

SIMULASI PENGECORAN BILLET DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA (MS MARC)

Ramang Magga¹

¹Laboratorium Bahan Teknik, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Tadulako

Email: ramang_magga@yahoo.com

Abstract

This research aim to study the effect of temperature, chilling time, tension, strain, and phase occurred during casting. Finite element simulation method was applied using MS Marc and Fortran software. Condition of casting, when the simulation was run, was divided into three part based on the distance from the center namely 20, 60, and 100 mm. The result showed that simulation at the same temperature, tension of 20 mm has the biggest tension, followed by 60 mm and 100 mm. However, chilling speed at 100 mm from the center was the fastest, and the lowest was 20 mm from the center. At the center of the billet, push tension was occurred. While, pull tension was occurred on the surface.

Keywords: Casting, simulation, tension

I. PENDAHULUAN

Proses pengecoran adalah proses peleburan logam tanpa permesinan, dimana pada proses pengecoran tersebut dipengaruhi beberapa factor antara lain kecepatan pembekuan, temperatur penuangan, temperature cetakan, pola cetakan, temperature pelebur logam, waktu pembekuan, kecepatan pembuangan logam sisa, tegangan dan regangan yang terjadi selama proses pengecoran faktor-faktor tersebut dapat dianalisa dengan dua cara yaitu cara analitik dan cara numerik. Metode elemen hingga merupakan suatu proses numerik untuk memperoleh solusi terhadap problem fisik yang sering dijumpai dalam analisis teknik. Metode ini merupakan solusi pendekatan, karena metode analitis menjadi sangat rumit/sulit saat digunakan untuk menyelesaikan problem fisik yang sangat kompleks.

Penelitian ini menggunakan simulasi komputer, dimana software yang digunakan adalah software MSC Marc dan fortran. MSC Marc adalah software komersial yang biasa digunakan dalam menyelesaikan persoalan-persoalan yang rumit dan penyelesaian persoalan dilakukan dengan metode pendekatan, metode pendekatan dilakukan dengan memadukan persamaan-persamaan yang digunakan untuk tiap titik pada nodal.

II. TEORI DASAR

II.1 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan suatu proses numerik untuk memperoleh solusi terhadap problem fisik yang sering dijumpai dalam analisis teknik. Metode ini merupakan solusi pendekatan,

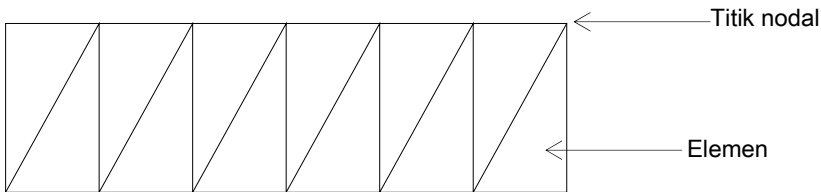
karena metode analitis menjadi sangat rumit/sulit saat digunakan untuk menyelesaikan problem fisik yang sangat kompleks.

Solusi masalah fisik dapat dibagi menjadi elemen diskrit dan elemen kontinyu, elemen diskrit dipakai pada solusi pendekatan simpangan dan gaya pada suatu struktur sedang elemen kontinyu dipakai pada solusi pendekatan terhadap problem-problem perpindahan kalor, mekanika fluida dan mekanika bahan solid.

Formulasi pendekatan dengan menggunakan elemen-elemen diskrit biasa disebut sebagai analisis matriks struktur dan memberikan hasil yang identik dengan analisis struktur klasik. Pendekatan metode elemen hingga akan menghasilkan harga pendekatan dari parameter-parameter yang diperlukan pada titik-titik tertentu (nodal-nodal).

Langkah-langkah untuk menyelesaikan problem fisik dengan metode elemen hingga yaitu:

- a. Problem fisik dibuat menjadi elemen-elemen kecil, ditandai dengan nomor elemen, nomor titik nodal dan harga-harga koordinatnya (Gambar 2.1).
- b. Menentukan persamaan, apakah persamaan yang digunakan persamaan linear, kuadratik atau interpolasi, persamaan-persamaan tersebut harus ditulis dalam bentuk parameter yang belum diketahui pada setiap nodal.
- c. Membuat sistem metode persamaan yang digunakan (metode Galerkin, formulasi energi potensial, variasional, dll).
- d. Menyelesaikan persamaan yang digunakan dan menghitung besaran yang dicari. Besaran-besaran biasanya berupa komponen-komponen tegangan, aliran panas atau kecepatan fluida.



Gambar 2.1. Pembagian benda menjadi elemen-elemen dan titik nodal

II.2 Perpindahan Panas

Persamaan-persamaan yang digunakan untuk menghitung laju aliran panas pada kondisi tidak stasioner sebagai berikut :

$$\frac{k}{c_p \rho} \nabla T + \frac{q_v}{c_p \rho} = \frac{\partial T}{\partial t} \dots\dots\dots 1)$$

T adalah temperatur, k adalah konduktivitas termal, c_p adalah panas spesifik, q_v adalah sumber panas, ρ adalah densitas, t adalah waktu.

Syarat batas persamaan di atas adalah :

$$T = T_c, \quad k \frac{\partial T}{\partial n} = q_c \quad \text{dan} \quad k \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_c (T - T_f) \dots\dots\dots 2)$$

T_c adalah temperatur luar, T_f adalah temperatur cairan pendingin, α_c adalah koefisien panas.

Formulasi metode elemen hingga dari persamaan di atas akan diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$[K_1][T][C][\dot{T}] = \{F\} \dots\dots\dots 3)$$

dengan : $[K_1] = \sum_e \int_V [H]^T k [G] dV + \sum_e \int_S [H]^T \alpha_c [H] dS - \sum_e \int_S [H]^T k \frac{\partial}{\partial n} [H] dS \dots\dots\dots 4)$

$$[C] = \sum_e \int_S [H]^T \rho c_p [H] dV \dots\dots\dots 5)$$

$$\{F\} = \sum_e \int_V [H]^T q_v dV - \sum_e \int_S [H]^T q_c dS - \sum_e \int_S [H]^T \alpha_c T_f dS \dots\dots\dots 6)$$

$[K_1]$ adalah matrik kapasitas kalor, $[C]$ adalah matrik konduktifitas, $\{F\}$ adalah vektor beban.

II.3 Mekanika

Persamaan kesetimbangan yang digunakan untuk menghitung gaya-gaya mekanis adalah sebagai berikut :

$$\int_V \delta \varepsilon_{ij}^T \sigma_{ij} dV - \int_V \delta u_i^T f_i dV - \int_\Gamma \delta u_i^T t_i d\Gamma = 0 \dots\dots\dots 7)$$

σ_{ij} adalah tensor tegangan internal, f_i adalah komponen gaya eksternal/unit volum, t_i adalah komponen dari tekanan permukaan/unit panjang yang bekerja pada syarat batas, δ_{ui} dan $\delta_{\varepsilon_{ij}}$ adalah komponen vektor simpangan, tensor regangan serta V adalah volume dari elemen. Penjumlahan dari regangan yang terjadi adalah :

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^T + \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} \dots\dots\dots 8)$$

$\dot{\varepsilon}_{ij}^e$ adalah tensor laju regangan elastik, $\dot{\varepsilon}_{ij}^T$ adalah tensor laju regangan termal, $\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$ adalah tensor laju regangan viscoplastis. Deformasi dari tegangan yang terjadi dihitung menggunakan persamaan

berikut : $\dot{\varepsilon}_{ij}^e = E_{ijkl} \dot{\sigma}_{kl}$ dan $\dot{\varepsilon}_{ij}^T = \alpha_{ij} \dot{T} \dots\dots\dots 9)$

E_{ijkl} adalah koefisien material yang didefinisikan berdasarkan modulus Young dan rasio poisson, α_{ij} adalah koefisien muai panas

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \begin{cases} \varphi f(\bar{\sigma}, T) & T \leq T_{sol} \\ \varphi f(\bar{\sigma}, f_s, T) & T > T_{sol} \end{cases} \dots\dots\dots 10)$$

$$\varphi = \begin{cases} 0 & \bar{\sigma} \leq \sigma_y \\ 1 & T > \sigma_y \end{cases} \dots\dots\dots 11)$$

$\bar{\sigma}$ adalah tegangan efektif, σ_y adalah tegangan luluh, T_{sol} adalah temperatur solidus. Nilai kenaikan akibat vektor simpangan $\{\Delta u\}$ dan vektor regangan $\{\Delta \varepsilon\}$ dalam hubungannya dengan matrik simpangan regangan $[B]$ ditentukan dengan interpolasi dua persamaan berikut :

$$\{\Delta u\} = [N]\{\Delta u\}_e \text{ dan } \{\Delta \varepsilon\} = [B]\{\Delta u\}_e \quad \dots\dots\dots 12)$$

Bentuk persamaan keseimbangan mekanik adalah:

$$[K]\{\Delta u\} = \{\Delta L\} \quad \dots\dots\dots 13)$$

dengan : $[K] = \sum_e \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad \dots\dots\dots 14)$

$$\{\Delta L\} = \{\Delta L_1\} + \sum_e \int_V [B]^T [D] \{\Delta \varepsilon^T\} dV + \sum_e \int_V [B]^T [D] \{\Delta \varepsilon^{vp}\} dV \quad \dots\dots\dots 15)$$

$[K]$ adalah matrik kekakuan, $\{\Delta L\}$ adalah vektor gaya total, $\{\Delta L_1\}$ adalah gaya eksternal, $[D]$ adalah matrik elastis tegangan-regangan, $\{\Delta \varepsilon^T\}$ adalah regangan termal, $\{\Delta \varepsilon^{vp}\}$ adalah regangan elasto-viskoplastis.

Material yang digunakan adalah paduan aluminium (Al-4,5% Cu) dengan sifat-sifat material : temperatur cair (solidus) 551,2 °C, temperatur padat (liquidus) 650,0 °C, sedang modulus Young, Poisson rasion, koefisien muai, konduktivitas termal dan kalor spesifik dapat dilihat pada tabel berikut

Tabel 1. Modulus Young sebagai fungsi dari temperatur (Brammer; Percival 1970 dan Taylor; Groot; Ferrier, 1998), Poisson rasion sebagai fungsi dari temperatur (Touloukian; Buyco, 1970)

No.	Suhu (°C)	Modulus Young (GPa)	Suhu (°C)	Poisson rasion
1.	0	73	0	0,336
2.	22	73	100	0,340
3.	100	70,2	150	0,343
4.	150	68,5	200	0,348
5.	200	66,4	250	0,351
6.	250	64,2	288	0,354
7.	288	62,8	300	0,352
8.	300	62	350	0,357
9.	350	59,6	371	0,359
10.	371	58,6	400	0,363
11.	400	57,1	450	0,364
12.	450	54,2	540	0,375
13.	540	51	551	0,375
14.	551	10	800	0,375
15.	800	10		

Tabel 2. Koefisien muai sebagai fungsi dari temperatur (Touloukian; Buyco, 1970 dan Haafthen, 1997), Kondiktivitas termal sebagai fungsi dari temperatur (Brammer; Percival 1970 dan Taylor; Groot; Ferrier, 1998), Kalor spesifik sebagai fungsi dari temperatur (Touloukian; Buyco, 1970).

No.	Suhu (°C)	Koefisien muai (°C ⁻¹)	Suhu (°C)	Kond. termal (W/m°C)	Suhu (°C)	Kalor spesifik (kJ/kgK)
1.	0	2,00xE ⁻⁰⁵	0	148,1	0	920,48
2.	20	2,00xE ⁺⁰⁵	100	148,1	100	920,48
3.	50	2,00xE ⁺⁰⁵	150	156,2	150	962,32
4.	100	2,00xE ⁺⁰⁵	200	165,4	200	1004,2
5.	200	2,333xE ⁺⁰⁵	250	174,1	250	1025,1
6.	300	2,50xE ⁺⁰⁵	300	179	300	1129,7
7.	400	2,63xE ⁺⁰⁵	350	184	350	1171,5
8.	500	2,7083xE ⁺⁰⁵	400	187,7	400	1276,1
9.	549	2,741xE ⁺⁰⁵	450	188,9	450	1054,0
10.	551	8,83xE ⁺⁰⁵	551,2	189,5	551,2	1054,0
11.	611	0,00xE ⁺⁰⁰	642	950		
12.	800	0,00xE ⁺⁰⁰	800	950		

Tabel 3. Koefisien perpindahan panas daerah terjadi kontak sebagai fungsi dari temperatur (Suyitno, 2004), Koefisien perpindahan panas selama pendinginan berlangsung sebagai fungsi dari temperatur (Suyitno, 2004), Koefisien perpindahan panas daerah tidak terjadi kontak sebagai fungsi dari jarak (Suyitno, 2004).

T (°C)	H _{tc} (W/m ² K)	T (°C)	H _{tc} (W/m ² K)	Gap (m)	H _{tc} (W/m ² K)
0	1000	0	1000	0,000	450
200	1000	100	1000	0,015	300
500	1000	150	2000		
600	1000	200	3000		
680	1500	400	1000		
700	1500	600	400		
800	1500	700	400		

III. METODE PEMODELAN

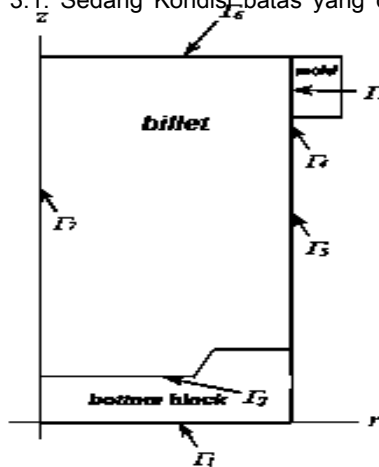
Pada penelitian ini simulasi menggunakan komputer, dimana software yang digunakan adalah software MSC Marc dan fortran. MSC Marc adalah software komersial yang biasa digunakan dalam menyelesaikan persoalan-persoalan yang rumit dan penyelesaian persoalan dilakukan dengan

metode pendekatan, metode pendekatan dilakukan dengan memadukan persamaan-persamaan yang digunakan untuk tiap titik pada nodal.

Sebelum mengoperasikan simulasi dengan software MSC Marc terlebih dahulu ditentukan bentuk model, material yang digunakan, sifat material, syarat batas dan pembagian mesh. Langkah-langkah dalam menyelesaikan simulasi/pemodelan dengan MSC Marc, yaitu :

1. Membuat model.
2. Membagi mesh dan menghubungkan tiap-tiap mesh.
3. Memasukkan syarat batas dan kondisi awal.
4. Material dan geometri properties.
5. Menjalankan program.

Pemberian syarat batas untuk tiap kondisi berbeda-beda disesuaikan proses fisiknya sebagaimana ditunjukkan Gambar 3.1. Sedangkan Kondisi batas yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.



Gambar 3.1. Posisi kondisi batas pada simulasi metode elemen hingga

Kondisi batas yang berbeda diterapkan pada batas tertentu dari billet bagian bawah Γ_1 diasumsi perpindahan panas konveksi dari lingkungan dianggap konstanta dan arah Z adalah konstan, Γ_2 adalah kontak billet dengan blok bawah dimana perpindahan panas ditentukan oleh kontak, tidak kontak atau intrusi air antara billet dan blok bawah dan billet bergerak radial, Γ_3 adalah kondisi kontak atau tidak kontak antara billet dan cetakan, kriteria sama dengan kondisi Γ_2 serta billet bergerak axial, kondisi batas yang berhubungan pendinginan dibatasi dua bagian, Γ_4 daerah penekanan air atas dan Γ_5 daerah aliran bawah, Γ_4 dan Γ_5 billet bergerak dalam arah radial dan axial, kondisi Γ_6 adalah temperatur konstan serta bergerak arah axial dengan kecepatan pengecoran, Γ_7 adalah perpindahan panas tidak ada (nol) karena sumbu simetris.

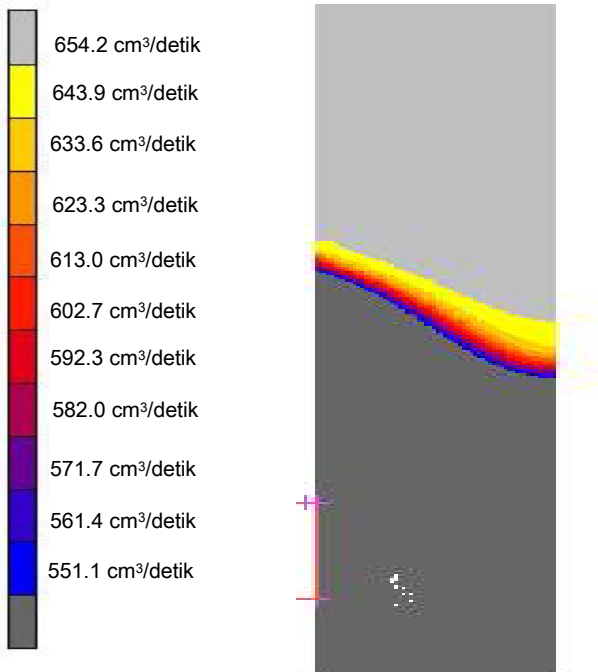
Tabel 4. Data syarat batas (Suyitno, 2004).

Γ_1	$h = h_{bc}, z = \text{kons tan}$	$h_{bc} : 50W / m^2K, T_{ruang} : 20^0 C$
Γ_2	$h = \begin{cases} h_{ic} \text{ if } d_t < 10^{-5} m \\ h_{mc} \text{ if } 10^{-5} < d_t < 10^{-3} m, \\ h_{twi} \text{ if } d_t > 10^{-5} m \end{cases} \quad z_{\text{blok}} = \text{kons tan},$	h_{ic}, h_{mc}, h_{twi} Lihat tabel 6, tabel 7 dan tabel 8.
Γ_3	$h = \begin{cases} h_{mc} \text{ if } d_t < 10^{-5} m \\ h_{twi} \text{ if } d_t < 10^{-5} m \end{cases}$ $T_{mold} = \text{kons tan}, z = V_c t$	$h_{mc} : 1500W / m^2K$ $h_{mc} : \text{Tabel 6}, T_{mold} : 100$
Γ_4	$\frac{q}{a} = 27300T - 1273088.915, \text{ if } T < 120^0$ $\frac{q}{a} = 94252.48T - 9240434.453, \text{ if } 120^0 \leq T \leq 150^0$ $\frac{q}{a} = 12259.18T - 3058560.867, \text{ if } T \geq 150^0, \quad z = V_c t$	
Γ_5	$\frac{q}{a} = (-167000 + +_c T_{bar})(q_w / 60000)^{1/3} \Delta T + 100(\Delta T_x)^3$ $c = -21.2035Q_w^2 + 1.1508Q_w + 62794$ $T_{bar} = (T + T_{bulk}) / 2, \quad \Delta T = T + T_{bulk}, \quad \Delta T_x = T + T_{sat}, \quad z = V_c t$	$Q_w : 150l / \text{min}$ $T_{bulk} : 10^0 C$ $T_{sat} : 90^0 C$
Γ_6	$T = T_{in}, z = V_c t, \frac{q}{A}$	$T_{in} : 700^0 C$
Γ_7	$\frac{q}{A}$	

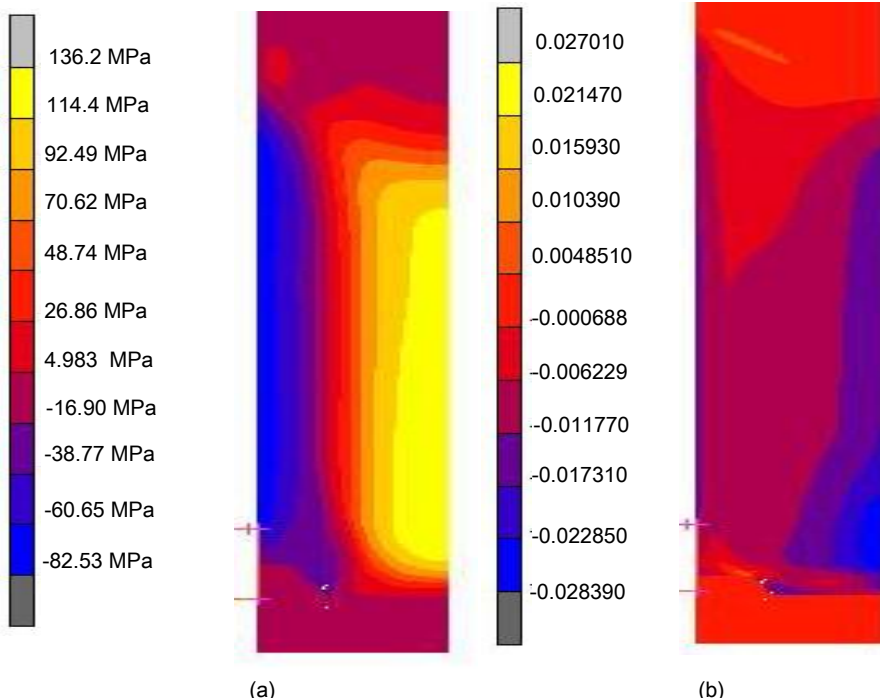
IV. PEMBAHASAN

IV.1 Simulasi Metode Elemen Hingga

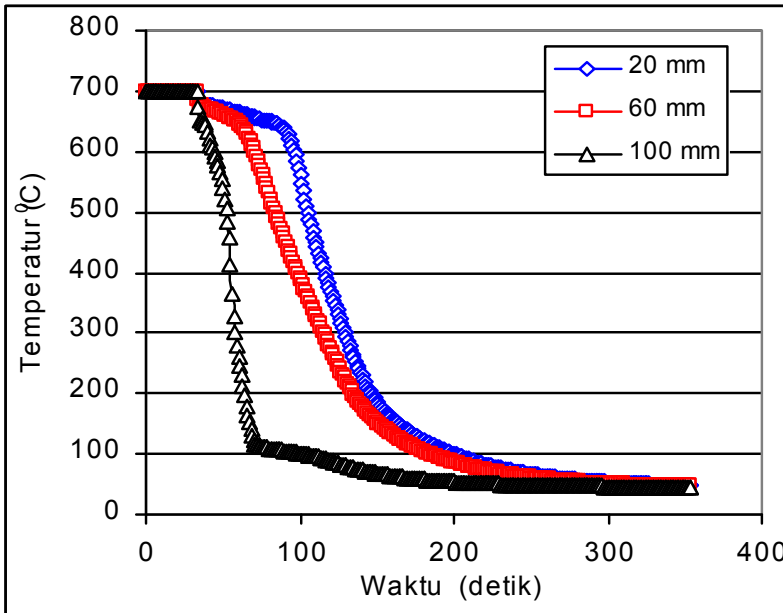
Hasil simulasi program MSC Marc ditunjukkan pada Gambar 4.1. dan Gambar 4.2. Gambar 4.1. Mempelihatkan fase yang terjadi selama proses pengecoran yaitu : fase padat (solid), fase Mushy, fase cair (liquid). Gambar 4.2a. dan Gambar 4.2b. menunjukkan tegangan dan regangan yang terjadi pada proses pengecoran direct-chill.



Gambar 4.1. Fase yang terjadi selama proses pengecoran, (hasil simulasi MSC Marc)

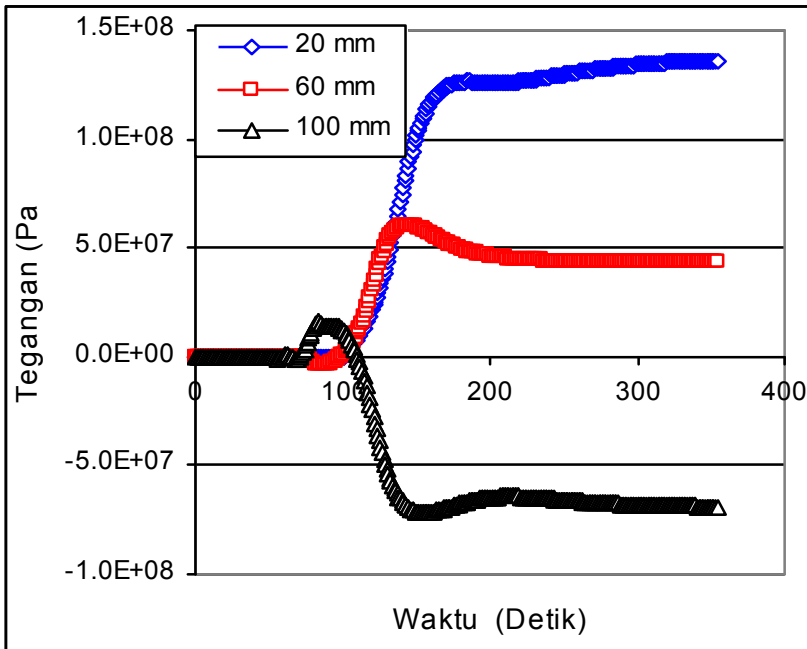


Gambar 4.2. Hasil simulasi MSC Marc, a) Tegangan (MPa), b) Regangan.

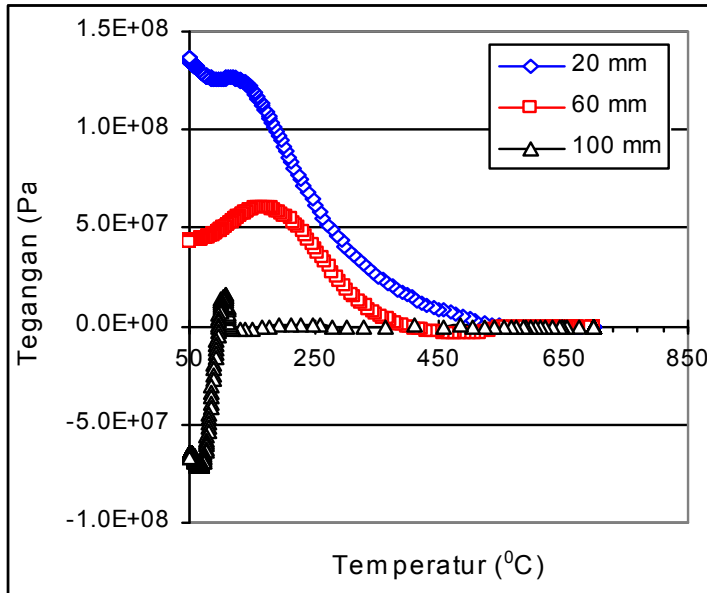


Gambar 4.3. Hasil simulasi MSC Marc, hubungan waktu terhadap temperatur

Hubungan waktu dengan temperatur billet hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 4.3. Kecepatan pendinginan yang dihasilkan berbeda sesuai dengan jarak dari titik pusat.



Gambar 4.4. Hasil simulasi MSC Marc, hubungan tegangan dan waktu



Gambar 4.5. Hasil simulasi MSC Marc, hubungan tegangan dan temperatur

Hubungan tegangan dan waktu ditunjukkan pada Gambar 4.4. Tegangan pada jarak 20 mm memiliki tegangan yang paling besar kemudian jarak 60 mm dan 100 mm dari titik pusat. Gambar 4.5. Menunjukkan hubungan antara tegangan dan temperatur, tegangan pada jarak 20 mm memiliki tegangan yang besar kemudian 60 mm dan 100 mm dari titik pusat. Tegangan yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. dan Gambar 4.5. Merupakan tegangan sisa yang terjadi pada billet. Hasil simulasi menunjukkan bahwa bagian tengah billet terjadi tegangan tekan sedang bagian permukaan terjadi tegangan tarik.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Selama proses pengecoran memperlihatkan tiga fase yaitu : fase padat (solid), fase Mushy, fase cair (liquid).
2. Hasil simulasi menunjukkan tegangan pada jarak 20 mm memiliki tegangan terbesar kemudian 60 mm dan 100 mm dari titik pusat pada temperature yang sama.
3. Kecepatan pendinginan paling cepat terjadi pada jarak,100 mm kemudian 60 mm dan 20 mm.
4. Pada bagian tengah billet terjadi tegangan tekan sedang bagian permukaan terjadi tegangan tarik

VI. DAFTAR PUSTAKA

1. Bremmer, J.A. and Percival, C.M. (1970) *Experimental Mechanics*
2. Suyitno, (2004), "Effects of Alloy Composition and Casting Speed on Structure Formation and Hot Tearing During Direct-Chill Casting of Al-Cu Alloys", Desertasi Doktor Delft University of Technology, Belanda
3. Suyitno, 2005, "Hot tearing and deformation in direct-chill casting of aluminum alloys", Desertasi Doktor Delft University of Technology, Belanda.
4. Touloukian, Y.S. and Buyco, E.H. (1970) *Thermophysical Properties of Matter; Volume 4 Specific Heat; Metallic Elements and Alloys*, IFI/Plenum Press, New York– Washington, USA.
5. Taylor, R.E., Groot, H., Goerz, T. Ferrier, J. and Taylor D.L. (1998) *High Temperature-High Pressure*, 30, p. 269.
6. Van Haften, W.M. (1997) *Thermophysical Properties of Certain Al Alloys*, Internal Report, Delft University of Technology, The Netherlands.