PEMODELAN ALIRAN BAHANG TRIMATRA UNTUK MERAMALKAN LOKASI CACAT PENYUSUTAN PADA BENDA COR DENGAN METODE BEDA HINGGA

Oleh

Waspodo^{*)}, Dani Ramdani^{**)}, Zulfan Mirza^{***)}

INTISARI

Permodelan aliran bahang tri matra di dalam benda cor digunakan sebagai alat bantu untuk meramalkan lokasi terbentuknya cacat penyusutan. Dasar perhitungan dari permodelan ini adalah persamaan perpindahan (model makro), dengan meninjau mekanisme perpindahan bahang secara konduksi, konveksi, dan radiasi. Metode Beda Hingga digunakan untuk mencacah persamaan perpindahan bahang yang kontinyu. Untuk menentukan batas-batas pengintegralan di dalam jala-jala pencacahan, digunakan Metode Titik Simpul Dalam. Metode Eksplisit Langsung dipakai untuk menyelesaikan persamaan beda hingga. Data hasil perhitungan akan membentuk daerah yang memiliki suhu yang sama (garis isotermal) yang menunjukkan lokasi unit set membeku paling akhir (hot spot). Terbentuknya cacat penyusutan diramalkan terbentuk pada daerah ini, apabila tidak ada lelehan logam di sekitarnya yang mengimbangi penyusutan. Selanjutnya juga diperlihatkan lokasi cacat secara tri matra dimana seolah-olah daerah cacat berbentuk seperti bola. Daerah cacat terdapat pada lempeng kelima hingga lempeng ketujuh dengan daerah terbesar pada lempeng keenam. Sedangkan model fisik yang digunakan adalah bahan aluminium murni dan cetakan pasir basah (green sand mold) dengan pasir silika sebagai bahan cetakannya.

Kata kunci - kata kunci : pemodelan, penyusutan, metode beda hingga.

ABSTRACT

A model is used to calculate the transfer of three dimension heat inside a casting product in order to forecast the location of shrinkage defects. The calculation is based on the equation of transfer (macro model), considering the transfer mechanism of heat by its conduction, convection, and radiation. Finite difference method is used to calculate continuous heat transfer, whereas nodal points method is used to determine integrated limits on counting net, and an explicit method is used to determine integrated limits on counting net, and an explicit method is used to accomplish the finite difference method. The result of heat transfer calculation shows the area of the same heat (isothermal line) which indicates the location of the last frozen cells. It is forecasted that this area has a possibility of shrinkage defect, if there is no metal flows around it to counter the shrinkage. Furthermore, it shows three dimension shrinkage location which forms a round location of shrinkage. Defected areas exist on the fifth up to the seventh slices, the biggest area exists on the sixth. Material used for this model is pure aluminium and green sand mould using silica sand.

Keywords : modeling, shrinkage, finite difference method.

I. LATAR BELAKANG MASALAH

Dalam upaya menghasilkan produk pengecoran yang bebas cacat, perlu dilakukan pengendalian proses yang semakin baik. Pengendalian proses pembekuan memiliki peranan yang sangat penting dalam proses pengecoran mengingat berbagai cacat dapat muncul pada tahap ini.

Dari keseluruhan tahap proses pengecoran, tahap pembekuan logam di dalam rongga cetakan merupakan tahap yang paling kritis mengingat peluang terbentuknya cacat pengecoran dapat berupa cacat penyusutan, seperti cacat penyusutan luar, cacat penyusutan dalam, *discrete porosity*, *sink*, dan *surface puncture*.

Untuk meramalkan distribusi cacat penyusutan diperoleh dengan mengamati perubahan suhu selama proses pembekuan. Hal ini dikarenakan bahwa proses pembekuan sangat erat hubungannya dengan peristiwa perpindahan bahang dari lelehan logam yang memiliki suhu tinggi ke cetakan dan ke udara yang bersuhu lebih rendah. Pengukuran perubahan suhu tersebut pada setiap saat cukup sulit dilakukan di lapangan, apalagi bila harus mengamati perubahan tersebut pada bentuk benda cor yang kompleks⁽¹⁾. Untuk mengatasi hal tersebut, dilakukan pendekatan pengukuran perubahan suhu dengan menggunakan persamaan perpindahan bahang⁽²¹⁾.

Persamaan perpindahan bahang meliputi gabungan model makro dan mikro yang masing-masing memiliki pengertian sebagai berikut; Model mikro yaitu model yang secara khusus meninjau proses pelepasan bahang laten selama pembekuan logam dengan menggunakan persamaan kinetika pembekuan. Persamaan ini sering dikembangkan, agar dapat digunakan bersama-sama dengan model makro untuk lebih mendekati keadaan sebenarnya. Model makro adalah model yang hanya meninjau masalah perpindahan bahang dari lelehan logam ke cetakan dan ke udara tanpa melibatkan bahang laten^(7,16).

Persamaan perpindahan bahang memiliki hubungan yang erat dengan persamaan fraksi padatan⁽²¹⁾. Hubungan tersebut adalah pada suhu yang diperoleh dari penyelesaian model makro dapat langsung diterjemahkan menjadi paras fraksi padatan untuk melihat kemajuan dari pembekuan lelehan logam di dalam benda cor (*progress of Solidification*).

Untuk menyelesaikan persoalan perpindahan bahang digunakan metoda penyelesaian numerik yang pada prinsipnya mengubah persamaan perpindahan bahang yang kontinu menjadi persamaan tercacah. Metode numerik yang digunakan adalah Metode Beda Hingga (*Finite Difference Method*). Metode ini menggunakan titik-titik simpul untuk mencacah suatu daerah yang ditinjau.

Menurut lokasi dari sisi-sisi volume banding terhadap titik simpulnya, Metode Beda Hingga dapat dibagi menjadi dua kelompok, yakni Metode Titik Simpul Luar (*Outer Nodal Point Method*) dan Metode Titik Simpul Dalam (*Inner Nodal Point Method*)^(12,13). Pada Metode Titik Simpul Luar, sisi-sisi keenam volume banding digambarkan mengitari titik simpul yang berdekatan. Metode inilah yang umumnya digunakan dalam menurunkan persamaan beda hingga.

Pada Metode Titik Simpul Dalam, titik-titik simpul digambarkan pada bagian tengah dari masing-masing volume bandingnya yang selanjutnya disebut sebagai gel. Kedua cara di atas akan memberikan hasil yang sama untuk ukuran volume banding yang sama (jala-jala seragam), tetapi akan tidak sama bila ukurannya berbeda (jala-jala tidak seragam).

Metode Titik Simpul Dalam memiliki beberapa keuntungan dibanding Metode Titik Simpul Luar⁽¹³⁾. **Keuntungan pertama** adalah hasil yang lebih akurat; karena letak titik simpulnya tepat berada ditengah-tengah volume banding. Akibatnya hasil perhitungan suhu pada titik tersebut akan mewakili di seluruh bagian volume bandingnya. **Keuntungan kedua** adalah dapat mengatasi masalah pencacahan pada sistem heterogen (komposit) dan batas tak sinambung; dengan cara meletakkan sisi-sisi volume banding di mana terjadi perubahan fisik material dan batas yang tidak sinambung. Hal ini dimaksudkan untuk menghindari adanya ketidaksinambungan sifat fisik di dalam sebuah volume banding yang ditinjau. **Keuntungan ketiga** adalah persamaan beda hingga ini berlaku umum di seluruh titik-titik simpulnya, baik pada sel batas maupun sel tengah.

Untuk penurunan persamaan beda hingga dari persamaan diferensial dapat dilakukan dengan dua cara. Cara yang pertama ialah mencacah persamaan diferensial dengan Deret *Taylor*, dan yang kedua dengan mengintegrasikan persamaan tersebut ke seluruh volume bandingnya. Umumnya digunakan cara pertama, tetapi dengan cara kedua dapat lebih menjelaskan kondisi fisik jala-jala pencacahan dengan baik⁽¹²⁾.

Bila meninjau kondisi tak tunak, terdapat dua bentuk persamaan beda hingga, yakni implisit (beda mundur) dan eksplisit (beda maju)^(8,11,12,13). Bentuk implisit berarti bahwa penentuan suhu di waktu sekarang ditentukan oleh suhu pada waktu yang akan datang. Metode yang biasa digunakan dalam hal ini adalah Metode Matriks atau Iterasi. Sedangkan bentuk eksplisit menyatakan bahwa penentuan suhu pada waktu yang akan datang ditentukan oleh waktu sebelumnya. Bentuk eksplisit ini merupakan perhitungan dari satu tahapan waktu (*time step*) ke tahapan waktu berikutnya secara langsung. Cara ini sering disebut Metode Eksplisit Langsung^(11,13). Di dalam metode ini diperlukan juga persamaan stabilitas perhitungan untuk menjaga ketelitian hasil perhitungan komputer.

Semenjak terjadinya kemajuan yang sangat pesat dalam dunia perangkat keras komputer, di mana kecepatan pemrosesan data yang makin besar, memungkinkan metode penyelesaian numerik makin berkembang dan banyak dipakai untuk menghitung persamaan tercacah yang lebih kompleks. Dengan bermodalkan kemampuan pengolahan data, metode numerik digunakan dalam penelitian ini untuk menyelesaikan masalah perpindahan bahang di dalam benda cor.

II. LANDASAN TEORI

Penyusunan program aliran bahang di dalam benda cor didasarkan pada persamaan perpindahan bahang (model makro). Persamaan tersebut lalu dicacah dengan metode numerik agar menjadi persamaan beda hingga.

2.1. Persamaan Dasar

Persamaan dasar perpindahan bahang dengan model makro adalah persamaan energi yang berdasarkan pada hukum kekekalan energi. Persamaan energi tri-matra untuk kondisi tak tunak dengan mekanisme perpindahan secara konduksi, dan mengabaikan kecepatan aliran fluida (konveksi) serta laju generasi dapat dituliskan :

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

di mana k adalah konduktivitas termal, sedangkan T adalah suhu. Rapat jenis (ρ) dan panas jenis (C_p) diandaikan tetap dalam perhitungan ini. Untuk menurunkan persamaan beda hingga dari persamaan (1), perlu diperhatikan kelompok titik simpul seperti dalam **gambar 1**. Perhatikan, titik simpul P memiliki enam titik simpul tetangga, yaitu titik simpul W dan E dalam arah sumbu X , titik simpul S dan N dalam arah sumbu Y , serta titik simpul T dan B dalam arah sumbu Z . Keenam sisi volume banding diberi notasi $w, e, s, n, t,$ dan b ; sehingga besarnya volume banding dalam gambar tersebut adalah $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$.

Gambar 1. Sketsa tri matra keenam volume banding pada jala-jala pencacahan⁽⁷⁾

Bila meninjau kondisi tak tunak, penyelesaian persamaan tersebut diatas akan diperoleh sejalan dengan waktu yang dimulai dari distribusi suhu awal yang diberikan. Dengan diberikan nilai-nilai T di setiap titik simpul pada waktu t , maka dapat diperoleh nilai T pada waktu $t+\Delta t$. Nilai yang lama pada titik simpul akan ditulis dengan notasi $T_P^0, T_W^0, T_E^0, T_S^0, T_N^0, T_T^0$ dan T_B^0 , serta nilai yang baru pada waktu $t+\Delta t$ dengan $T_P^1, T_W^1, T_E^1, T_S^1, T_N^1, T_T^1$ dan T_B^1 .

2.2 Persamaan Beda Hingga

2.2.1. Persamaan Suhu

Pencacahan persamaan energi dilakukan dengan cara mengintegrasikan persamaan (1) ke seluruh volume bandingnya dengan batas pengintegralnya seperti dalam gambar 1, dan keseluruhan selang waktu tertentu dari t hingga $t+\Delta t$.

Untuk menyelesaikan bagian kiri dari persamaan diatas (komponen $\partial T/\partial t$), diperlukan satu asumsi, yaitu nilai T pada setiap titik simpul yang berlaku seragam di seluruh volume bandingnya¹³⁾.

Untuk mempermudah penyelesaian bagian kanan dari persamaan (komponen $\partial T/\partial x$, $\partial T/\partial y$, dan $\partial T/\partial z$) dibutuhkan dua asumsi¹³⁾. Asumsi pertama adalah pengandaian paras *profile assumption*, yang merupakan paras tinier di antara titik-titik simpul. Sedangkan asumsi kedua adalah pengandaian yang diperlukan untuk melihat kondisi $T_p^0, T_w^0, T_E^0, T_S^0, T_N^0, T_T^0$ dan T_B^0 berubah terhadap waktu dari t sampai $t+\Delta t$. Pengandaian ini dinyatakan dalam persamaan :

$$\int_0^{\Delta t} T_p dt = [T_p^0 + (1-f)T_p^0] \Delta t \quad (2)$$

dimana f adalah *weighting factor* yang nilainya berkisar antara 0 dan 1. Dengan nilai *weighting factor* tertentu, persamaan beda hingga akan dapat diselesaikan dengan Metode Penyelesaian Eksplisit, seperti pada nilai $f = 0$. Metode ini memiliki pengertian bahwa T_p tidak berhubungan dengan nilai T_w, T_E, T_S, T_N, T_T dan T_B , yang belum diketahui, tetapi secara eksplisit didapat dari $T_p^0, T_w^0, T_E^0, T_S^0, T_N^0, T_T^0$ dan T_B^0 yang telah diketahui. Penyelesaian dengan metode ini dapat memberikan nilai suhu pada masing-masing titik simpul untuk t tertentu, sehingga persamaan beda hingga menjadi :

$$\rho C_p \Delta x \Delta y \Delta z \frac{T_p^1 - T_p^0}{\Delta t} = \frac{k_x \Delta y \Delta z (T_E^0 - T_p^0)}{(\Delta x)_x} + \frac{k_y \Delta x \Delta z (T_S^0 - T_p^0)}{(\Delta x)_y} + \frac{k_z \Delta x \Delta y (T_N^0 - T_p^0)}{(\Delta x)_z} + \frac{k_x \Delta x \Delta z (T_E^0 - T_p^0)}{(\Delta x)_x} + \frac{k_y \Delta x \Delta z (T_S^0 - T_p^0)}{(\Delta x)_y} + \frac{k_z \Delta x \Delta y (T_N^0 - T_p^0)}{(\Delta x)_z} + \frac{k_x \Delta x \Delta y (T_T^0 - T_p^0)}{(\Delta x)_x} + \frac{k_y \Delta x \Delta y (T_B^0 - T_p^0)}{(\Delta x)_y} \quad (3)$$

Mekanisme perpindahan bahang secara konveksi dan radiasi pada antar muka padatan dengan fluida juga dimasukkan dalam menyusun persamaan beda hingga. Kedua mekanisme ini tidak mengalami proses pencacahan persamaan J seperti pada mekanisme konduksi karena persamaannya tidak dalam bentuk integral. Besarnya laju perpindahan bahang secara konveksi pada antar muka padatan dengan fluida dinyatakan melalui persamaan berikut :

$$q_{konveksi} = h_x \Delta y \Delta z (T_f^0 - T_p^0) + h_y \Delta x \Delta z (T_f^0 - T_p^0) + h_z \Delta x \Delta y (T_f^0 - T_p^0) + h_x \Delta x \Delta z (T_f^0 - T_p^0) + h_y \Delta x \Delta y (T_f^0 - T_p^0) + h_z \Delta x \Delta y (T_f^0 - T_p^0) \quad (4)$$

di mana h adalah koefisien perpindahan bahang. Sedangkan laju perpindahan bahang secara radiasi pada antarmuka padatan dengan fluida dinyatakan :

$$q_{radiasi} = \varepsilon_p \Gamma \Delta y \Delta z \left[(T_p^0)^4 - (T_f^0)^4 \right] + \varepsilon_s \Gamma \Delta x \Delta z \left[(T_p^0)^4 - (T_f^0)^4 \right] + \varepsilon_t \Gamma \Delta x \Delta y \left[(T_p^0)^4 - (T_f^0)^4 \right] + \varepsilon_b \Gamma \Delta x \Delta y \left[(T_p^0)^4 - (T_f^0)^4 \right] + \varepsilon_n \Gamma \Delta x \Delta y \left[(T_p^0)^4 - (T_f^0)^4 \right] + \varepsilon_w \Gamma \Delta x \Delta y \left[(T_p^0)^4 - (T_f^0)^4 \right] \quad (5)$$

di mana ε = tetapan emisivitas, Γ = tetapan Stefan-boltzmann ($=1.355.10^{-12}$ Kalori/ $\text{Cm}^2 \cdot \text{detik} \cdot \text{K}^4$), T menyatakan suhu mutlak dalam skala Kelvin. Selanjutnya persamaan 4 dan 5 dijumlahkan dengan persamaan konduksi yang telah tercacah untuk keenam simpul tetangganya. Kemudian dilakukan penyederhanaan bentuk persamaan yaitu menggabungkan komponen konduksi dan konveksi.

Bentuk persamaan beda hingga diatas dapat menyelesaikan masalah perpindahan bahang pada sistem material heterogen. Tetapi, penyelesaian tak berhingga akan muncul dalam menyelesaikan masalah pada sistem material homogen. Hal ini diakibatkan oleh pemakaian data koefisien perpindahan bahang (h) yang berharga not untuk sistem yang homogen. Untuk menjadikan persamaan ini mampu menampung masalah perpindahan bahang pada sistem material homogen dan heterogen. maka dilakukan penambahan komponen pada bagian kanan persamaan. Yakni berupa komponen laju

perpindahan bahang Secara konduksi pada sistem homogen seperti pada persamaan 3.

Dengan melakukan penyederhanaan pada persamaan beda hingga dan digunakan simbol sigma (Σ) untuk menjumlahkan suku yang berbentuk sama. Penjumlahan dilakukan pada setiap sisi dari masing-masing volume banding. Jadi bentuk umum dari persamaan beda hingga yang digunakan dalam program komputasi adalah :

$$\frac{\rho C_p V_{i,j,k} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n)}{\Delta t} = \sum_{k_{\text{top}}} \frac{S_{k_{\text{top}}}}{V_{i,j,k}} (T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k+1}^n) + \sum_{k_{\text{bottom}}} \frac{S_{k_{\text{bottom}}}}{V_{i,j,k}} (T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k-1}^n) + \sum_{k_{\text{left}}} \frac{S_{k_{\text{left}}}}{V_{i,j,k}} (T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k-1}^n) + \sum_{k_{\text{right}}} \frac{S_{k_{\text{right}}}}{V_{i,j,k}} (T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k+1}^n) + \sum_{k_{\text{front}}} \frac{S_{k_{\text{front}}}}{V_{i,j,k}} (T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k+1}^n) + \sum_{k_{\text{back}}} \frac{S_{k_{\text{back}}}}{V_{i,j,k}} (T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k-1}^n) \quad (6)$$

Apabila dilakukan penyusunan ulang dari persamaan diatas, maka akan didapat persamaan stabilitas perhitungan. Persamaan ini menunjukkan batas harga tahapan waktu untuk menjamin ketelitian hasil perhitungan komputer. Secara umum batas harga tahapan waktu maksimum yang dibutuhkan memiliki hubungan bahwa Δt berbanding lurus terhadap nilai $\rho C_p V_{i,j,k}$.

Dari hubungan diatas, terlihat bahwa antara ukuran jala-jala pencacahan dengan nilai maksimum Δt yang merupakan batas untuk menjaga kestabilan perhitungan. Artinya, makin kecil ukuran jala-jala pencacahan akan semakin lama proses perhitungannya, tetapi akan didapat ketelitian yang semakin baik. Semakin kecil nilai Δt akan didapat pula data pengamatan yang lebih akurat dengan nilai Δt yang tidak boleh melewati nilai maksimumnya.

2.2.2. Persamaan Fraksi Padatan

Untuk melihat kemajuan pembekuan lelehan logam dari dinding cetakan ke arah dalam (*Progress of Solidification*), digunakan persamaan fraksi padatan di dalam program aliran bahang. Persamaan ini berlaku apabila suhu lelehan logam berada di antara suhu *likuidus* dengan *solvus*, dan memiliki hubungan *linier* terhadap penurunan suhunya.

Persamaan fraksi padatan ini dituliskan sebagai berikut :

$$F_{s,i,j,k} = \frac{T_L - T_{i,j,k}}{T_L - T_S} \quad (3)$$

Persamaan fraksi padatan ini memiliki hubungan yang *linier* terhadap suhu. Dari persamaan terlihat bahwa bila kondisi lelehan logam masih dalam keadaan cair semua, maka nilai fraksi padatannya adalah nol ; dan fraksi padatan akan bernilai satu pada kondisi lelehan logam sudah membeku semua. Jadi, nilai fraksi padatan berkisar antara nol dan satu.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Model Fisik

Model benda cor yang digunakan berbentuk huruf "L". Bentuk ini dipilih karena kemungkinan untuk terjadinya cacat pengecoran adalah besar ; akibat laju pembekuan yang tidak seragam, dan bentuk sudut ini sering dijumpai dalam struktur teknik yang dapat mewakili bentuk sudut lainnya seperti bentuk "I", "T", dan "U".

Model benda cor ini terbuat dari bahan aluminium murni, sedangkan jenis cetakannya *green sand mold* dengan pasir silika sebagai bahan dasarnya. Rangka cetakan luar yang berfungsi untuk menyangga pasir cetakan terbuat dari kayu. Model ini menggunakan bidang belah yang vertikal. Saluran masuk (*ingate*) terletak pada bagian alas model benda cor. Volume dari model benda cor sebesar 450 cm kubik, dengan dimensi lebar 10 cm, tinggi model benda cor 13 cm, dan berpenampang bujur sangkar dengan luas 5 X 5 cm persegi. Rangka cetakan berukuran 16 X 18 X 11 cm. Ketebalan pasir cetakan yang menutupi benda cor di seluruh bagian terluar sebesar 3 cm kecuali pada bagian atas benda cor setebal 2 cm. Luas penampang saluran masuk adalah 2 X 3 cm persegi yang terletak dibagian atas model benda cor.

Gambar 3.1
Penggambaran model pada jala-jala pencetakan

Gambar 2. Penggambaran model pada jala-jala pencetakan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan dibahas hasil-hasil yang didapat dari permodelan yang telah dilakukan, meliputi hasil perhitungan distribusi suhu dan pola fraksi padatan di dalam model benda cor dan perbandingan hasil perhitungan tersebut dengan model fisik yang telah dilakukan pada penelitian terdahulu. Selanjutnya akan dijelaskan faktor-faktor yang menjadi kelemahan dan keunggulan program.

4.1. Distribusi Suhu Hasil Perhitungan

Distribusi suhu yang ditampilkan pada bab ini adalah pada $t = 20$ detik yang diperlihatkan dalam gambar 3, 4, 5 dan 7 dengan dimensi penampang model dan data masukan seperti pada bagian 3. Gambar tersebut menunjukkan kondisi dimana seluruh bagian logam telah membeku (gambar 3), masih terdapat bagian logam yang belum membeku (gambar 4 dan 5).

Pada gambar 3 terlihat daerah yang berwarna gelap yang berarti bagian tersebut telah melewati suhu *solidus* atau telah membeku. Daerah yang berwarna gelap ini berangsur-angsur dari bagian terluar benda ke arah tengahnya berwarna terang. Ini menunjukkan distribusi suhu dari daerah yang bersuhu rendah ke daerah yang tinggi. Daerah yang memiliki warna yang sama akan membentuk garis-garis *isothermal* yang bernilai

semakin besar dari daerah yang berwarna gelap ke daerah yang berwarna terang. Garis-garis *isothermal* ini timbul disebabkan oleh adanya kontak lelehan logam yang bersuhu tinggi dengan cetakan yang bersuhu rendah pada saat awal penuangan, sehingga terjadi aliran bahang selama proses pembekuan.

Peristiwa pembekuan dimulai pada antar muka antara lelehan logam (suhu tinggi) dengan pasir cetakan (suhu rendah) dimana terjadi kesetimbangan termal antara keduanya. Kesetimbangan *termal* menyebabkan pelepasan bahang dari bagian lelehan logam yang bersentuhan dengan pasir cetakan dan penyerapan bahang pada bagian pasir cetakan yang bersentuhan dengan lelehan logam. Peristiwa pelepasan bahang terus merambat ke bagian dalam logam dan peristiwa penyerapan bahang terus merambat ke bagian terluar pasir cetakan. Bila bahang yang dilepas mengakibatkan suhu lelehan logam tersebut terus turun sampai melewati suhu likuidusnya, maka dimulailah proses pembekuannya. Begitu seterusnya untuk semua bagian lelehan logam dari daerah terluar hingga bagian dalam.

Pada gambar 3, 4 dan 5 terlihat pola garis *isothermal* berbentuk melingkar yang disebabkan geometri model benda cor berbentuk "L". Bentuk ini memiliki sudut dalam dan sudut luar yang berpengaruh kepada laju pembekuannya. Daerah sudut dalam pada benda cor memiliki suhu lebih tinggi (warna yang cenderung lebih terang) dibanding daerah sudut luar yang memiliki suhu lebih rendah (warna lebih gelap). Artinya pada daerah sudut dalam terjadi laju pembekuan yang lebih kecil dibanding laju pembekuan pada daerah sudut luar. Hal ini dapat dijelaskan, bahwa pelepasan bahang lelehan logam ke pasir cetakan pada sudut luar terjadi menyebar ke segala arah di daerah sekitarnya, sehingga kenaikan suhu pasir cetakan akibat penyerapan bahang relatif lebih lambat. Akibatnya gaya dorong perpindahan bahang dalam arah ini relatif tidak menurun. Sebaliknya, pelepasan bahang pada sudut dalam tidak menyebar merata, tetapi terkumpul di daerah sekitarnya. Daerah ini menampung bahang lebih banyak sehingga kenaikan suhu pasir cetakan akibat penyerapan

bahang lebih cepat. Dengan daya serap yang ada pada pasir cetakan, gaya dorong perpindahan bahang dalam arah ini akan menurun.

Perbandingan gambar 3, 4 dan 5 memperlihatkan pola garis *isothermal* yang melingkar akan membesar dari lempeng dalam (lempeng 6) ke lempeng luar (kearah lempeng 4 dan lempeng 8). Pelepasan bahang yang terjadi dimulai dari antar muka lelehan logam dengan pasir cetakan, yakni lempeng 4 dan lempeng 8. Setelah itu baru diikuti pelepasan bahang pada lempeng 5 dan lempeng 7 serta terakhir pada lempeng 6, kearah luar. Hal ini dikarenakan pelepasan bahang yang memiliki konvensi vektor normal ke arah luar.

Gambar 9 merupakan visualisasi garis *isothermal* dari kelima lempeng yang merupakan dimensi ketebalan benda cor. Pernyataan diatas, bahwa pelepasan bahang dalam benda cor memiliki konvensi vektor normal ke arah luar, divisualisasikan pada gambar ini.

Perbedaan laju pembekuan pada model benda cor ini membentuk suatu daerah yang paling panas atau terakhir membeku di sekitar sudut dalam pada lempeng tengah benda cor. Daerah yang terakhir membeku (*hot spot*) ini ditunjukkan oleh garis *isothermal* yang berwarna kuning terang dengan suhu masih diatas 657°C (lihat gambar 9). Pada daerah ini diramalkan akan terjadi cacat penyusutan apabila tidak ada lelehan logam di sekitarnya yang mengimbangi penyusutan. Disamping menggunakan garis *isothermal* untuk menentukan *hot spot*, dapat pula digunakan pola fraksi padatan. Pola fraksi padatan ini mampu menunjukkan kemajuan pembekuan (*Progress of Solidification*) pada model benda cor. Pada gambar 6, 7, dan 8, terlihat daerah-daerah yang memiliki fraksi padatan bernilai satu. Dengan membandingkan gambar 6, 7 dan 8, terlihat daerah *hot spot* semakin membesar kearah dalam benda cor yang ditandai oleh daerah berwarna kuning lebih banyak pada lempeng 6. Pada Gambar 6 terlihat jelas bahwa fraksi padatan telah seragam bernilai satu.

Gambar 10 merupakan visualisasi seluruh lempeng benda cor. Dari data fraksi padatan nasi! perhitungan dibuat suatu *plot* yang menunjukkan daerah dimana lokasi cacat terjadi. Karena suhu yang didapat merupakan suhu pada pusat dari unit sel yang diamati maka gambar 10 mewakili titik pusat unit sel yang kemudian membentuk sel baru. Lokasi cacat ini terdapat pada lempeng 5, 6, dan 7 yang ditandai dengan warna kuning gelap hingga warna kuning terang sedangkan lempeng 4 dan 8 terlihat tidak terdapat cacat apapun. Cacat yang terjadi berbentuk seperti bola yang berimbang kedalaman cacatnya pada pasangan lempeng 5 dan lempeng 7 dengan daerah terbesar cacat pada lempeng 6.

4.2. Perbandingan Dengan Model Fisik

Seperti telah diuraikan diatas, gambar 3 hingga gambar 10 dan gambar 11 dapat digunakan untuk membandingkan lokasi cacat penyusutan yang terjadi pada model fisik dengan *hot spot* dari hasil perhitungan komputer. Pada gambar 3, 4, 5 dan 9 terlihat garis *isothermal* berwarna kuning terang merupakan daerah yang terakhir membeku dan diramalkan sebagai lokasi terjadinya cacat penyusutan. Sedangkan gambar 6, 7, 8 dan 10 merupakan bentuk lain untuk menentukan bagian lelehan logam yang telah membeku. Kedua hal diatas kemudian dibandingkan dengan hasil permodelan fisik yang telah dilakukan terdahulu dengan melakukan pemotongan pada bagian simetrinya, seperti pada gambar 11. Cacat penyusutan yang terjadi merupakan gabungan antara *cacat penyusutan dalam* pada bagian alas dan *discrete porosity* pada bagian bawahnya. Lokasi terbentuknya cacat penyusutan sangat mirip pada lokasi yang diramalkan dari hasil perhitungan komputer yang terlihat pada gambar 10.

Gambar 3 hingga 10 menunjukkan daerah *hot spot* model benda cor yang berada pada daerah sekitar sudut dalam. Daerah tersebut berfungsi sebagai kantung lelehan logam untuk mengimbangi penyusutan pada daerah lain di sekitarnya saat membeku.

Gambar 11 memperlihatkan bahwa pengisian rongga akibat penyusutan pada daerah disebelah bawah *hot spot* mengalami hambatan, sehingga meninggalkan rongga-rongga kecil yang tersebar (*porous*). Hal ini disebabkan oleh adanya inklusi yang dapat berupa oksida logam atau pasir cetakan yang rontok dan terbawa masuk saat penuangan. Inklusi ini dapat berfungsi sebagai inti-inti pembekuan baru, sehingga pembekuan tidak hanya tumbuh dari tepi cetakan saja. Selain itu, bentuk rongga dipengaruhi pula oleh keluarnya gas-gas terlarut dari lelehan logam karena kelarutannya menurun. Akibat kedua hal diatas yang terjadi secara bersamaan, maka terbentuklah rongga-rongga kecil yang menyebar tersebut yang merupakan salah satu jenis dari cacat penyusutan yaitu *discrete porosity*.

Setelah berhasil mengimbangi penyusutan pada daerah di sekitar *hot spot*, maka volume lelehan logam pada daerah tersebut berkurang dan tidak ada yang mengisinya lagi dari bagian lain karena sekitarnya sudah membeku; sehingga saat lelehan logam pada daerah ini menyusut akan meninggalkan jejak berupa rongga yang cukup besar di sekitar sudut dalam. Rongga ini merupakan salah satu jenis dari cacat penyusutan yang disebut cacat penyusutan dalam (*Internal Shrinkage*).

Gambar 3. Distribusi suhu benda cor pada lempeng 4, $t = 20$ detik

Gambar 4. Distribusi suhu benda cor pada lempeng 5, $t = 20$ detik

Gambar 5. Distribusi suhu benda cor pada lempeng 6, $t = 20$ detik

Gambar 6. Pola fraksi padatan benda cor pada lempeng 4, $t = 20$ detik

Gambar 7. Pola fraksi padatan benda cor pada lempeng 5, $t = 20$ detik

Gambar 8. Pola fraksi padatan benda cor pada lempeng 6, $t = 20$ detik

Gambar 9. Distribusi suhu benda cor, $t = 20$ detik

Gambar 10. Lokasi terbentuknya cacat pada benda cor.

Gambar 11. Penampang model fisik hasil pemotongan pada bidang simetrinya

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil permodelan komputer yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan dan saran sebagai berikut :

1. Metode prediksi porositas dengan garis Isotermal dapat menunjukkan daerah yang diramalkan terbentuknya cacat penyusutan.
2. Program aliran bahang ini mampu menunjukkan visualisasi tri-matra dari cacat penyusutan yang terjadi pada banda cor. Visualisasi ini meliputi simulasi arah pelepasan bahang dalam banda cor yang berarah keluar dan simulasi arah terbentuknya fraksi padatan kearah dalam.
3. Hasil pengamatan dari model fisik yang telah dilakukan terdahulu, terdapat dua jenis cacat penyusutan, yaitu cacat penyusutan dalam dan *discrete porosity*. Kedua cacat tersebut terletak di dalam daerah *hot spot* seperti yang diramalkan oleh hasil perhitungan program aliran bahang di dalam banda cor.
4. Program aliran bahang ini memiliki beberapa kelemahan, yaitu tidak memasukkan perhitungan terhadap pelepasan bahang laten saat logam membeku, besaran-besaran fisik yang bernilai seragam di setiap titik simpulnya dan ukuran jala-jala pencacahannya seragam dari pasir cetakan hingga benda cor.

DAFTAR PUSTAKA

1. Beeley, P. R, "*Foundry Technology*", Butterworths, London, 1972.
2. Beffel, M. J., Yu, K O., Robinson, M., and Schneider, K R, "*Computer Simulation of Investment Casting Processes*", Journal of Metal, Vol. 30, No.2 February 1989, pp. 27-30.
3. Bird, R B., Stewart, W. E, Lightfoot, E N., "*Transport Phenomena*", John Willey & Sons, Inc., 1960.
4. Dharma A. D., Ruby, "*Permodelan Aliran Bahang Untuk Meramalkan Lokasi Cacat Penyusutan Pada Benda Cor Dengan Metode Beda Hingga*", Jurusan Teknik Pertambangan, Institut Teknologi Bandung, 1995.

5. Duncan, Ray, Advanced MSDOS, "The Microsoft Guide for Assembly Language and C Programmers", Microsoft Press, 1986.
6. Flinn, Richard, A, "Fundamentals of Metal Casting", Addison Wesley Publishing Company, Inc., 1963.
7. Giamei, Anthony F., "Solidification Process Modelling : Status and Barriers, Journal of Metal", Vol. 34, No.1, January 1993, pp. 51-53.
8. Holman, J. P, "Heat Transfer", Seventh Edition, McGraw-Hill Book Company, Singapore, 1992.
9. "IBM Personal Computer Hardware Reference Library, Technical Reference", International Business Machine Corporation, First Edition, 1983.
10. Jogiyoanto H. M., "Pascal Tingkat Lanjut", Andi Offset, Yogyakarta, 1992.
11. Ohnaka, Usuo, "Dasar-Dasar Perpindahan Bahang dan Pembekuan Dengan Komputer", Maruzen, Tokyo, 1991 (dalam bahasa Jepang).
12. Ohnaka, Itsuo, "Direct Finite Difference Method", Innovative Numerical Analysis for the Applied Engineering Sciences, Edited by R. Shawet al., Univ. Press of Virginia, 1980, pp. 555-565.
13. Patankar, Suhas V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill Book Company, New York, 1980.
14. Perry, Robert H., *Perry's Chemical engineers' Handbook*, McGraw-Hill Book Company, Singapore, 1984.
15. Santosa, Insap, "Program-Program Terapan Menggunakan Quick BASIC", Andi Offset, Yogyakarta, 1991.
16. Stefanescu, D. M., Upadhyay, G., Bandyopadhyay, D., and Chen, I. G., "Modelling the Evolution of Equiaxed Microstructures in Casting", Journal of Metal, Vol. 30, No.2, February 1989, pp. 22-25.
17. Stoehr, R A, and Brody, H. D., "Computer Simulation of Heat Flow in Casting", Journal of Metal, Vol.21, No.9, September 1980, pp. 20-27.
18. Tosin, Rijanto, dan Bahar, M. Yusuf, "Quick Basic", Dinastindo, Jakarta, 1992.
19. Umeda, T, "Penggunaan Personal Computer Untuk Analisis Pembekuan Benda Cor dan Perencanaan", Moto center, Tokyo, 1987 (dalam bahasa Jepang).
20. User Guide, "MatJab 4. 2.c. 1", The Math Works Inc., March, 1993.
21. Viswanathan, Srinath, Sikka, Vinod, K, and Brody, Harold, D., "Using Solidification Parameters to Predict Porosity Distributions in Alloy Casting", Journal of Metal, Vol. 33, No.9, September 1992, pp. 37-40.

*). Guru Besar di Jurusan Teknik Pertambangan ITB, Bandung.

**). Kepala Departemen Cor I, PT. PINDAD, Bandung.

***). Alumnus Jurusan Teknik Pertambangan ITB, Bandung.