

Simulasi Numerik Pada Distribusi Temperatur Proses Pembekuan

Soejono Tjitro, Tresna P. Soemardi dan Bustanul Arifin
Program Studi Teknik Mesin Kekhususan Teknologi Manufaktur
Program Pascasarjana Bidang Ilmu Teknik-
Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok 16424.
E-mail: tresdi@eng.ui.ac.id

Abstrak

Arah pembekuan yang tidak mengarah ke arah riser dapat menyebabkan cacat shrinkage. Cacat ini dapat diprediksi dengan mengamati distribusi temperatur di riser atau produk cor. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan distribusi temperatur dengan bantuan piranti lunak Finite Element Method (ANSYS) dan eksperimen khusus dilakukan untuk memvalidasi hasil simulasi terutama ada tidaknya cacat shrinkage.

Simulasi dilakukan pada pengecoran cetakan pasir dengan bahan aluminium murni. Penelitian ini menggunakan metoda enthalpy untuk mendapatkan distribusi temperatur. Sifat logam cair yang dipakai dalam simulasi adalah enthalpy $H(T)$ dan konduktivitas thermal $k(T)$. Pengecoran cetakan pasir untuk eksperimen menggunakan bahan aluminium murni dan aluminium eutektik. Hasil cor aluminium eutektik dipakai sebagai data pendukung hasil cor aluminium murni.

Hipotesis hasil simulasi terhadap cacat shrinkage sesuai dengan hasil yang dicapai melalui eksperimen.

Kata kunci : simulasi numerik, solidification, cacat penyusutan, aluminium, riser

Abstract

The directional solidification which is not toward to riser causes the shrinkage defect. This defect can be predicted by investigating the temperature distribution in riser or casting products. The goal of this research is to examine the temperature distribution using Finite Element Software (ANSYS) and then an ad hoc experiment has been performed to verify the result of the simulation, especially the existences of shrinkage.

The simulation is carried out by sand casting process using pure aluminum. This research uses enthalpy method to examine the distribution of temperature. The properties of melted metal that being used for the simulation are enthalpy $H(T)$ and thermal conductivity $k(T)$. For experiment, the sand casting process uses pure aluminum and eutectic aluminum. The eutectic aluminum castings is used to support the pure aluminum castings.

The result of the simulation hypothesis against shrinkage defect is appropriate with the experiment result.

Keywords : numerical simulation, solidification, shrinkage, aluminum, riser

1. Pendahuluan

Kualitas hasil pengecoran cetakan pasir antara lain dipengaruhi oleh cetakan (*mold*), sifat logam cair, desain sistem saluran, dan temperatur tuang. Faktor – faktor tersebut berhubungan satu sama lainnya dan sulit untuk mengoptimasikannya karena pengaturan satu faktor berkaitan dengan faktor lainnya.

Satu dari sekian banyak cacat yang sering terjadi pada pengecoran cetakan pasir adalah cacat penyusutan (*shrinkage defect*). Cacat ini

timbul akibat kegagalan untuk mengkompensasi penyusutan *liquid* dan *solidification*. Kejadian ini biasanya merupakan gejala ketidak tepatan ukuran riser dan sistem saluran. Cacat *shrinkage* pada umumnya terjadi di dalam produk cor kadangkala cacat ini teridentifikasi setelah produk cor dilakukan proses pemesinan. Hal ini tentunya merupakan kerugian proses produksi. Cacat ini dapat dieliminir dengan mengatur kembali arah pembekuan (*directional solidification*). Cara untuk mengurangi atau

mengeliminir cacat *shrinkage*, bagi perancang proses pengecoran umumnya dengan melakukan *trial and error*. Pemakaian metoda *trial and error* ini menghabiskan biaya dan waktu lama, yang pada akhirnya meningkatkan biaya produksi. Simulasi numerik adalah opsi pemecahan untuk mengurangi proses *trial and error* yang banyak dilakukan di pengecoran.

Simulasi makroskopik proses pembekuan logam cair dapat dilakukan dengan metoda enthalpi dan metoda panas spesifik., Abis [1] menggunakan metoda panas spesifik untuk mensimulasi proses pembekuan pengecoran aluminium murni. Panas laten dimasukkan kedalam panas jenis spesifik aluminium dalam *range* temperatur transisi *phasa*. Untuk mendapatkan panas spesifik modifikasi fungsi temperatur sangat bergantung pada besarnya panas laten yang dibebaskan selama pembekuan. Kelemahan utama metoda *apparent capacity* (metoda panas spesifik) adalah jika temperatur nodal turun dari diatas temperatur liquidus menuju dibawah temperatur solidus dalam satu *step* waktu maka panas laten yang berhubungan dengan elemen nodal tersebut tidak dapat dipertanggungjawabkan.

Reddy et al [4] melakukan pemodelan proses pembekuan logam cair didalam cetakan silinder dengan menggunakan formulasi enthalpi. Selain itu lintasan pembekuan ditelusuri melalui *solute diffusion model*. Persamaan energi yang digunakan memuat enthalpi sebagai pengganti temperatur. Variasi total enthalpy (sensibel + laten) dan temperatur ditentukan berdasarkan karakteristik panas laten yang dibebaskan logam atau paduan.

Majchrzak dan Mendakiewicz [6] melakukan analisis numerik proses pembekuan besi tuang dengan metoda enthalpi. Majchrzak membagi 4 daerah (domain) pada diagram enthalpi – temperatur, yaitu solid, eutektik, *mushy* dan liquid. Masing-masing domain tersebut diasumsikan bahwa enthalpy memiliki hubungan linier dengan temperatur dan thermal diffusinya dibedakan.

Penelitian ini menggunakan bantuan piranti lunak ANSYS untuk mensimulasikan proses pembekuan logam cair dengan tujuan untuk memprediksi adanya cacat *shrinkage* pada produk cor. Metoda pemodelan yang digunakan adalah metoda enthalpi.

2. Deskripsi Model Matematik

Proses pembekuan (solidification) logam cair dikontrol oleh difusi panas dan konveksi yang terjadi di daerah cair. Pendekatan yang paling banyak digunakan untuk memodelkan proses pembekuan adalah persamaan kontinuitas gerak dengan memperhitungkan konduktivitas panas di atas titik lebur atau temperatur liquidus. Dengan asumsi tersebut maka persamaan kontinuitas dasar proses pembekuan dapat ditulis sebagai berikut [6]:

$$\text{div}[k(T).\text{grad}\{T(x, y, t)\}] + \dot{Q} = \rho c_p(T) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} \quad \dots (1)$$

dimana $T(x, y, t)$ adalah medan temperatur, $k(T)$ adalah konduktivitas thermal, ρc_p adalah panas spesifik volumetrik dan \dot{Q} adalah panas yang timbul akibat pelepasan panas laten selama proses pembekuan logam cair (perubahan fase). Dengan menggunakan metoda enthalpy maka persamaan (1) dapat diganti menjadi [6]:

$$\text{div}[k(T).\text{grad}\{T(x, y, t)\}] = \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

Untuk menyelesaikan persamaan (2) maka perlu menetapkan kondisi awal (*initial condition*) dan kondisi batas (*boundary condition*).

Kondisi awal ($t=0$) [7]:

$$T = T_0 \text{ pada domain } \Omega \quad (3)$$

Kondisi batas untuk $t > 0$ [7]

$$T = T \text{ pada } \Gamma_1 \quad (4a)$$

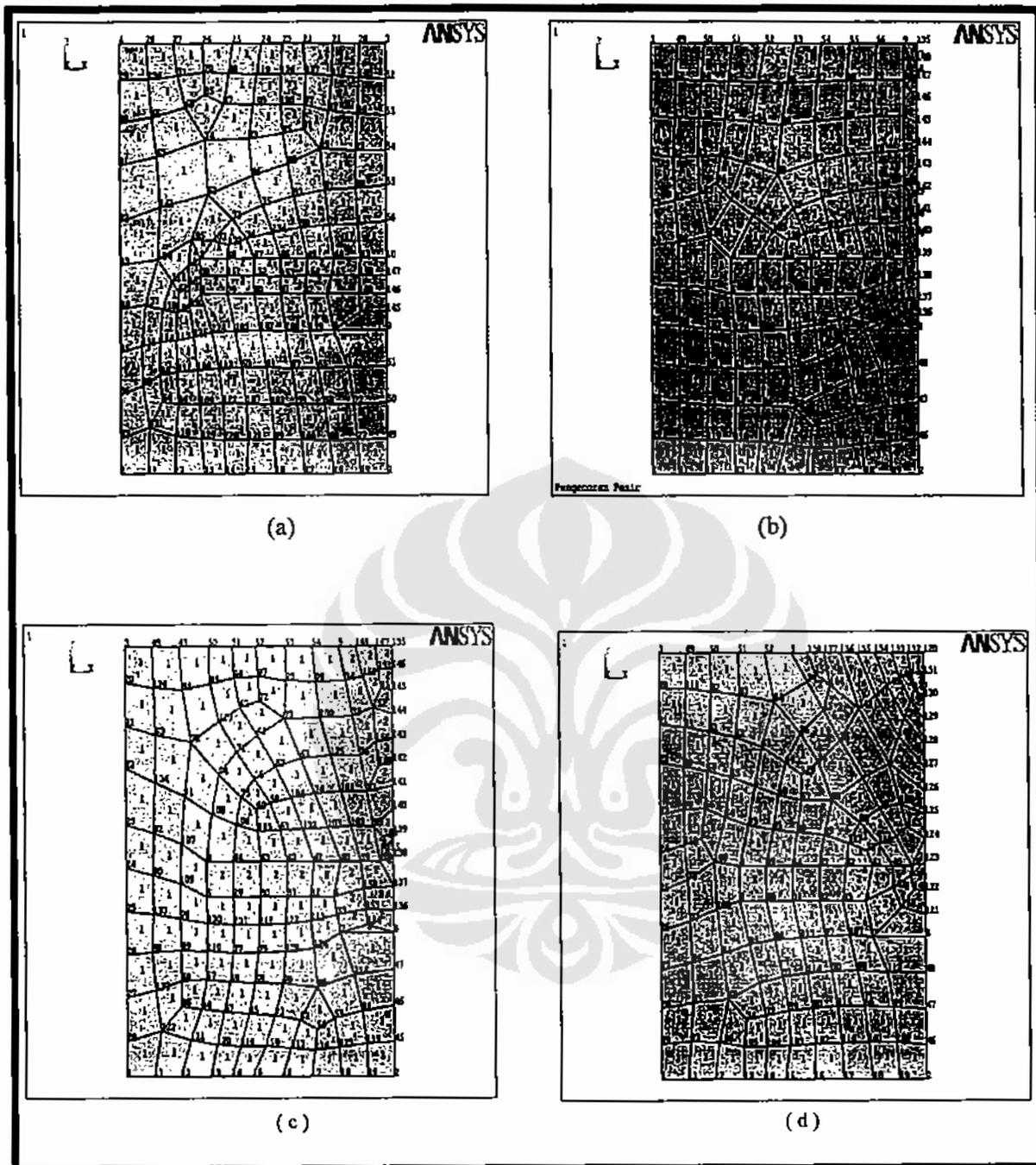
$$-K \frac{\partial T}{\partial n} = q_n + h(T - T_\infty) \text{ pada } \Gamma_2 \quad (4b)$$

dimana q_n adalah fluk batas yang ditentukan dan h adalah koefisien *film*. Sedangkan vektor normal temperatur pada permukaan adalah [7]:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = n_x \frac{\partial T}{\partial x} + n_y \frac{\partial T}{\partial y} \quad (5)$$

Dengan menggunakan linearisasi biasa, maka penyelesaian persamaan (2) – (5) mengarah kepada penyelesaian sistem persamaan linear matrik:

$$[C]\{T\} + [K]\{T\} - \{F\} = 0 \quad (6)$$



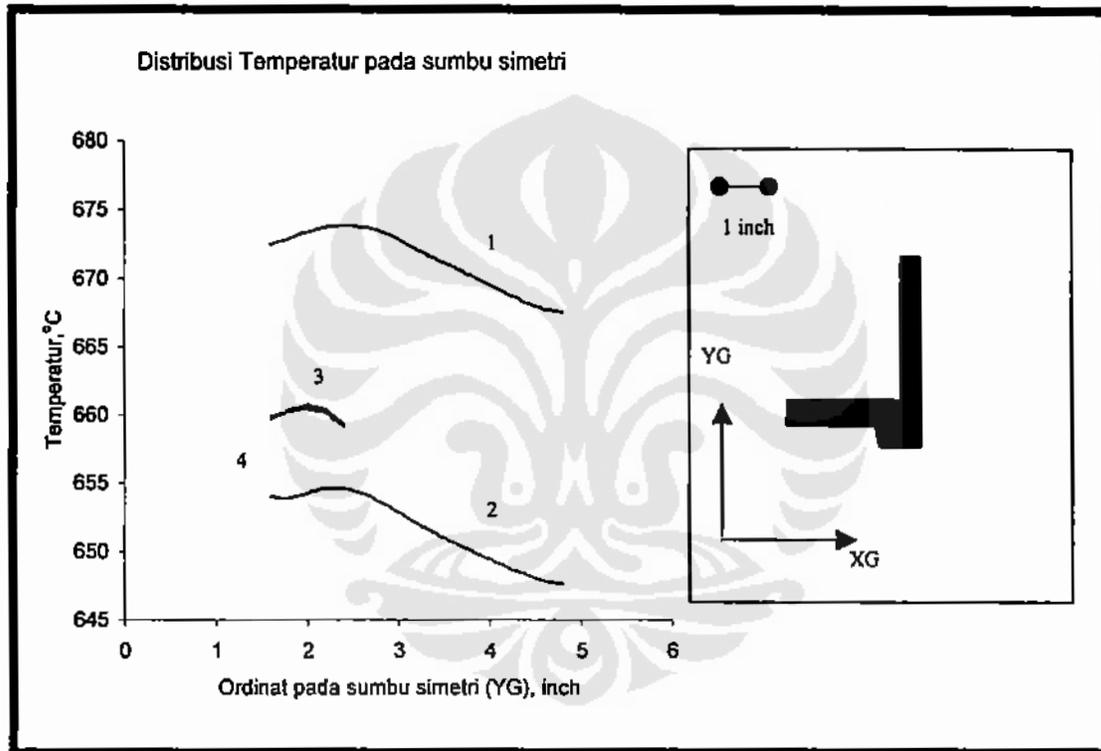
Gambar 2. Meshing model : (a) tanpa riser, (b) riser I, (c) riser II, (d) riser III

Asumsi bahwa perpindahan panas secara radiasi dapat diabaikan dan mempertimbangkan bentuk model simetris maka kebutuhan simulasi cukup menggunakan $\frac{1}{4}$ bagian. Elemen yang digunakan adalah 2 dimensi (2D) dengan bentuk *quadrilateral*, seperti yang ditunjukkan gambar 2. Jumlah nodal untuk masing-masing model tanpa riser, model dengan riser I, model dengan riser II

dan model dengan riser III adalah 155 nodal, 159 nodal, 159 nodal dan 156 nodal. Sedangkan jumlah elemennya masing-masing 133 elemen, 137 elemen, 136 elemen dan 130 elemen. Titik pusat koordinat global untuk *meshing model* di atas terletak di sudut kiri bawah *meshing model*. Satuan dimensi yang digunakan untuk koordinat global adalah satuan *inch*.

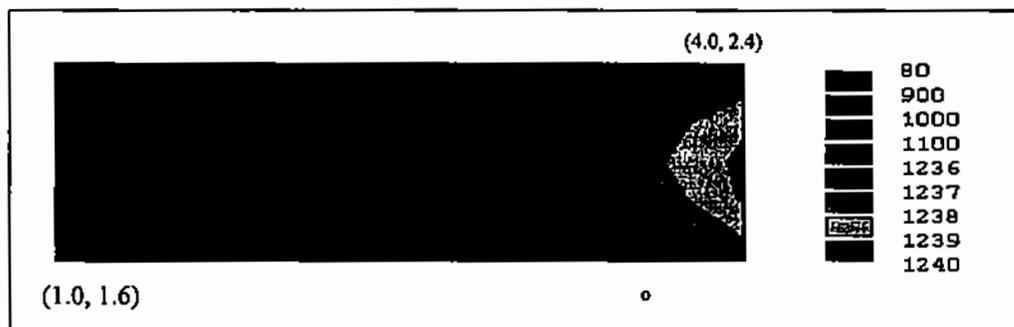
Distribusi temperatur model tanpa riser memperlihatkan bahwa temperatur terbesar terjadi pada daerah perubahan penampang, yaitu sekitar ordinat 2 inch (pusat produk cor). Area tersebut sangat kritis bagi terjadinya kemungkinan cacat penyusutan (*shrinkage*) sebab area ini akan menjadi pusat difusi panas (*hot spot*). Sebaliknya pembekuan cairan logam dimulai dari *castings-mould interface* menuju ke arah pusat *castings*. Karena laju pembekuan pada pusat produk cor (*castings*) lebih

rendah dibandingkan dengan laju pembekuan pada bagian tepi *castings* maka cairan logam yang berada di pusat *castings* (*hot spot*) akan mengalir (berdifusi) ke arah bidang pendinginan (*front solidification*). Akibatnya daerah pusat *castings* akan menimbulkan kekosongan (*void*) cairan logam. Gambar 3 memperlihatkan distribusi temperatur model tanpa riser dan distribusi temperatur model riser I sedangkan gambar 4 menunjukkan kontur distribusi temperatur model tanpa riser.

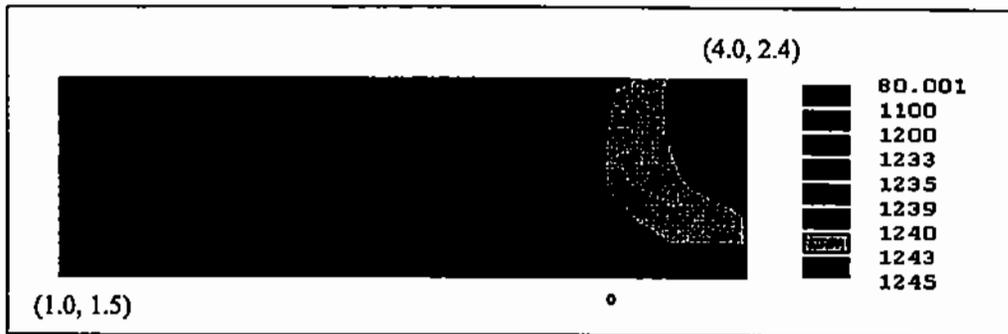


Gambar 3 Distribusi temperatur :

- (1) model riser I untuk $t = 94$ detik, (2) model riser I untuk $t = 126$ detik
- (3) model tanpa riser untuk $t = 95$ detik, (4) model tanpa riser untuk $t = 129$ detik



Gambar 4. Kontur temperatur model tanpa riser pada detik ke-82 ($^{\circ}$ F)



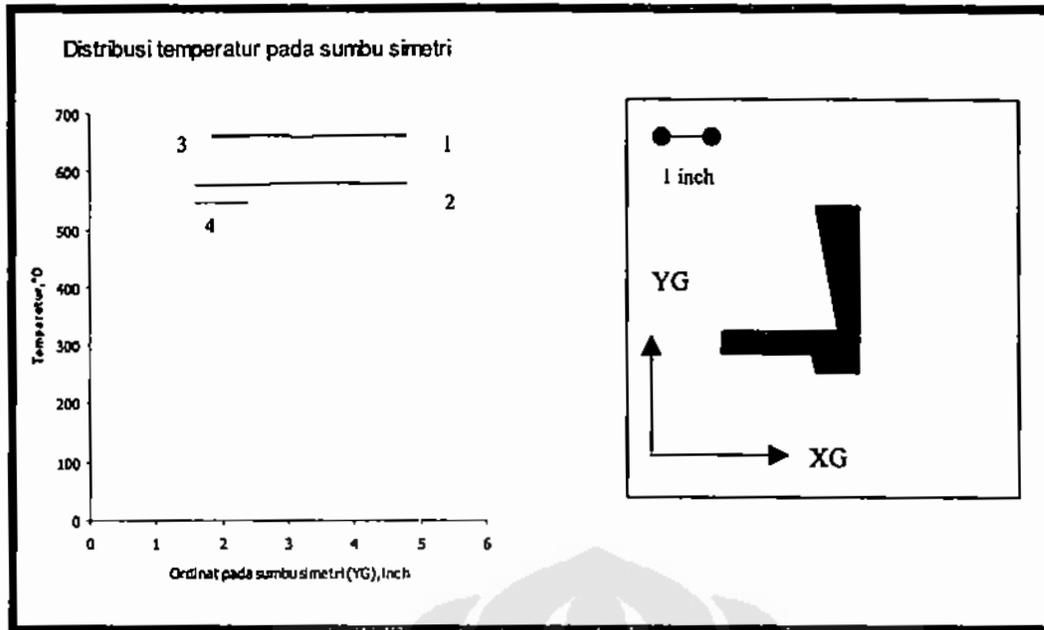
Gambar 5. Kontur temperatur model *riser* I pada detik ke-94 ($^{\circ}$ F)

Distribusi temperatur model *riser* I menyerupai distribusi temperatur model tanpa *riser*, hanya saja temperatur terbesar berada di leher *riser* (*riser / casting junction*). Dengan analogi yang sama maka *hot spot* untuk model *riser* I akan terjadi di area perubahan penampang atau di leher *riser*. Namun karena laju pembekuan di perubahan penampang (pusat *castings*) lebih rendah dibandingkan laju pembekuan di leher *riser* maka cairan logam di area perubahan penampang akan berdifusi menuju ke bagian yang membeku lebih dahulu. Hal ini bisa terjadi sebab *casting modulus riser* lebih kecil dibandingkan *casting modulus* produk cor. Akibatnya kemungkinan terjadi cacat penyusutan (*shrinkage*) besar sekali di area perubahan penampang.

Gambar 5 memperlihatkan kontur distribusi temperatur model *riser* I. Dari gambar tersebut tampak seolah-olah kontur distribusi temperatur yang diperoleh sangat baik sebab semakin ke atas temperturnya

semakin tinggi namun sebenarnya tidak terlihat setelah melewati leher *riser* temperturnya turun.

Gambar 6 memperlihatkan distribusi temperatur model *riser* II. Meskipun nilai *casting modulus riser* II lebih besar dibandingkan nilai *modulus casting* produk cor namun distribusi temperatur yang diperoleh relatif homogen di sepanjang titik nodal sumbu simetri. Hal ini mungkin disebabkan laju pendinginan produk cor sama dengan laju pendinginan *riser*. Ada kemungkinan bagian *riser* membeku lebih dulu sebab ketebalan *riser* lebih tipis daripada produk cor (*castings*). Akibatnya cairan logam yang hendak berdifusi dari *riser* menuju ke bagian produk cor terhambat oleh karena sebagian *riser* telah membeku terlebih dahulu. Fenomena ini mengindikasikan adanya kemungkinan terjadinya cacat penyusutan (*shrinkage*) pada produk cor.



Gambar 6. Distribusi temperatur :

- (1) model riser II untuk $t = 131$ detik, (2) model riser II untuk $t = 579$ detik
 (3) model tanpa riser untuk $t = 129$ detik, (4) model tanpa riser untuk $t = 310$ detik



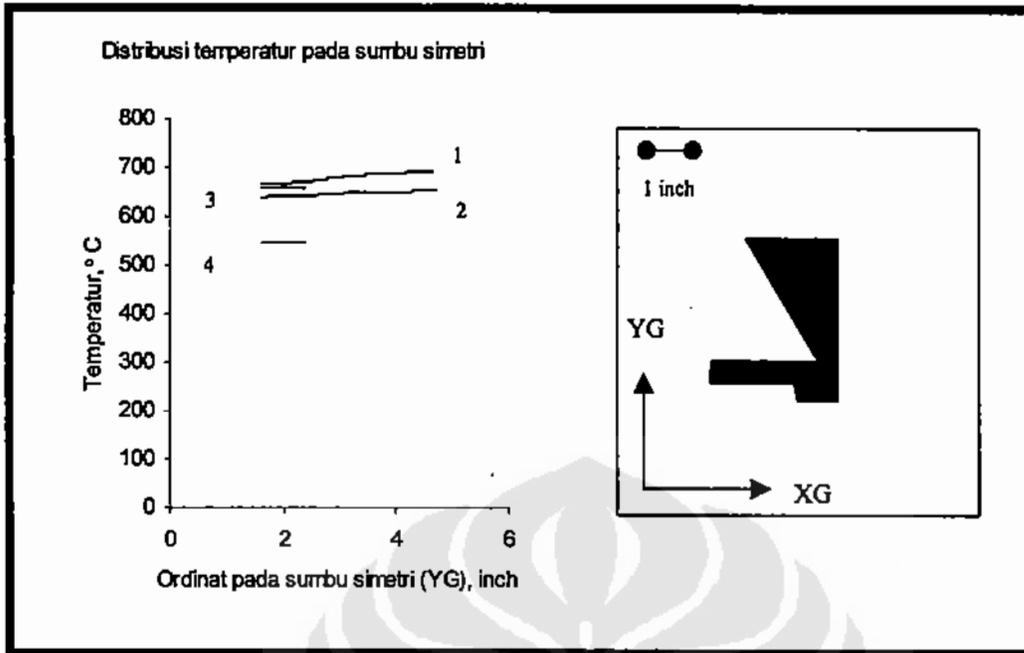
Gambar 7. Kontur temperatur model riser II pada detik ke-131 ($^{\circ}$ F)

Kontur distribusi temperatur model tanpa riser II memperlihatkan semakin mendekati pusat produk cor, temperaturnya semakin tinggi dan semakin memungkinkan terjadi kekosongan pada daerah tersebut.

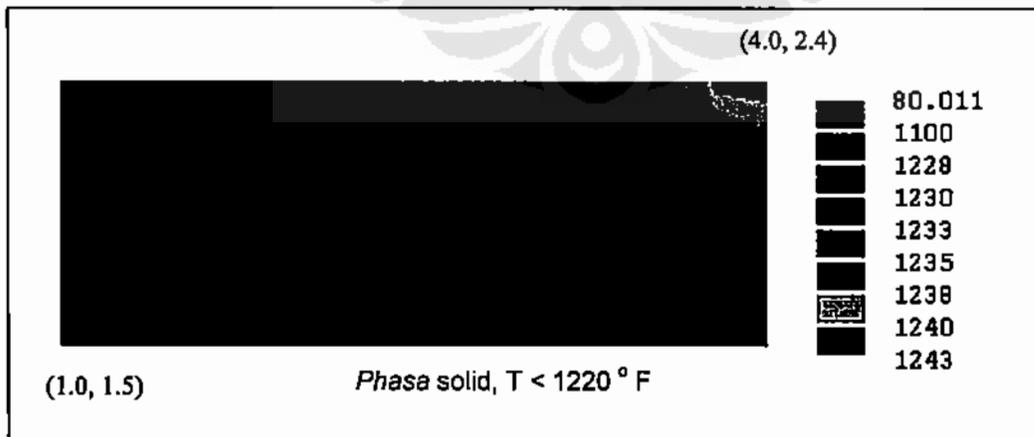
Gradien temperatur untuk model riser III selalu bernilai positif, seperti yang ditunjukkan gambar 8. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi temperatur di sepanjang titik nodal sumbu simetri mulai dari bagian dasar produk cor menuju bagian paling atas dari riser selalu meningkat.

Laju pembekuan di bagian riser lebih kecil dibandingkan laju pembekuan di

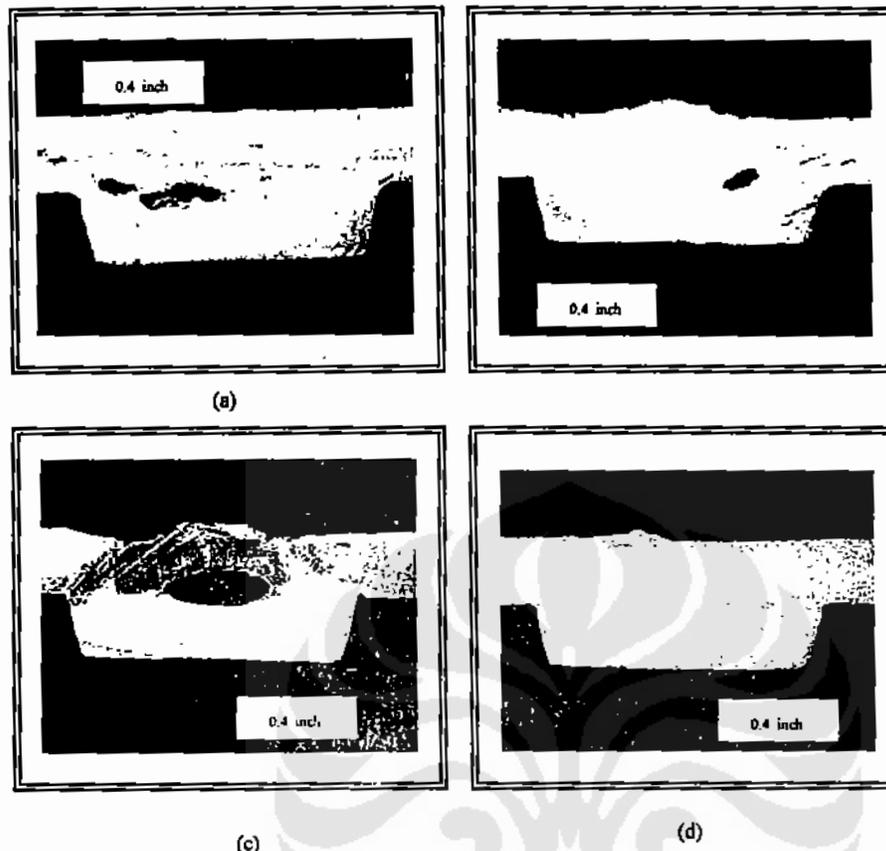
bagian produk cor sebab casting modulus riser lebih besar casting modulus produk cor. Akibatnya kemungkinan terjadinya directional solidification yang benar dapat terwujud. Sehingga cairan logam di riser dapat menjalankan fungsinya dengan baik yaitu berdifusi dan mengisi kekosongan di bagian produk cor. Produk cor untuk model riser III diharapkan tidak terjadi cacat penyusutan (shrinkage). Gambar 9 memperlihatkan kontur distribusi temperatur model riser III semakin ke atas temperaturnya semakin meningkat



Gambar 8. Distribusi temperatur :
 (1) model *riser* III untuk $t = 125$ detik, (2) model *riser* III untuk $t = 215$ detik
 (3) model tanpa *riser* untuk $t = 129$ detik, (4) model tanpa *riser* untuk $t = 310$ detik



Gambar 9. Kontur temperatur model *riser* III pada detik ke-125 (° F)



• **Gambar 10** Produk cor :
 (a) tanpa riser, (b) model riser I, (c) model riser II, (d) model riser III

Hasil eksperimen memperlihatkan bahwa hipotesis hasil simulasi mendekati kebenaran. Model tanpa riser, model riser I dan model riser II memperlihatkan cacat penyusutan (*shrinkage*) terjadi di bagian pusat produk cor. Sedangkan produk cor dengan model riser III tidak menunjukkan adanya cacat penyusutan (*shrinkage*). Gambar 10 memperlihatkan produk cor aluminium murni kecuali untuk model tanpa riser.

4. Kesimpulan

Distribusi temperatur dapat digunakan untuk memprediksi cacat penyusutan (*shrinkage*). Gradien temperatur bernilai positif mengindikasikan arah pembekuan mengarah ke arah riser.

Notasi

- c_p : panas jenis spesifik
- h : koefisien konveksi
- H : enthalpy
- k : konduktivitas thermal
- ρ : massa jenis
- Q : panas laten
- q_n : fluks panas
- t : waktu
- T : temperatur
- T_∞ : bulk temperatur
- n_x, n_y : komponen vektor normal ke arah x dan y
- [C]: thermal damping matrix
- [K]: conductivity matrix
- [F]: load matrix
- {T}: temperature matrix

Daftar Pustaka

1. Abis S. "Metallurgical Transactions B". Vol. 17B. pp. 209 – 216. March (1986)
2. Barin I., Platzki, G. "Thermochemical Data of Pure Substances". Third edition. Vol. 1 Ag–Kr. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim. Federal Republic of Germany. (1995)
3. Hatch John E. "Aluminum : Properties and Physical Metallurgy". pp. 7- 15. ASM. (1995)
4. Majchrzak E., Mendakiewicz J. "Numerical Analysis of Cast Iron Solidification Process", Journal of Materials Processing Technology. No. 53. pp. 285-292. (1995)
5. Rappaz M., D.M. Stefanescu. "Modeling of Microstructural Evolution". ASM. (1988)
6. Reddy G.S., Mascarenhas W.J., Reddy J.N. "Numerical Simulation of Solidification of Molten Aluminum Alloys in Cylindrical Molds". Metallurgical Transaction B. Vol. 24B. pp. 677 – 684. Agust (1993)
7. Segerlind L.J. "Applied Finite Element Analysis". second edition. John Wiley & Sons. (1984)
8. Tjitro Soejono. "Simulasi Numerik Proses Pembekuan Aluminium Pada Pengecoran Cetakan Pasir". Tesis, Universitas Indonesia. (2001)

