterra non-linier. Davies (1985) mempelajari peristiwa pendinginan plat dengan kombinasi radiasi dan konveksi panas untuk satu dimensi dengan melakukan pengintegralan terhadap persamaan konduksi panas. Penyelesaian persoalan difusi panas transien satu dimensi juga telah dipelajari oleh Langford (1973) dengan metode *The Heat Balance Integral Method (THEBIM)*. Metode ini dapat digunakan untuk menyelesaikan persoalan linier dan non-linier satu dimensi yang melibatkan ketergantungan sifat-sifat fisik terhadap temperatur, kondisi batas non-linier, dan terjadi perubahan fasa. Yang (1991) mempelajari interaksi kombinasi konveksi dan radiasi termal dalam pipa vertikal, dan diperoleh bahwa bilangan Nusselt lokal yang semakin besar akan menaikkan efek *buoyancy* dan parameter radiasi-konduksi. Namun demikian, metode-metode tersebut sulit untuk diaplikasikan pada perpindahan panas dua dan tiga dimensi baik dengan kondisi batas linier maupun non-linier.

Paper ini bertujuan mempelajari aplikasi metode volume hingga untuk menyelesaikan peristiwa perpindahan panas dua dimensi pada proses pendinginan baja panas dengan kondisi batas kombinasi konveksi dan radiasi. Perbandingan antara skim implisit penuh, skim Crank-Nicolson, dan skim eksplisit juga dipelajari dalam studi ini.

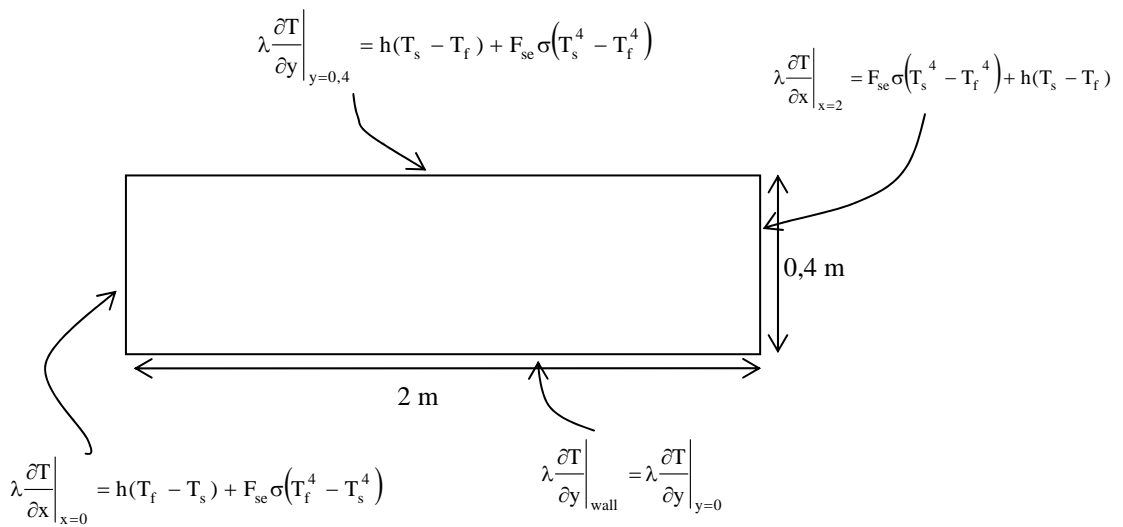
Kondisi-kondisi Batas Konveksi dan Radiasi.

Kondisi batas radiasi selalu bersifat non-linier, sedangkan kondisi batas konveksi bersifat linier jika koefisien perpindahan panas konveksi dan temperatur sekeliling tetap. Bila koefisien perpindahan panas konveksi merupakan fungsi temperatur, maka kondisi-kondisi batas baik radiasi maupun konveksi bersifat non-linier. Crosbie *et al.* (1968) mengusulkan penyelesaian analitis perpindahan panas transien satu dimensi dengan kondisi batas tipe nomor 6 pada Tabel 1, tetapi faktor perubahan radiatif (*radiative exchange factor*) F_{se} dan koefisien perpindahan panas konveksi h konstan terhadap temperatur dan waktu. Penyelesaian analitis ini hanya terbatas untuk persoalan yang sederhana saja, seperti: persoalan untuk satu dimensi, tipe kondisi batas yang sederhana atau linier, sifat-sifat fisik termal konstan, dan lain-lain. Oleh karena itu, untuk persoalan-persoalan yang lebih kompleks sifatnya dan/atau dua atau tiga dimensi, penyelesaian secara numerik (terutama metode volume hingga) merupakan cara penyelesaian yang lebih baik dengan adanya perangkat komputer yang semakin canggih dan kemampuan komputasi yang lebih bagus.

Tabel 1. Tabel fluks panas untuk berbagai tipe kondisi batas

| Kondisi Batas | | Fluks Panas pada Kondisi Batas |
|---------------|---|--|
| No | Tipe | |
| 1 | Konveksi dipaksakan (<i>forced convection</i>) | $h(T_s, t)[T_s - T_f(t)]$ |
| 2 | Konveksi bebas (<i>free convection</i>) | $\frac{h_{max}}{(\Delta T_{max})^{1/4}} [T_s - T_f(t)]^{3/4} [T_s - T_f(t)]$ |
| 3 | Radiasi termal | $F_{se}(T_s, t)\sigma [T_s^4 - T_f^4(t)]$ |
| 4 | Radiasi termal dengan variasi temperatur lingkungan secara sinusoidal dengan F_{se} konstan | $F_{se}\sigma [T_s^4 - T_f^4(1 + a \sin \omega t)^4]$ |
| 5 | Radiasi termal, F_{se} dan temperatur lingkungan konstan | $F_{se}\sigma [T_s^4 - T_f^4(t)]$ |
| 6 | Kombinasi radiasi termal dan konveksi dipaksakan | $F_{se}(T_s, t)\sigma [T_s^4 - T_f^4(t)] + h(T_s, t)[T_s - T_f(t)]$ |
| 7 | Kombinasi radiasi termal dan konveksi bebas laminar | $F_{se}(T_s, t)\sigma [T_s^4 - T_f^4(t)] + \frac{h_{max}}{(\Delta T_{max})^{1/4}} [T_s - T_f(t)]^{3/4} [T_s - T_f(t)]$ |

Distribusi temperatur mula-mula pada slab baja tersebut adalah : $T(x, y) = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ pada $t=0$. Fluks panas pada kondisi batas untuk berbagai tipe kondisi batas diberikan pada Tabel 1. Kondisi-kondisi batas di permukaan slab dapat dilihat pada Gambar 1.

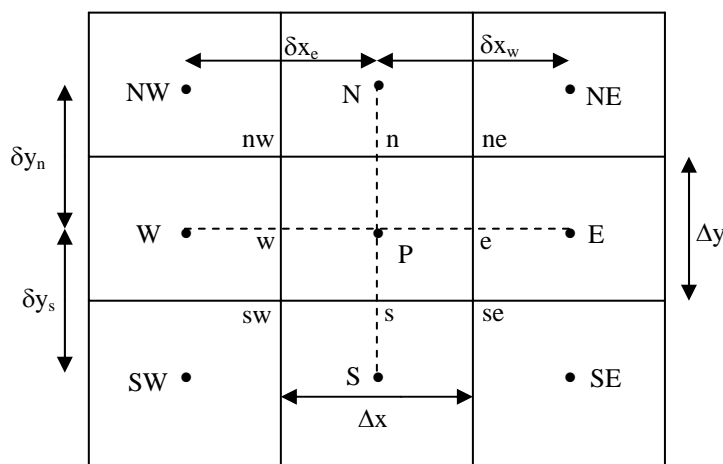


Gambar 1. Kondisi-kondisi batas pada slab baja

Linierisasi terhadap persamaan-persamaan kondisi batas harus dilakukan untuk jenis persamaan-persamaan yang non-linier pada metode komputasi numerik. Cara linierisasi yang tidak tepat, dapat menimbulkan penyimpangan antara temperatur terhitung dengan penyelesaian eksaknya terutama untuk temperatur-temperatur yang lebih tinggi (Crosbie *et al.*, 1968).

Metode Komputasi Volume Hingga

Persoalan yang diselesaikan dalam makalah ini adalah peristiwa pendinginan slab baja panas berbentuk balok atau plat secara transien. Temperatur slab mula-mula adalah 1200 °C (serba sama pada $t=0$). Tinggi slab baja adalah 0,4 m, lebarnya 2 m dan dianggap slab panjang sekali sehingga peristiwa perpindahan yang terjadi dapat dianggap dua dimensi. Sisi kiri, atas dan kanan dikontakkan dengan udara sekeliling bertemperatur 25 °C dan perpindahan panas yang terjadi antara udara dan permukaan slab terjadi secara konveksi dan radiasi termal. Baja diletakkan di atas beton sehingga permukaan bawah slab baja tersebut berhubungan dengan beton.



Gambar 2. Notasi kisi skim numerik untuk metode volume hingga

Beberapa asumsi yang digunakan untuk penyelesaian kasus ini adalah :

1. Peristiwa perpindahan panas konduksi hanya dua dimensi saja (arah x dan y saja).
2. Sifat-sifat fisis dan termal baja homogen atau serba sama.
3. Sifat-sifat fisik seperti: densitas, panas jenis tidak tergantung pada temperatur, sedangkan konduktivitas termal tergantung pada temperatur dengan persamaan :
 $\lambda = (42,9 - 0,01 T) \text{ W/m.K}$
4. Temperatur lingkungan (T_e) atau fluida (T_f) konstan (bukan fungsi waktu).

5. Koefisien perpindahan panas konveksi h tidak tergantung pada temperatur fluida
6. Tidak terjadi pembangkitan panas atau reaksi kimia di dalam slab baja.
7. Udara lingkungan di sisi kondisi batas radiasi bersifat transparan terhadap radiasi.

Persamaan diferensial parsial untuk menyatakan perpindahan panas pada slab baja transien dua dimensi tersebut adalah :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (1)$$

Notasi kisi untuk skem numerik dapat digambarkan pada Gambar 2.

Metode volume hingga diaplikasikan pada persamaan dengan pendekatan integral terhadap persamaan tersebut. Integrasi persamaan (1) di antara titik-titik antarmuka tetangganya dalam volume atur adalah :

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^w \int_s^s \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dy dx dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^w \int_s^s \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dy dx dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^w \int_s^s \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy dx dt \quad (2)$$

Hasil integrasi dan pendekatan terhadap turunannya adalah :

$$\begin{aligned} \rho C_p (T_P' - T_P^o) \Delta y \Delta x = \Delta y \Delta t \left[f \left\{ \frac{\lambda_e (T_E' - T_P')}{(\delta x)_e} - \frac{\lambda_w (T_P' - T_W')}{(\delta x)_w} \right\} + (1-f) \left\{ \frac{\lambda_e (T_E^o - T_P^o)}{(\delta x)_e} - \frac{\lambda_w (T_P^o - T_W^o)}{(\delta x)_w} \right\} \right] \\ + \Delta x \Delta t \left[f \left\{ \frac{\lambda_n (T_N' - T_P')}{(\delta y)_n} - \frac{\lambda_s (T_P' - T_S')}{(\delta y)_s} \right\} + (1-f) \left\{ \frac{\lambda_n (T_N^o - T_P^o)}{(\delta y)_n} - \frac{\lambda_s (T_P^o - T_S^o)}{(\delta y)_s} \right\} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

dimana f adalah faktor pemberat (*weighting factor*). Jika $f=0$ berarti menggunakan skem eksplisit, jika $f=0,5$ berarti menggunakan skem Crank-Nicolson, jika $f=1$ berarti menggunakan skem implisit penuh (*fully implicit*). Jika persamaan dibagi dengan Δt dan disusun sedemikian rupa sehingga akan diperoleh persamaan aljabar berikut:

$$\begin{aligned} a_P(i, j) T_P'(i, j) = a_E(i, j) T_E'(i+1, j) + a_W(i, j) T_W'(i-1, j) + a_N(i, j) T_N'(i, j+1) \\ + a_S(i, j) T_S'(i, j-1) + b(i, j) \end{aligned} \quad (4)$$

dengan :

$$\begin{aligned} a_E(i, j) &= \frac{\lambda_e(i, j) \Delta y f}{(\delta x)_e} & a_W(i, j) &= \frac{\lambda_w(i, j) \Delta y f}{(\delta x)_w} \\ a_N(i, j) &= \frac{\lambda_n(i, j) \Delta x f}{(\delta y)_n} & a_S(i, j) &= \frac{\lambda_s(i, j) \Delta x f}{(\delta y)_s} \\ a^o_P(i, j) &= \frac{\rho C_p \Delta x \Delta y}{\Delta t} & a_P(i, j) &= a_E(i, j) + a_W(i, j) + a_N(i, j) + a_S(i, j) + a^o_P(i, j) \\ b(i, j) &= \frac{\lambda_e(i, j) \Delta y (1-f)}{(\delta x)_e} T_E^o + \frac{\lambda_w(i, j) \Delta y (1-f)}{(\delta x)_w} T_W^o + \frac{\lambda_n(i, j) \Delta x (1-f)}{(\delta y)_n} T_N^o + \frac{\lambda_s(i, j) \Delta x (1-f)}{(\delta y)_s} T_S^o \\ &+ \left[\frac{\rho C_p \Delta x \Delta y}{\Delta t} - \frac{\lambda_e(i, j) \Delta y (1-f)}{(\delta x)_e} - \frac{\lambda_w(i, j) \Delta y (1-f)}{(\delta x)_w} - \frac{\lambda_n(i, j) \Delta x (1-f)}{(\delta y)_n} - \frac{\lambda_s(i, j) \Delta x (1-f)}{(\delta y)_s} \right] T_P^o \end{aligned}$$

Sistem persamaan aljabar linier tersebut dapat diselesaikan menggunakan algoritma *Alternating Direction Implicit (ADI)* dengan cara *Line by Line Method (LLM)*. Sapuan-sapuan ke arah sumbu x selanjutnya disebut prosedur *XLINES*, sedangkan sapuan-sapuan ke arah sumbu y selanjutnya disebut prosedur *YLINES*. Persamaan aljabar untuk prosedur *XLINES* menjadi :

$$a_P(i, j) T_P'(i, j) = a_E(i, j) T_E'(i+1, j) + a_W(i, j) T_W'(i-1, j) + b'(i, j) \quad (5)$$

dimana $b'(i, j) = a_N(i, j) T_N'(i, j+1) + a_S(i, j) T_S'(i, j-1) + b(i, j)$. Perhitungan dilakukan untuk $i=1$ sampai $i=I_{max}$ yang bergerak dari $j=1$ sampai $j=J_{max}$. Persamaan aljabar untuk prosedur *YLINES* menjadi :

$$a_p(i, j) T_p'(i, j) = a_N(i, j) T_N'(i, j+1) + a_S(i, j) T_S'(i, j-1) + b'(i, j) \quad (6)$$

dimana $b'(i, j) = a_E(i, j) T_E'(i+1, j) + a_W(i, j) T_W'(i-1, j) + b(i, j)$. Perhitungan dilakukan untuk $j=1$ sampai $j=J_{max}$ yang bergerak dari $i=1$ sampai $i=I_{max}$. Sistem persamaan aljabar linier yang terbentuk untuk masing-masing prosedur (XLINES dan YLINES), secara umum dapat dinyatakan dalam bentuk matriks tridiagonal yang selanjutnya dapat diselesaikan dengan algoritma Thomas atau algoritma TDMA (*tridiagonal matrix*).

Persamaan aljabar untuk kondisi batas dituliskan dalam bentuk :

$$\left(\frac{\lambda_{Im} \Delta y}{(\delta x_w)_{Im}} + h_f \Delta y \right) T(Im \text{ ax}, j) = \frac{\lambda_{Im} \Delta y}{(\delta x_w)_{Im}} T(Im \text{ ax} - 1, j) + h_f T_f \Delta y + \Delta y \varepsilon \sigma T_f^4 - \Delta y \varepsilon \sigma T(Im \text{ ax}, j)^4 \quad (7)$$

Dalam hal ini, sebagai suku sumber adalah : $b'(Im \text{ ax}, j) = \Delta y h_f T_f + \Delta y \varepsilon \sigma T_f^4 - \Delta y \varepsilon \sigma T(Im \text{ ax}, j)^4$.

Linierisasi terhadap suku sumber dapat dilakukan beberapa cara, namun cara yang paling baik dan direkomendasikan adalah dengan metode quasi-linierisasi. Jika suku sumber dinyatakan dengan $S = S_c + S_p T_p$, maka :

$$S = S^o + \left(\frac{dS}{dT} \right)^o (T_p - T_p^o) \quad (8)$$

sehingga persamaan aljabar pada kondisi batas tersebut adalah:

$$a_p(Im \text{ ax}, j) T_p'(Im \text{ ax}, j) = a_w(Im \text{ ax}, j) T_w'(Im \text{ ax} - 1, j) + b'(Im \text{ ax}, j) \quad (9)$$

dengan :

$$a_p(Im \text{ ax}, j) = \frac{\lambda_{Im} \Delta y}{(\delta x_w)_{Im}} + h_f \Delta y + 4 \Delta y \varepsilon \sigma T_p^o(Im \text{ ax}, j)^3 ; \quad a_w(Im \text{ ax}, j) = \frac{\lambda_{Im} \Delta y}{(\delta x_w)_{Im}}$$

$$\text{dan } b'(Im \text{ ax}, j) = h_f T_f \Delta y + \Delta y \varepsilon \sigma T_f^4 + 3 \Delta y \varepsilon \sigma T_p^o(Im \text{ ax}, j)^4$$

Dari ketiga cara linierisasi tersebut, metode (a) dan (b) merupakan metode pendekatan yang kurang bagus dengan memanfaatkan ketergantungan suku sumber terhadap temperatur, sedangkan metode quasi-linierisasi (c) merupakan cara yang direkomendasikan. Pada kenyataannya, metode linierisasi (a) dan (b) akan menghasilkan distribusi temperatur yang tidak realistis, hal ini ditandai dengan adanya nilai temperatur yang negatif pada saat-saat awal proses, sedangkan metode linierisasi (c) akan menghasilkan distribusi temperatur yang lebih realistis secara fisik. Dengan cara yang sama pula dilakukan untuk kondisi-kondisi batas $x=0$ dan $y=0,4$.

Persamaan aljabar untuk kondisi batas $y=0$ (berimpit dengan lantai beton) dapat didiskretisasikan sebagai berikut :

$$\frac{\lambda_{wall} \Delta x (T_{wall} - T(i,1))}{\Delta y_{wall}} = \frac{\lambda_{Jm} \Delta x (T(i,1) - T(i,2))}{(\delta y_n)_{Jm}} \quad (10)$$

J_m adalah antar muka *half control volume* pada $j=1$.

Persamaan (10) tersebut disusun sedemikian rupa sehingga diperoleh persamaan aljabar sebagai berikut :

$$a_p(i,1) T_p'(i,1) = a_N(i,1) T_N'(i,2) + b'(i,1) \quad (11)$$

dengan :

$$a_p(i,1) = \frac{\lambda_{Jm} \Delta x}{(\delta y_n)_{Jm}} + \frac{\lambda_{wall} \Delta x}{\Delta y_{wall}} ; \quad a_N(i,1) = \frac{\lambda_{Jm} \Delta x}{(\delta y_n)_{Jm}} ; \quad \text{dan } b'(i,1) = \frac{\lambda_{wall} \Delta x}{\Delta y_{wall}} T_{wall}$$

Algoritma komputasi untuk perhitungan kasus perpindahan panas konduksi transien dua dimensi ini dapat dituliskan sebagai berikut :

1. Mulai
2. Baca data-data : $\rho, C_p, \lambda, \Delta t, \Delta x, \Delta y, f$
3. Baca data : T_o
4. Set Time=0
5. Time=Time + Δt

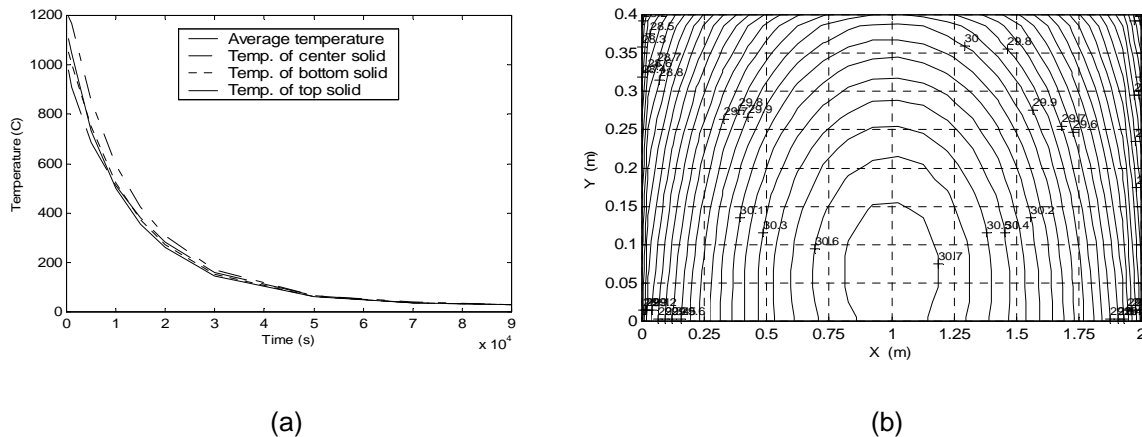
6. Selesaikan persamaan aljabar untuk prosedur XLINES, lakukan untuk $j=1$ sampai $j=J_{max}$ dengan algoritma TDMA
7. Selesaikan persamaan aljabar untuk prosedur YLINES, lakukan untuk $i=1$ sampai $i=I_{max}$ dengan algoritma TDMA
8. Cek apakah ($Time \leq$ waktu akhir). Jika Ya maka update nilai temperatur kemudian kembali ke langkah (5), jika Tidak ke langkah (9).
9. Cetak Distribusi Temperatur.
10. Selesai

Hasil dan Diskusi

Dari ketiga cara linierisasi seperti yang telah dijelaskan di atas, ternyata metode linierisasi (a) dan (b) merupakan metode pendekatan yang kurang bagus (memanfaatkan ketergantungan suhu sumber terhadap temperatur), sedangkan metode linierisasi (c) atau metode quasi-linierisasi merupakan metode yang lebih baik dan merupakan metode yang direkomendasikan untuk digunakan. Jika suhu sumber berbentuk

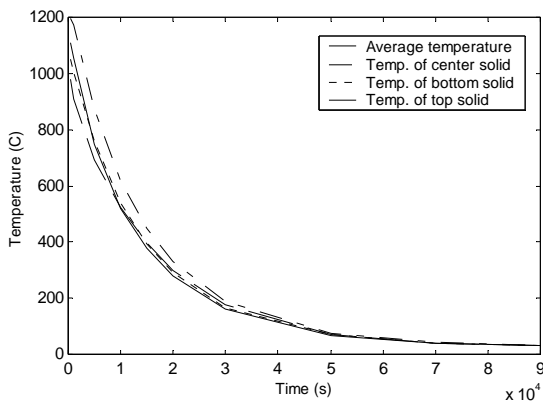
$S = S_c + S_p T_p$, maka linierisasi dilakukan dengan cara $S = S^o + \left(\frac{dS}{dt}\right)^o (T_p - T_p^o)$. Pada kenyataannya,

metode linierisasi (a) dan (b) akan menghasilkan distribusi temperatur yang tidak realistis, hal ini ditandai dengan adanya nilai temperatur yang negatif pada saat-saat awal proses, sedangkan metode linierisasi (c) akan menghasilkan distribusi temperatur yang lebih realistis.

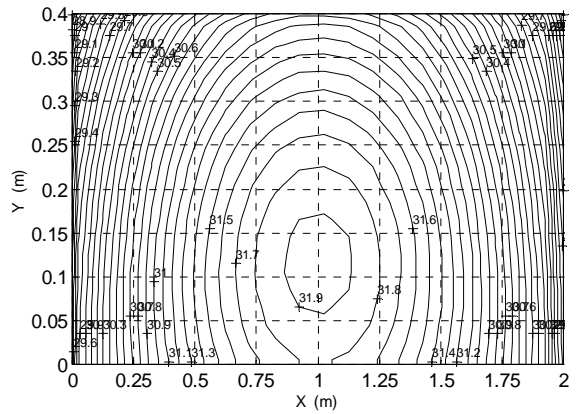


Gambar 3. Profil distribusi temperatur dengan skim numerik Eksplisit; (a) profil temperatur terhadap waktu; (b) profil contour distribusi temperatur

Hasil simulasi distribusi temperatur pada waktu-waktu tertentu dapat dilihat pada Gambar 3 sampai dengan Gambar 7. Dari gambar tersebut terlihat bahwa semakin lama waktu pendinginan maka temperatur slab baja makin turun. Penurunan temperatur yang lebih tajam terlihat pada $x=0$, $x=2$ dan $y=0,4$ dibandingkan pada permukaan slab baja bagian bawah, karena perpindahan panas yang terjadi pada sisi ini adalah kombinasi perpindahan panas konveksi dan radiasi termal, sehingga lebih cepat proses perpindahan panasnya. Hal ini ditandai dengan lebih rendahnya temperatur pada sisi-sisi tersebut dibandingkan pada sisi bagian bawah. Temperatur paling tinggi terlihat di dekat bagian bawah slab. Dari grafik-grafik tersebut, terlihat ada sedikit perbedaan hasil distribusi temperatur untuk ketiga metode skim numerik tersebut (eksplisit, Crank-Nicolson, dan implisit penuh).

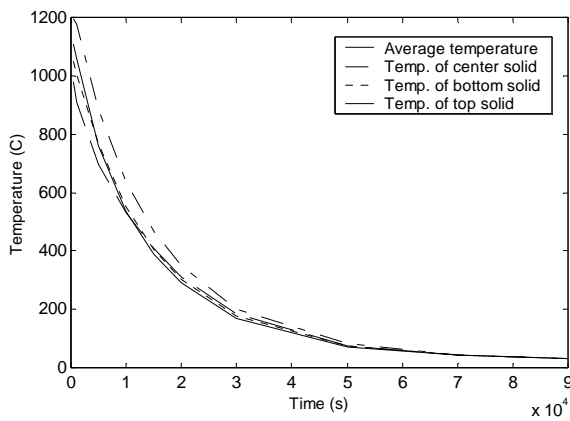


(a)

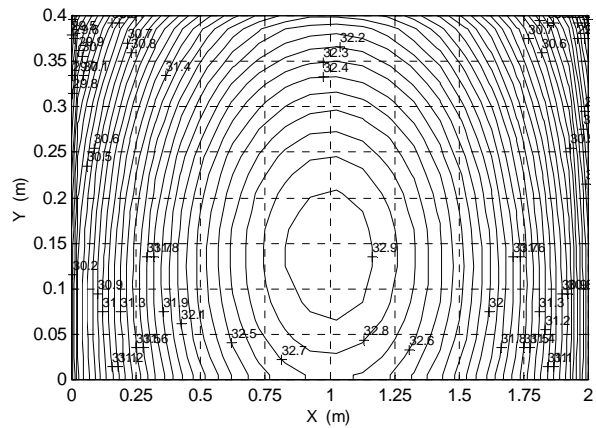


(b)

Gambar 4. Profil distribusi temperatur dengan skem numerik Crank-Nicolson; (a) profil temperatur terhadap waktu; (b) profil contour distribusi temperatur

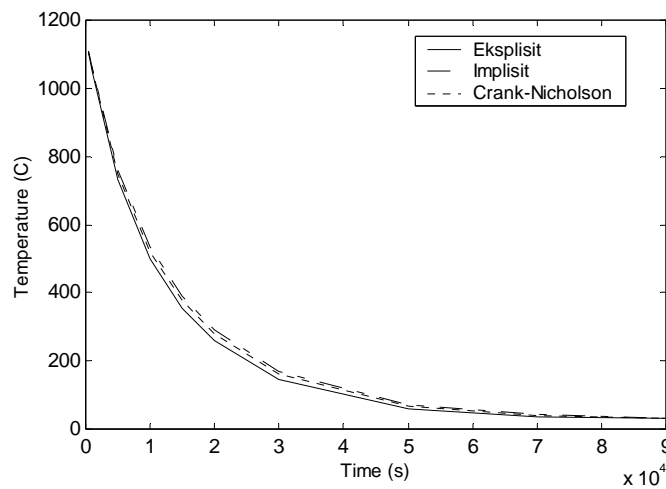


(a)

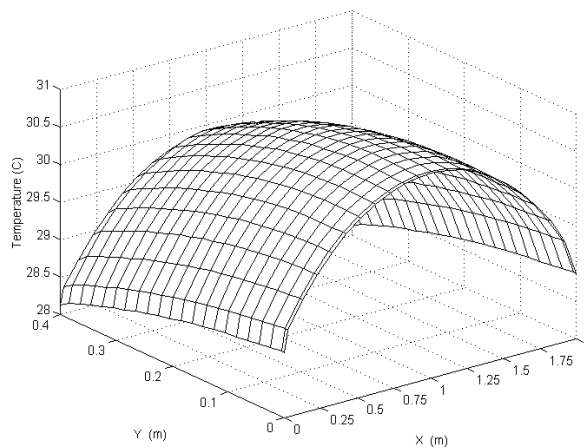


(b)

Gambar 5. Profil distribusi temperatur dengan skem numerik Implisit penuh; (a) profil temperatur terhadap waktu; (b) profil contour distribusi temperatur



Gambar 6. Perbandingan profil temperatur rata-rata terhadap waktu untuk skem numerik Eksplisit, Crank-Nicolson, dan Implisit penuh



Gambar 7. Profil mesh distribusi temperatur dalam bahan baja setelah pendinginan 90000 detik

Kesimpulan

Metode komputasi volume hingga (*Finite Volume*) merupakan metode komputasi yang tangguh untuk menyelesaikan persoalan-persoalan perpindahan panas transien baik satu dimensi, dua dimensi, bahkan tiga dimensi. Pada kasus-kasus tertentu dengan bentuk geometri yang bagaimanapun, metode ini tetap lebih tangguh.

Pada kasus-kasus yang melibatkan kondisi-kondisi batas radiasi termal atau kombinasi konveksi dan radiasi termal, maka pemilihan metode linierisasi suku sumber pada persamaan aljabar kondisi batas sangat menentukan realitas dari hasil simulasi. Dalam hal ini, metode linierisasi (c) atau metode quasi-linierisasi merupakan metode yang direkomendasikan untuk digunakan, karena menghasilkan profil temperatur yang lebih realistis.

Daftar Pustaka

- [1] Bindar, Y., 1998, *Pemodelan Numerik Fenomena Tiga Dimensi Aliran Fluida, Reaksi Kimia, Perpindahan Panas, dan Massa Secara Simultan*, *Proceeding Seminar Sehari Aplikasi Metoda Numerik Dalam Rekayasa*, Bandung, hal. 24-41.
- [2] Crosbie, A.L. dan Viskanta, R., 1968, Transient Heating or Cooling of a Plate by Combined Convection and Radiation, *Int. J. Heat & Mass Transfer*, Vol. 11, hal 305-317.
- [3] Crosbie, A.L., 1966, Transient Heating or Cooling of One Dimensional Solids Subjected to Non-linear Boundary Conditions, MSc Thesis, Purdue University.
- [4] Davies, T.W., 1985, The Cooling of A Plate By Combined Thermal Radiation and Convection, *Int. Comm. Heat & Mass Transfer*, Vol. 12, hal 405-415.
- [5] Finlayson, B.A., 1980, *Nonlinear Analysis in Chemical Engineering*, Mc Graw Hill Book Co., Inc., USA
- [6] Geankoplis, C.J., 1987, *Transport Processes and Unit Operations*, 2nd ed., Allyn and Bacon, Inc.
- [7] Hoffmann, K.A., dan Chiang, S.T., 1993, *Computational Fluid Dynamic for Engineers*, Vol. I, Engineering Education System, Wichita, USA
- [8] Langford, D., 1973, The Heat Balance Integral Method, *Int. J. Heat & Mass Transfer*, Vol. 16, hal 2424-2428.
- [9] Patankar, S.V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, New York.
- [10] Yang, L.K., 1991, Combined Mixed Convection and Radiation in A Vertical Pipe, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 18, hal. 419-430.