



TUGAS AKHIR – TL141584

**ANALISA PROSES PERPINDAHAN PANAS PADA
PENGECORAN PADUAN AL-12%SI DENGAN
METODE ELEMEN HINGGA**

MUHAMMAD BAHTIYAR FIRDAUS
NRP 2712 100 077

Dosen Pembimbing :
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
Dian Mughni Fellicia S.T., M.Sc.

**JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2016**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

**HEAT TRANSFER ANALYSIS IN AL-12%SI ALLOY
CASTING PROCESS USING FINITE ELEMENT
METHOD**

MUHAMMAD BAHTIYAR FIRDAUS
NRP 2712 100 077

Advisor Lecturer :
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
Dian Mughni Fellicia S.T., M.Sc.

**MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING
DEPARTEMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2016**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISA PROSES PERPINDAHAN PANAS PADA
PENGECORAN PADUAN AL-12%SI DENGAN METODE
ELEMEN HINGGA**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Metalurgi Manufaktur
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

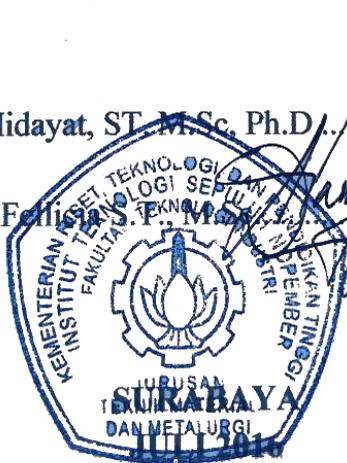
Oleh :

MUHAMMAD BAHTIYAR FIRDAUS

NRP. 2712100077

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

1. Mas Irfan P. Hidayat, ST, M.Sc, Ph.D..... (Pembimbing 1)
2. Dian Mughni Fellicia S.P., M.Sc..... (Pembimbing 2)



v

v

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

Analisa Proses Perpindahan Panas pada Pengecoran Paduan Al-12%Si dengan Metode Elemen Hingga

Nama : Muhammad Bahtiyar Firdaus
NRP : 2712100077
Jurusan : Teknik Material & Metalurgi
Dosen Pembimbing : Mas Irfan P.H., S.T., M.Sc., Ph.D.
Dian Mughni Fellicia S.T., M.Sc.

Abstrak

Piston merupakan salah satu komponen yang sangat penting bagi sebuah kendaraan. Di dalam sebuah industri, pembuatan piston dilakukan dengan pengecoran. Dalam proses pengecoran terdapat banyak fenomena umum yang tidak dapat dikontrol secara langsung seperti distribusi temperatur, tegangan termal, penyusutan serta deformasi cetakan. Oleh karena itu digunakan ANSYS Mechanical APDL yang berbasis metode elemen hingga untuk memprediksi fenomena dalam proses pengecoran. Digunakan pasir silika sebagai cetakan pasir dan SS304 sebagai permanent mold. Bahan coran yang digunakan adalah AL-12%Si. Ukuran piston Ninja 250R dijadikan referensi pada simulasi ini dimana memiliki dimensi bore dan stroke sebesar 62mm dan 41.2 mm. Pada penelitian ini didapatkan pola distribusi temperatur, tegangan termal dan juga shrinkage yang terjadi selama proses pengecoran dari kedua cetakan tersebut yang kemudian dibandingkan cetakan mana yang lebih baik.. Didapatkan nilai tegangan termal maksimum serta shrinkage sebesar $3.89E+09$ Pa dan 31135.5 mm^3 pada keseluruhan cetakan SS304 sedangkan pada keseluruhan cetakan pasir adalah $2.35E+08$ Pa dan 600 mm^3 . Untuk bagian coran nilai tegangan termal pada cetakan SS304 adalah 65228892.2 Pa dengan shrinkage sebesar 6.9457 mm^3 dan pada cetakan pasir sebesar 258718.87 Pa dan 0.025 mm^3 .

Kata Kunci: *Analisa elemen hingga, pengecoran, Al-12%Si, tegangan termal, distribusi temperatur, shrinkage.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Heat Transfer Analysis in Al-12%Si Alloy Casting Process using Finite Element Method

Name : Muhammad Bahtiyar Firdaus
SRN : 2712100077
Major : Material and Metallurgical
Engineering
Advisor Lecturer : Mas Irfan P.H., S.T., M.Sc., Ph.D.
Dian Mughni Fellicia S.T., M.Sc.

Abstract

Piston is an important component for vehicle's engine. In the industrial field, piston is usually produced by casting. In the casting process, there are a lot of phenomena which couldn't be controlled immediately such as temperature distribution, thermal stress, shrinkage and also deformation of mold. Therefore, ANSYS Mechanical APDL, which based on finite element method, was used to predict those uncontrolled phenomena during casting process. Silica sand was used as sand mold and SS304 was used as permanent mold. For casting material, Al-12%Si alloy was chosen. The dimension of Ninja 250R's piston was applied as reference in this simulation, which has 62 mm in bore and 41.2 mm in stroke. In this study, the contour plot of temperature distribution, thermal stress and shrinkage during the casting process between those different mold, was obtained. It was found that in all of SS 304 mold's section, the maximum thermal stress is $3.89E+09$ Pa and the shrinkage is 31135.5 mm³. And in all of sand mold's section, the maximum thermal stress is $2.35E+08$ Pa and the shrinkage is 600 mm³. For the casting part inside SS304 mold, the maximum stress is $1E+08$ Pa and shrinkage is 6.95 mm³. And inside sand mold, the maximum thermal stress is 258718.87 Pa also the shrinkage is 0.025 mm³.

Keywords: *finite element method, casting, Al-12%Si, thermal stress, temperature distribution, shrinkage.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas rahmat, nikmat serta hidayah-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Tugas Akhir yang berjudul **“Analisa Proses Perpindahan Panas pada Pengecoran Paduan Al-12%Si dengan Metode Elemen Hingga”** ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik dari Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik berkat bantuan, bimbingan, dan saran dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orangtua serta kakak penulis yang selalu memberikan dukungan kepada penulis dengan do'a, moral, tenaga, dan materi.
2. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D serta Ibu Dian Mughni Fellicia S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing serta Bapak Ibu dosen penguji yang selalu bersedia memberikan bimbingan dan pengarahan.
3. Bapak Agung Purniawan, S.T., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
4. Seluruh dosen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
5. Seluruh karyawan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
6. Seluruh teman-teman Jurusan Teknik Material dan Metalurgi angkatan 2012 serta Mbal yang mengajarkan cara menggunakan ANSYS mulai dari awal dan juga semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa penyusunan laporan Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu penulis selalu mengharapkan adanya kritik serta saran yang membangun dari berbagai pihak untuk perbaikan di masa yang akan datang.

Surabaya, Juni 2016

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
TITLE	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Permasalahan.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan Penelitian.....	2
1.5. Manfaat	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Pengecoran pada Paduan Aluminium-Silikon	5
2.2. Metode Elemen Hingga.....	9
2.3. Distribusi Temperatur, Transfer Panas dan Solidifikasi ..	13
2.4. Tegangan Termal.....	17
2.5. Penyusutan dalam Solidifikasi.....	18
2.6. Simulasi Pemodelan Pengecoran Logam.....	20
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1. Metode Penelitian.....	25
3.2. Spesifikasi Material	26
3.2.1. Material Al-12%Si.....	26
3.2.2. Material Cetakan Pasir.....	27
3.2.3. Material Cetakan Permanen (SS304).....	29
3.3. Proses Penelitian	31

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisa Termal	37
4.1.1. Distribusi Temperatur	38
4.1.2. Perbandingan Kurva Pendinginan di Dalam Material Coran	47
4.1.3. Perbandingan Kurva Pendinginan pada Cetakan	49
4.1.4. Perbandingan Gradien Temperatur	51
4.2. Analisa Struktural	52
4.2.1. Tegangan Termal	53
4.2.2. <i>Shrinkage</i>	57
4.2.3. Perbandingan Kurva Pendinginan di Dalam Material Coran	59
4.3. Kualitas Cetakan	61
4.4. Perbandingan Keseluruhan Hasil dari Cetakan SS304 serta Cetakan Pasir	63
4.5. Validasi	64

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan	67
5.2. Saran	68

DAFTAR ACUAN	69
---------------------------	----

BIODATA PENULIS

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Contoh dari <i>permanent mold casting</i>	7
Gambar 2.2	Elemen balok satu dimensi.....	9
Gambar 2.3	Ilustrasi ketiga daerah penyusutan di dalam <i>liquid</i> , selama pembekuan, dan di dalam solid.....	19
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	25
Gambar 3.2	Geometri Cetakan dan Material Coran	31
Gambar 3.3	Diagram Alir Pemodelan.....	32
Gambar 3.4	a. <i>Meshing</i> dari Material Coran Al-12%Si b. <i>Meshing</i> dari Material Cetakan (Cetakan Pasir & SS304) c. <i>Meshing</i> Gabungan Antara Cetakan dengan Al-12%Si.....	33
Gambar 3.5	Pemodelan Sifat-Sifat Material.....	34
Gambar 4.1	Hasil percobaan dari pengecoran selama 60 detik pada (a) cetakan SS304 penuh (b) setengah dari cetakan SS304.....	39
Gambar 4.2.	Distribusi Temperatur Cetakan SS304 pada (a) 60 detik (b) 360 detik (c) 660 detik (d) 960 detik (e) 1260 detik (f) 1800 detik (g) 3600 detik (h) 5400 detik	39
Gambar 4.3	Hasil percobaan dari pengecoran selama 60 detik pada (a) cetakan pasir penuh (b) setengah dari cetakan pasir.....	42
Gambar 4.4	Distribusi Temperatur Cetakan Pasir pada (a) 60 detik (b) 360 detik (c) 660 detik (d) 960 detik (e) 1260 detik (f) 1800 detik (g) 3600 detik (h) 5400 detik	43
Gambar 4.5	Distribusi temperatur di dalam material coran dari (a) cetakan SS304 dan (b) cetakan pasir selama 5400 detik	46
Gambar 4.6	Distribusi temperatur di dalam cetakan dari (a) cetakan SS304 dan (b) cetakan pasir selama 5400 detik.	46

Gambar 4.7 Kurva perbandingan penurunan temperatur di dalam coran selama pendinginan pada cetakan SS304 serta cetakan pasir.....	47
Gambar 4.8 Kurva perbandingan penurunan temperatur di dalam cetakan selama pendinginan pada cetakan SS304 serta cetakan pasir.....	49
Gambar 4.9 Gradien temperatur pada (a) dengan cetakan SS304 (b) dengan cetakan pasir pada detik ke 60...	51
Gambar 4.10 Gradien temperatur pada (a) dengan cetakan SS304 (b) dengan cetakan pasir pada detik ke 5400.....	51
Gambar 4.11 Tegangan termal pada (a) cetakan SS304 dan (b) cetakan pasir saat 60 detik.....	53
Gambar 4.12 Tegangan termal pada (a) cetakan SS304 dan (b) cetakan pasir saat 5400 detik.....	53
Gambar 4.13 Perbandingan Nilai Tegangan Termal pada (a) cetakan SS304 serta (b) cetakan pasir selama pengecoran	54
Gambar 4.14 Tegangan Termal pada Material Coran pada (a) cetakan SS304 dan (b) pasir saat 60 detik.....	55
Gambar 4.15 Tegangan Termal pada Material Coran pada (a) cetakan SS304 dan (b) pasir saat 5400 detik.....	55
Gambar 4.16 Perbandingan Nilai Tegangan Termal di dalam coran pada (a) cetakan SS304 serta (b) cetakan pasir selama pengecoran.....	56
Gambar 4.17 Deformasi yang terjadi pada cetakan (a) SS304 dan (b) pasir pada 5400 detik	58
Gambar 4.18 Deformasi yang terjadi pada daerah coran pada (a) cetakan SS304 dan (b) cetakan pasir pada 5400 detik.....	58
Gambar 4.19 Kurva Kenaikan Massa Jenis pada Coran.....	60
Gambar 4.20 Perbandingan Distribusi Temperatur Penelitian ..	64
Gambar 4.21 Perbandingan Penyusutan yang Terjadi pada Penelitian.....	65

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat dari paduan Al-12%Si	8
Tabel 3.1 Komposisi Paduan Aluminium Al-12%Si	26
Tabel 3.2 Modulus Elastisitas, Poisson Ratio serta Koefisien Ekspansi Termal Paduan Al-12%Si	26
Tabel 3.3 Konduktifitas Termal, Kapasitas Panas Spesifik serta Massa Jenis Paduan Al-12%Si	27
Tabel 3.4 Komposisi Paduan Pasir Silika	28
Tabel 3.5 Modulus Elastisitas dan Poisson Ratio serta Koefisien Ekspansi Termal Cetakan Pasir	28
Tabel 3.6 Konduktifitas Termal dan Kapasitas Panas Spesifik serta Massa Jenis Cetakan Pasir	29
Tabel 3.7 Komposisi SS304.....	29
Tabel 3.8 Modulus Elastisitas, Poisson Ratio serta Koefisien Ekspansi Termal dari SS304	30
Tabel 3.9 Konduktifitas Termal, Koefisien Panas Spesifik serta Massa Jenis dari SS304	30
Tabel 4.1 Pengaturan Simulasi Transien Termal	37
Tabel 4.2 Perbandingan temperatur di dalam coran pada cetakan pasir serta coran selama beberapa detik	48
Tabel 4.3 Perbandingan temperatur di dalam cetakan pada cetakan pasir serta coran selama beberapa detik	50
Tabel 4.4 Pengaturan Analisa Struktural	52
Tabel 4.5 Perbandingan Nilai Tegangan Termal antara Cetakan SS304 dengan Cetakan Pasir di Berbagai Waktu	56
Tabel 4.6 <i>Shrinkage</i> maksimum yang terjadi selama proses pengecoran	59
Tabel 4.7 Volume Material Coran pada Berbagai Waktu	60
Tabel 4.8 Formula Kualitas Cetakan Pengecoran.....	61
Tabel 4.9 Nilai Kualitas Cetakan Pengecoran.....	62
Tabel 4.10 Perbandingan Keseluruhan Hasil Cetakan SS304 dengan Cetakan Pasir	63

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Proses pengecoran logam merupakan proses yang telah lama ada dan banyak diaplikasikan dalam dunia industri. Proses ini dimulai dengan menuangkan logam cair ke dalam cetakan (*mold*) yang memiliki rongga (*cavity*) dilanjutkan dengan proses solidifikasi kemudian setelah proses solidifikasi selesai cetakan (*mold*) disingkirkan sehingga hasil dari pengecoran tersebut dapat diproses ke dalam proses selanjutnya.

Dalam pelaksanaannya pengecoran memiliki banyak keuntungan seperti dapat mencetak bentuk yang rumit, mencetak produk yang sangat besar dan juga dapat digunakan untuk berbagai macam logam sehingga sangat cocok untuk kebutuhan produksi secara massal. Namun pada pelaksanaannya terdapat beberapa kesulitan untuk mengontrol hasil pengecoran dimana sangat bergantung pada karakteristik lelehan logam yang sangat berhubungan dengan sifat-sifat termal serta struktur dari logam dan paduan yang digunakan. Dan juga banyak faktor lain seperti kelarutan gas, material dan bentuk dari cetakan (*mold*) itu sendiri dimana akan mempengaruhi distribusi temperatur selama proses pengecoran, munculnya tegangan termal, *shrinkage*, serta mempengaruhi proses solidifikasi hasil coran itu sendiri. Sehingga dalam kasus ini diperlukan penelitian agar hasil dari pengecoran tersebut sesuai dengan standar yang diinginkan baik dalam skala industri maupun skala yang lebih kecil lagi.

Dalam perjalanannya, eksperimen pengecoran memakan waktu dan biaya dikarenakan banyaknya variabel yang berpengaruh pada hasil coran. Untuk meningkatkan efisiensi dan melihat semua proses pengecoran, peneliti menggunakan analisa numerik yaitu metode elemen hingga. Dengan analisa hasil dari proses pengecoran seperti defect yang terjadi, *shrinkage*, kecepatan solidifikasi, *internal crack*, distribusi temperatur serta tegangan



termal yang terjadi baik saat proses pengecoran maupun pasca pengecoran dapat diprediksi.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana distribusi temperatur yang terjadi selama proses pengecoran?
2. Bagaimana tegangan termal yang terjadi selama proses pengecoran?
3. Bagaimana pengaruh distribusi temperatur serta tegangan termal terhadap *shrinkage* yang terjadi selama proses pengecoran?
4. Material manakah yang paling cocok digunakan sebagai cetakan aluminium paduan Al-12%Si dalam proses pengecoran?

1.3. Batasan Masalah

Untuk mendapatkan hasil penelitian yang akurat serta tidak menyimpang maka diperlukan batasan masalah sebagai berikut :

1. Dianggap tidak ada inklusi benda asing di dalam rongga cetak.
2. Material cetakan serta material coran dianggap homogen.
3. Bagian dasar cetakan dianggap menyentuh tanah sehingga tidak terjadi konveksi.
4. Dianggap fenomena perpindahan panas hanya terjadi pada riser dan rongga cetak.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan yang diharapkan dari penelitian adalah :

1. Menganalisis distribusi temperatur yang terjadi selama proses pengecoran.



2. Menganalisis tegangan termal yang terjadi selama proses pengecoran.
3. Menganalisis pengaruh distribusi temperatur serta tegangan termal terhadap *shrinkage* yang terjadi selama proses pengecoran.
4. Menganalisis material manakah yang paling cocok digunakan sebagai cetakan aluminium paduan Al-12%Si dalam proses pengecoran.

1.5. Manfaat

Dengan penelitian ini diharapkan dapat diketahui pengaruh dari material cetakan (*mold*) terhadap distribusi temperatur serta tegangan termal yang terjadi pada saat pengecoran maupun hasil coran sehingga dapat dimanfaatkan sebagai referensi dunia pengecoran serta penelitian berikutnya khususnya di Teknik Material dan Metalurgi ITS.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengecoran pada Paduan Aluminium-Silikon

Dalam pelaksanaannya, proses pengecoran logam dikategorikan menjadi *expendable mold* dimana cetakan pada jenis pengecoran ini tidak dapat digunakan kembali. Di dalam *expendable mold*, terdapat *sand casting* dimana bahan cetakan yang digunakan adalah pasir silika, kemudian ada *Evaporative (Lost-Foam) Pattern Casting (EPC)* yang merupakan pengembangan dari *sand casting*. Berbahan cetakan pasir yang tak terikat dengan sebuah pola *expendable* polystyrene. Prosesnya hampir sama dengan *investment casting* namun pada model ini pola yang ada menguap selama proses penuangan dari logam cair. Selanjutnya ada *shell mold casting*. Di dalam *shell mold casting*, logam cair dituangkan ke dalam cetakan tipis (sekitar 10-20 mm) yang terbuat dari pasir yang dilekatkan dengan resin. Cetakan dihasilkan melalui pemanasan benda yang diperoleh dari proses pengerasan kimiawi bahan resinoid, dengan demikian maka akan diperoleh bentuk dan ukuran yang akurat dari cetakan yang diinginkan (Gilbert, 2004).

Di dalamnya terdapat *sand casting*, *shell mold casting* serta *investment casting*. Dan *non-expendables mold* yang terdiri dari *permanent mold casting*, serta *centrifugal casting*.

1. Sand casting

Termasuk di dalam *expendable mold casting process*. Adalah proses pembentukan benda kerja dengan metoda penuangan logam cair ke dalam cetakan pasir (*sand casting*). Cetakan pasir ini sendiri dapat diartikan sebagai rongga hasil pembentukan dengan cara mengikis berbagai bentuk benda pada bongkahan dari pasir yang kemudian rongga tersebut diisi dengan logam yang telah dicairkan melalui pemanasan (*molten metals*).



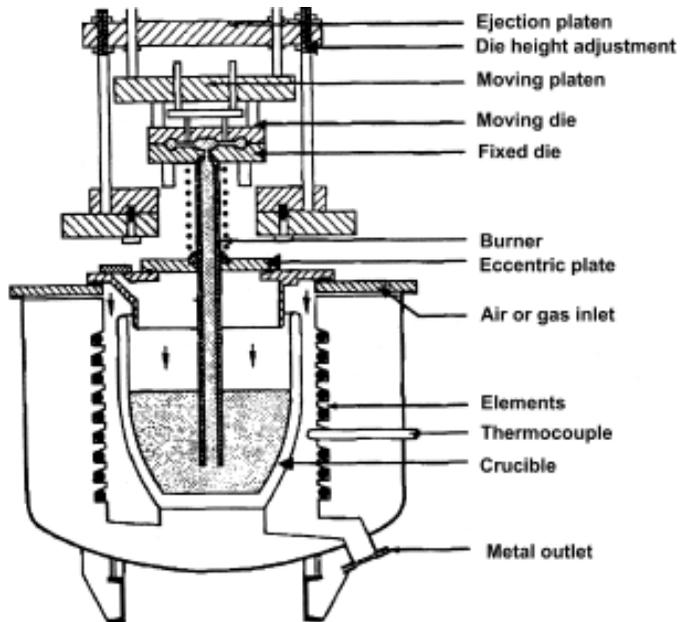
Bagian-bagian dari cetakan pasir sendiri antara lain meliputi :

1. Pola (*pattern*)
Memiliki bentuk dan ukuran yang sama dengan bentuk asli dari benda kerja yang dikehendaki.
2. Inti (*core*)
Berfungsi sebagai bingkai untuk melindungi struktur model yang akan dibentuk sehingga cetakan tidak berubah bentuk saat terjadi proses pengecoran.
3. Cetakan atas (*Cope*)
Merupakan bagian atas cetakan pasir
4. Cetakan bawah (*Drag*)
Merupakan setengah bagian bawah dari cetakan pasir.
5. *Gate*
Adalah lubang dimana logam cair nantinya akan dituangkan, berada di antara *core* dan *drag*.
6. *Riser*
Adalah lubang yang berfungsi sebagai tempat untuk menambahkan logam cair agar tidak ada rongga yang kosong di dalam ruang cetakan.

2. *Permanent Mold Casting*

Pada *permanent mold casting*, bahan yang digunakan sebagai cetakan adalah logam yang pada penggunaannya cetakan jenis ini dapat digunakan berkali-kali.

Pada dasarnya pembuatan *permanent mold* tidaklah murah seperti *sand casting* ataupun *expendable mold* lainnya. Namun dengan penggunaan jenis mold ini kita akan mendapat keuntungan yaitu laju produksinya yang sangat tinggi. Cetakan ini terdiri atas dua atau lebih bagian yang digabung dengan sekrup, klam, plat atau alat lain yang dapat dilepas setelah produk mengeras. *Permanent mold casting* mempunyai hasil akhir permukaan yang bagus dan detail yang tajam (Gilbert, 2004).



Gambar 2.1 Contoh dari *permanent mold casting* (Gilbert,2004)

Pada industri manufaktur kendaraan seperti mobil serta pesawat sering menggunakan paduan Al-Si dikarenakan memiliki perbandingan kekuatan dibanding massanya tinggi (Basavakumar, 2007).

Paduan Al-Si ini memiliki sifat mampu cor dan mampu alir yang sangat baik, mempunyai permukaan yang bagus, memiliki ketahanan korosi yang baik, berat jenisnya ringan, serta pada titik eutektik 850K, paduan Al-12%Si memiliki titik cair yang rendah sehingga cocok untuk dijadikan sebagai paduan tuang. Di dalamnya, Si merupakan komponen utama dan sangat penting di dalam paduan aluminium-silikon. Biasanya memiliki konsentrasi sekitar 5 – 12 wt.% di dalam paduan hipoeutektik. Si ini memiliki sifat *castability* yang sangat baik, yaitu mudah untuk membentuk hasil pengecoran yang berkualitas. Semakin banyak Si di dalam paduan, maka semakin rendah pula koefisien ekspansi termalnya.



Si juga merupakan fasa yang sangat keras dimana berpengaruh pada ketahanan aus suatu paduan. Dengan mengkombinasikan Si dengan unsur lain maka akan meningkatkan kekuatan suatu paduan serta membuat paduan tersebut semakin mudah untuk diberi perlakuan panas.

Konsentrasi Si pada paduan Al-Si berpengaruh pada sifat mekaniknya. Hal ini disebabkan karena transfer muatan dari matriks α -Al ke dalam pelat Si yang saling berhubungan. Muatan tersebut membuat Si eutektik dapat dikurangi dengan spheroidisasi yang akan menambah *machinability*, keuletan serta ketahanan fatigue dari paduan tersebut (Zamani, 2015).

Beberapa *properties* (sifat-sifat) dari paduan Al-12%Si dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut :

Tabel 2.1 Sifat dari paduan Al-12%Si (Xin-ping, 2011)

Parameter	Al-Si
$c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	837
$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2650
$\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	155 (293K)
	168 (850K)
	77 (873K)
	83 (973K)
$\Delta H / (\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$	0 (293K)
	1.24×10^9 (850K)
	2.321×10^9 (873K)
	2.586×10^9 (973K)
<i>Pouring temperature</i> /K	963
<i>Eutectic temperature</i> /K	850
<i>Composition, w/%</i>	Si 12, Al Balance



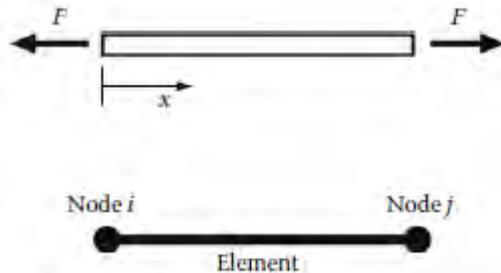
2.2. Metode Elemen Hingga

Membagi daerah atau luasan menjadi sebuah elemen merupakan langkah utama dari sebuah metode elemen hingga. Dimana *mesh* adalah distribusi dari elemen itu sendiri. Dan elemen-elemen itu sendiri dihubungkan oleh *nodes*. Kemudian setelah area tersebut didiskretisasi langkah selanjutnya adalah menentukan persamaan untuk setiap elemen yang dibutuhkan. Misalnya sifat-sifat termal suatu material seperti konduktifitas termal yang mana persamaan dari elemen itu nantinya akan digabungkan untuk menentukan persamaan global untuk meshnya dimana menggambarkan perubahan dari seluruh bagian secara umum (Alawadhi, 2010). Secara umum, persamaan globalnya dapat dilihat pada persamaan 2.1.

$$[K]\{A\} = \{B\} \quad (2.1)$$

dimana $[K]$ merupakan *stiffness matrix*, $\{A\}$ adalah derajat kebebasan nodal, perpindahan dari analisa struktural ataupun temperatur pada analisa termal. Dan kemudian $\{B\}$ merupakan gaya luar nodal, gaya pada analisa struktural, serta *heat flux* untuk analisa termal. Matrik $[K]$ merupakan matrik singular sehingga tidak dapat dibalik.

Pada gambar 2.2 diketahui sebuah balok satu dimensi dengan panjang awal L yang akan dikenai uji tarik, dengan luas A . Maka balok tersebut dapat dimodelkan dengan elemen tunggal dengan dua node, yaitu i dan j sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Elemen balok satu dimensi (Alawadhi, 2010)



Dimana, $d(x)$ merupakan perpindahan dari balok dan bervariasi secara linear sepanjang balok, maka rumus dari perpindahan tersebut dapat digambarkan menjadi persamaan 2.2.

$$d(x) = a + bx \quad (2.2)$$

Perpindahan pada *node* I dan j adalah d_i dan d_j . Maka dapat juga digambarkan pada persamaan 2.3.

$$d_i(x) = a + bx_i \quad (2.3)$$

dan juga persamaan 2.4.

$$d_j(x) = a + bx_j \quad (2.4)$$

dimana pada gambar 2.2 tadi, x_i merupakan kordinat pada sumbu x untuk *node* i, dan x_j adalah koordinat pada sumbu x untuk *node* j.

dengan menyelesaikan rumus a dan b maka didapatkan persamaan 2.5 dan 2.6.

$$a = \frac{(dix_i - djx_j)}{L} \quad (2.5)$$

$$b = \frac{(di - dj)}{L} \quad (2.6)$$

L adalah panjang dari elemen, $L = x_j - x_i$. Langkah selanjutnya adalah mensubstitusi a dan b ke dalam persamaan pergeseran (pada rumus 2.2) sehingga persamaannya menjadi persamaan 2.7.

$$a = \frac{(dix_i - djx_j)}{L} di + \frac{(x - x_i)}{L} dj \quad (2.7)$$



atau persamaan 2.8.

$$d(x) = Nidi - Nj dj \quad (2.8)$$

Ni dan Nj disebut *shape function* dari sebuah elemen. Ketika balok tersebut diberi beban, maka akan berada pada posisi kesetimbangan. Jumlah dari energi regangan (γ) dan usaha yang dilakukan oleh daya dari luar disebut energy potensial dari balok (π). Energi potensial dari balok dapat dirumuskan menjadi persamaan 2.9.

$$\pi = \gamma - w \quad (2.9)$$

Untuk elemen balok tunggal, energi regangannya sesuai dengan persamaan 2.10.

$$\gamma = \int_{xj}^{xi} \frac{1}{2} \sigma \epsilon A dx \quad (2.10)$$

Energi regangan dapat juga ditulis sebagai persamaan 2.11 dikarenakan regangan berhubungan erat dengan modulus Young ($\sigma = E\epsilon$).

$$\gamma = \frac{AE}{2} \int_{xj}^{xi} \epsilon^2 dx \quad (2.11)$$

Regangan ini memiliki nilai yang sama dengan elongasi dari balok dalam arah sumbu x, sebagaimana persamaan 2.12

$$\epsilon = \frac{(dj - di)}{L} \quad (2.12)$$



Maka, energi regangan pada persamaan 2.11 menjadi persamaan 2.13

$$\gamma = \frac{AE}{2L} (dj - di)^2 \quad (2.13)$$

Jika dimasukkan ke dalam bentuk matrik maka ditampilkan seperti persamaan 2.14.

$$\gamma = \frac{AE}{2L} [di \quad dj] \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} di \\ dj \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \{d\}^T [K] \{d\} \quad (2.14)$$

Kerja yang dilakukan oleh gaya ada *node* dapat ditulis persamaan 2.15.

$$w = diFi + djFj = \{d\}^T \{F\} \quad (2.15)$$

Untuk elemen balok tunggal, energi potensialnya menjadi seperti persamaan 2.16.

$$\gamma = \frac{1}{2} \{d\}^T [K] \{d\} - \{d\}^T \{F\} \quad (2.16)$$

Untuk energi potensial minimum, perpindahannya menjadi seperti persamaan 2.17.

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \{d\}} = 0 \quad (2.17)$$

Maka persamaan 2.16 menjadi persamaan 2.18.

$$[K] \{d\} - \{F\} = 0 \quad (2.18)$$

sehingga persamaannya menjadi seperti persamaan 2.19.

$$\begin{Bmatrix} Fi \\ Fj \end{Bmatrix} = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} ui \\ uj \end{Bmatrix} \quad (2.19)$$



Penurunan di atas, hanya *valid* pada satu elemen balok saja. Pada kenyataannya, suatu benda pasti akan terbuat dari beberapa elemen dengan sifat-sifat yang berbeda pula. Sehingga total dari energi potensialnya ditampilkan pada persamaan 2.20.

$$\pi = \sum_{e=1}^E (\gamma^e - w) \quad (2.20)$$

Persamaan 2.20 disederhanakan menjadi persamaan 2.21.

$$\sum_{e=1}^E [K^e] \{d\} - \{F\} = 0 \quad (2.21)$$

2.3. Distribusi Temperatur, Transfer Panas dan Solidifikasi

Di dalam pemodelan ini, digunakan persamaan konservasi panas untuk menyelesaikan permasalahan aliran panas di dalamnya. Seperti yang dilihat pada persamaan 2.22.

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_p \underline{u} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2.22)$$

dengan C_p adalah *specific heat*, T adalah temperatur, k adalah konduktifitas termal dan ρ adalah massa jenis (Yang, 2015).

Logam cair akan kehilangan panas ketika dituangkan ke dalam rongga cetak. Sedangkan cetakan akan mengalami pertambahan panas dikarenakan transfer panas dari logam cair tadi. Selama proses ini, transfer panas dari atas dan dinding ditampilkan pada persamaan 2.23

$$Q_t = Q_T \cdot t_1 \quad (2.23)$$

dimana Q_t adalah jumlah kehilangan panas total dari atas dan dinding, Q_T adalah laju transfer panas total baik dari konveksi dan radiasi dari atas dan konduksi yang melalui dinding. Sedangkan waktu yang diperlukan untuk transfer panas atau dengan kata lain waktu solidifikasi awal dilambangkan dengan t_1 .



Pada penggunaannya, transfer panas yang bekerja pada proses pengecoran adalah konveksi, konduksi dan radiasi sehingga laju transfer panas totalnya ditampilkan pada persamaan 2.24.

$$Q_T = Q_{T1} + Q_{T2} + Q_{T3} \quad (2.24)$$

Dapat dilihat bahwa transfer panas secara konveksi, dan radiasi dari permukaan atas, konduksi yang melalui dinding, konveksi dan radiasi dari permukaan cetakan yang dipanaskan diwakilkan dengan $Q_{T1} + Q_{T2} + Q_{T3}$.

Untuk mencari Q_{T1} yang merupakan laju transfer panas dengan konveksi dan radiasi dari bagian atas dapat digunakan persamaan 2.25.

$$Q_{T1} = (h + h_r)_T \cdot A_T \cdot (\bar{T} - T_\infty) \quad (2.25)$$

Sedangkan nilai dari $\bar{T} = \frac{1}{2}(T_p + T_m)$. Koefisien transfer panas dilambangkan h dan h_r . A_T adalah luasan dari permukaan atas dari cetakan dan T_∞ adalah temperatur cetakan.

Kemudian laju transfer panas dengan konduksi dituliskan pada persamaan 2.26.

$$Q_{T2} = \frac{(T_p - T_\infty)}{R_t} \quad (2.26)$$

Pada persamaan 2.26 ini, T_p dan T_∞ adalah temperatur dalam dan luar dari cetakan dan R_t adalah ketahanan termal dari dinding cetakan. Namun, sering kali R_t ini diabaikan dikarenakan

Kemudian laju transfer panas konveksi dan radiasi untuk dinding cetakan luar yang dipanaskan menggunakan persamaan 2.27.

$$Q_{T3} = (h + h_r)_{T_s} \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.27)$$



T_s adalah temperatur permukaan cetakan, T_∞ adalah temperatur dari lingkungan sekitar cetakan. H dan h_r adalah koefisien transfer panas. A adalah luasan dari permukaan cetakan yang dipanaskan terhadap lingkungan.

Sehingga total dari laju panas sesuai persamaan 2.24 menjadi

$$Q_T = (h + h_r)_T \cdot A_T \cdot (\bar{T} - T_\infty) + \frac{(T_p - T_\infty)}{R_t} + (h + h_r)_{T_s} \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.28)$$

Sebenarnya, Q_t adalah proses hilangnya panas dari suatu logam yang biasanya dianggap sebagai panas *sensible*. Ditampilkan pada persamaan 2.29 dan 2.30.

$$Q_t = mC_p \Delta T \quad (2.29)$$

$$Q_t = mC_p (T_p - T_m) \quad (2.30)$$

Dimana C_p adalah *specific heat* dari logam, T_p dan T_m adalah temperatur saat penuangan serta temperatur lelehan, sedangkan m adalah massa logam yang dituangkan.

Kemudian, persamaan 2.29 digabungkan dengan persamaan 2.30 sehingga menghasilkan persamaan 2.31

$$t_1 = \frac{mC_p(T_p - T_m)}{(h + h_r)_{\bar{T}} \cdot A_T \cdot (\bar{T} - T_\infty) + \frac{(T_p - T_\infty)}{R_t} + (h + h_r)_{\bar{T}} \cdot A_T \cdot (T_s - T_\infty)} \quad (2.31)$$

Persamaan 2.31 merupakan persamaan untuk mencari solidifikasi selama penuangan.

Kemudian, langkah selanjutnya adalah transfer panas pembentukan. Transformasi fasa akan terjadi ketika logam kehilangan panas *sensible* dan mencapai temperatur lelehnya.

Pada dasarnya persamaannya sama dengan perpindahan panas saat logam dituangkan sehingga dapat dirumuskan seperti persamaan 2.32.

$$Q_t = Q_T \cdot t_2 \quad (2.32)$$



dimana Q_t adalah jumlah kehilangan panas total dari atas dan dinding, Q_T adalah laju transfer panas total baik dari konveksi dan radiasi dari atas dan konduksi yang melalui dinding. Sedangkan waktu yang diperlukan untuk transfer panas atau dengan kata lain waktu solidifikasi kedua dilambangkan dengan t_2 .

Sama seperti tadi, transfer panas yang bekerja pada proses pengecoran adalah konveksi, konduksi dan radiasi sehingga laju transfer panas totalnya diampilkkan pada persamaan 2.33.

$$Q_T = Q_{T1} \cdot Q_{T2} \cdot Q_{T3} \quad (2.33)$$

Transfer panas secara konveksi, dan radiasi dari permukaan atas, konduksi yang melalui dinding, konveksi dan radiasi dari permukaan cetakan yang dipanaskan diwakilkan dengan $Q_{T1} \cdot Q_{T2} \cdot Q_{T3}$.

Berbeda dengan persamaan (2.4.4), (2.4.5) serta (2.4.6). Pada tahap ini T diganti menjadi T_m dikarenakan ini adalah temperatur saat koefisien transfer panas selama konduksi pada tahap kedua.

Apabila digabungkan, maka didapat persamaan 2.34.

$$Q_T = (h + h_r)_T \cdot A_T \cdot (T_m - T_\infty) + \frac{(T_m - T_\infty)}{R_t} + (h + h_r)_{T_s} \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.34)$$

Di tahap ini, total dari *heat loss* ditampilkan pada persamaan 2.35.

$$Q_t = mH_f \quad (2.35)$$

Diketahui bahwa m adalah massa dari logam sedangkan H_f adalah panas pembentukannya. Ketika persamaan 2.34 dan 2.35 digabungkan akan menjadi persamaan 2.36.

$$t_2 = \frac{mH_f}{(h+h_r)_{T_m} \cdot A_T \cdot (T_m - T_\infty) + \frac{(T_m - T_\infty)}{R_t} + (h+h_r)_{T_s} \cdot A_T \cdot (T_s - T_\infty)} \quad (2.36)$$



Dimana t_2 adalah waktu solidifikasi pada tahap kedua yaitu ketika logam berubah dari fasa liquid ke solid.

Sehingga didapatkan waktu solidifikasi total yang ditampilkan pada persamaan 2.37.

$$t = t_1 + t_2 \quad (2.37)$$

2.4. Tegangan Termal

Tegangan termal perlu dipelajari dikarenakan dapat menyebabkan patahan serta deformasi plastis di dalam suatu benda. Definisi dari tegangan termal sendiri adalah tegangan yang berada di dalam suatu benda sebagai akibat dari perubahan temperatur. Dimisalkan saja suatu batang solid yang homogen serta isotropi, ketika dipanaskan ataupun didinginkan maka panas yang terjadi akan merata ke seluruh bidang sehingga tidak terjadi gradient temperatur. Maka batang tersebut tidak terkena tegangan apapun. Namun jika diberi pergerakan aksial maka akan mulai terjadi tegangan termal di dalamnya (Callister, 2009). Besaran tegangan σ sebagai akibat dari perubahan temperatur T_0 ke T_f ditampilkan pada persamaan 2.38.

$$\sigma = E \alpha_1 (T_0 - T_f) = E \alpha_1 \Delta T \quad (2.38)$$

Dimana E adalah modulus elastisitas dan α_1 adalah koefisien linier dari ekspansi termal. Selama pemanasan ($T_f > T_0$) serta tekanan kompresif kurang dari 0.

Kemudian ketika benda solid dipanaskan atau didinginkan, distribusi temperatur internal juga tergantung oleh bentuk, ukuran, konduktifitas termal, dan rentang perubahan temperaturnya. Tegangan termal kemungkinan sebagai akibat dari gradien temperatur yang melewati benda, yang sering diakibatkan oleh pemanasan atau pendinginan cepat. Dengan demikian bagian luar material temperaturnya berubah lebih cepat dibandingkan bagian dalamnya. Sebagai contoh ketika suatu material dipanaskan, maka bagian permukaan dari material tersebut akan mengembang lebih



cepat dibandingkan dengan bagian dalamnya sehingga terjadi tegangan termal. Hal tersebut juga berlaku untuk pendinginan dimana pada pendinginan, bagian luar dari suatu material akan menyusut lebih cepat daripada bagian dalam material.

Secara umum, untuk menganalisa tegangan termal selama proses pengecoran menggunakan persamaan Young and Wang sebagai berikut.

$$\Delta\sigma_{xx}^n = \Delta\sigma_{yy}^n = (\varphi(\Delta\xi^n) - 1)\sigma_{xx}^n + \Gamma(\Delta\xi^n)(\alpha - 1)3k\Delta e_{th}^n \quad (2.39)$$

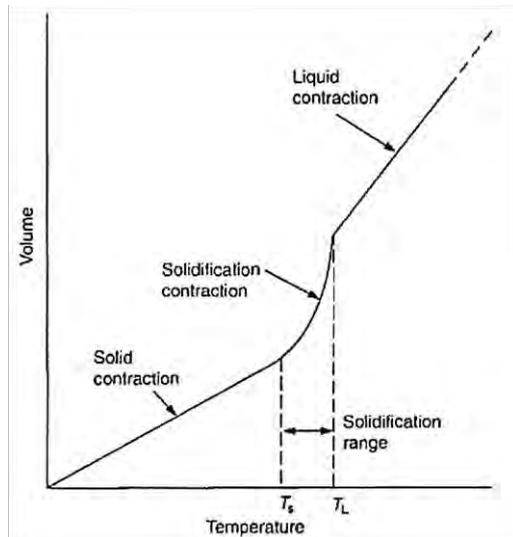
Dimana σ_{xx} dan σ_{yy} adalah tegangan normal, ξ adalah skala waktu yang telah dimodifikasi, e_{th} adalah regangan termal, dan k adalah *bulk* modulus.

2.5. Penyusutan dalam Solidifikasi

Untuk kebanyakan logam, transformasi dari liquid ke solid diperoleh dari penyusutan volume. Di dalam paduan aluminium, shrinkage yang muncul selama proses solidifikasi memiliki rentang sekitar 3.5 sampai 8.5%. Kecenderungan untuk terbentuknya shrinkage berhubungan dengan fraksi volume liquid maupun solid pada akhir solidifikasi dan rentang temperatur solidifikasi dari paduan itu sendiri.

Shrinkage muncul selama proses solidifikasi dikarenakan perbedaan volumetrik antara fasa solid dengan liquid. Oleh karena itu sangat penting untuk mengetahui terlebih dahulu perbedaan antara volume liquid dan solid yang menjadi komponen utama dalam pengecoran serta kontraksi yang terjadi setelah solidifikasi sebagai hasil dari kontraksi solid-state yang menjadi patokan utama dalam pembuatan desain serta pattern dalam cetakan.

Terdapat tiga kontraksi selama pendinginan dari keadaan cair ke temperatur kamar (Campbell, 2003). Kontraksi tersebut dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Ilustrasi ketiga daerah penyusutan di dalam liquid, selama pembekuan, dan di dalam solid (Campbell, 2003)

1. Saat temperatur berkurang, kontraksi pertama terjadi di dalam fasa liquid. Di dalam proses pengecoran penyusutan di dalam daerah ini tidak membawa masalah. Bahkan seringkali diabaikan.
2. Adanya kontraksi pada zona solidifikasi ini mulai menimbulkan masalah. Kontraksi muncul pada titik pembekuan, hal ini dikarenakan lebih padatnya solid dibandingkan liquid. Masalah yang terjadi di daerah ini antara lain dibutuhkannya feeding, serta porositas penyusutan (*shrinkage porosity*).
3. Merupakan tahap akhir dari penyusutan di dalam fasa solid yang dapat menyebabkan beberapa masalah. Sesuai dengan laju pendinginan, maka cetakan juga mengalami penyusutan. Sehingga sangat sulit untuk memprediksi ukuran dari pattern yang kita buat. Permasalahan ini juga dapat menyebabkan beberapa masalah lainnya antara lain *hot tearing* serta retak pada cetakan.



Terdapat dua jenis porositas penyusutan, yaitu penyusutan dalam dan penyusutan luar.

1. Penyusutan Dalam

Penyusutan ini disebabkan karena penyusutan yang terjadi ketika logam di dalam proses pengecoran membeku. Bagian dalamnya biasanya dikelilingi oleh kristal-kristal dendrit. Cacat ini tidak nampak di permukaan.

Setiap bagian dari coran memiliki kecepatan pembekuan yang berbeda. Biasanya cacat tersebut terjadi pada bagian logam yang paling lama membeku.

2. Penyusutan Luar

Cacat jenis ini disebabkan oleh terjebaknya logam cair di antara kristal dendrit sehingga pada saat logam mengalami pembekuan maka akan terjadi penyusutan.

Secara terperinci, penyusutan dalam maupun penyusutan luar disebabkan beberapa faktor berikut :

- Temperatur penuangan yang terlalu rendah menyebabkan penambah membeku terlebih dahulu.
- Tinggi penambah (riser) yang terlalu rendah
- Bahan coran memiliki banyak kotoran sehingga menyebabkan inklusi
- Perencanaan dan penambahan riser yang kurang sempurna
- Logam cair yang dioksidasi menyebabkan perbandingan penyusutan yang besar.
- Bagian coran yang cekung terlalu tajam atau memiliki radius yang terlalu kecil

2.6. Simulasi Permodelan Pengecoran Logam

Di dalam dunia industri, pengecoran merupakan proses yang sangat penting dan merupakan suatu proses yang telah lama ada. Pada pelaksanaannya terdapat beberapa kesulitan untuk mengontrol hasil pengecoran dimana sangat bergantung pada karakteristik lelehan logam yang sangat berhubungan dengan sifat-sifat termal serta struktur dari logam dan paduan yang digunakan.



Dan juga banyak faktor lain seperti kelarutan gas, material dan bentuk dari cetakan (*mold*) itu sendiri dimana akan mempengaruhi distribusi temperatur selama proses pengecoran, munculnya tegangan termal, *shrinkage*, serta mempengaruhi proses solidifikasi hasil coran itu sendiri. Sehingga dalam kasus ini diperlukan penelitian agar hasil dari pengecoran tersebut sesuai dengan standar yang diinginkan baik dalam skala industri maupun skala yang lebih kecil lagi.

Dalam pelaksanaannya, terdapat banyak sekali penelitian tentang metode pengecoran dengan berbagai cara termasuk simulasi permodelan. Penelitian tersebut tentunya sangat berguna bagi industri pengecoran maupun pihak-pihak lain.

Pada tahun 2005 Pariona melakukan penelitian tentang simulasi numerik perpindahan panas selama solidifikasi dari besi murni dengan cetakan berbahan pasir serta berbahan mullite. Pada penelitian ini digunakan software ANSYS yang menggunakan dasar dari metode elemen hingga. Solidifikasi yang dilakukan selama 1,5 jam dan didapatkan hasil bahwa solidifikasi pada cetakan pasir lebih lambat daripada cetakan yang menggunakan mullite sebagai bahan bakunya. Perbedaan ini disebabkan oleh perbedaan sifat termal dari kedua bahan tersebut. Hal ini disebabkan karena aliran panas dan gradien panas yang lebih besar di dalam cetakan pasir daripada cetakan mullite. Kemudian penelitian tersebut dilanjutkan oleh Sunanda pada tahun 2013 yang melakukan penelitian tentang analisa desain dari pengecoran besi murni dengan bahan cetakan yang berbeda yaitu cetakan berbahan pasir silika, berbahan mullite dan cetakan berbahan komposit pasir silika dengan mullite dan pembahasan yang diberikan berpusat pada penyusutan, tegangan termal, serta distribusi temperatur yang terjadi baik selama proses pengecoran maupun sesudah pengecoran. Sehingga dapat diketahui material mana yang paling cocok digunakan pada proses pengecoran. Software ANSYS juga digunakan pada penelitian ini. Didapatkan hasil bahwa tegangan termal pada logam cair lebih sedikit dari pada cetakan mullite dan kompositnya, akan tetapi penyusutan (*shrinkage*) di dalam cetakan



paling sedikit pada cetakan komposit, dimana dapat diartikan bahwa cetakan komposit paling cocok digunakan sebagai cetakan pada pengecoran logam ini.

Dalam penelitian perpindahan panas secara tiga dimensi, telah dilakukan oleh Wang pada tahun 2014 yang melakukan studi tentang permodelan numerik perpindahan panas yang melalui cetakan dengan model perpindahan panas transien 3D/1D. Fokus di dalam pengembangan perpindahan panas transien 3D/1D, studi ini bertujuan untuk memperoleh batasan (*boundary condition*) di dalam *investment casting*. Perpindahan panas dianggap hanya memiliki arah tegak lurus dengan cetakan dan dihitung melalui *FD solution* dari persamaan perpindahan panas. Akan muncul luasan dimana model 3D/1D tidak dapat melapisinya yang disebut “*dead corner*” ketika model 1D *patched* diintegrasikan ke dalam kode 3D CFD PHYSICA. Untuk mengatasi ini maka dikembangkan sebuah *patch*. Yang pada akhirnya simulasi dengan model 3D/1D *patched* menambah akurasi ketika perhitungan perpindahan panas dilakukan.

Analisa dan simulasi berdasarkan mikrostruktural dari sifat *fatigue* suatu paduan Al-Si menjadi bahasan utama dari penelitian yang dilakukan oleh Viet-Duc LE pada tahun 2015. Material uji di dalam penelitian ini dikarakterisasi menggunakan heterogenitas mikrostruktural seperti matriks dari aluminium, inklusi serta cacat castingnya pada skala yang berbeda. Dapat diketahui bahwa efek dari faktor-faktor tersebut sangat penting di dalam mekanisme kerusakan HCF (*High Cycle Fatigue*).

Telah disebutkan di atas terdapat beberapa penelitian yang telah dilakukan mengenai simulasi proses pengecoran untuk memprediksi hasil serta fenomena yang terjadi pada saat proses pengecoran maupun setelah proses pengecoran. Namun hal tersebut dilakukan dengan simulasi secara dua dimensi dimana pada pengecoran sesungguhnya fenomena yang terjadi adalah secara tiga dimensi. Sehingga akan sangat bermanfaat apabila terdapat penelitian mengenai simulasi pengecoran logam yang dilakukan secara tiga dimensi.



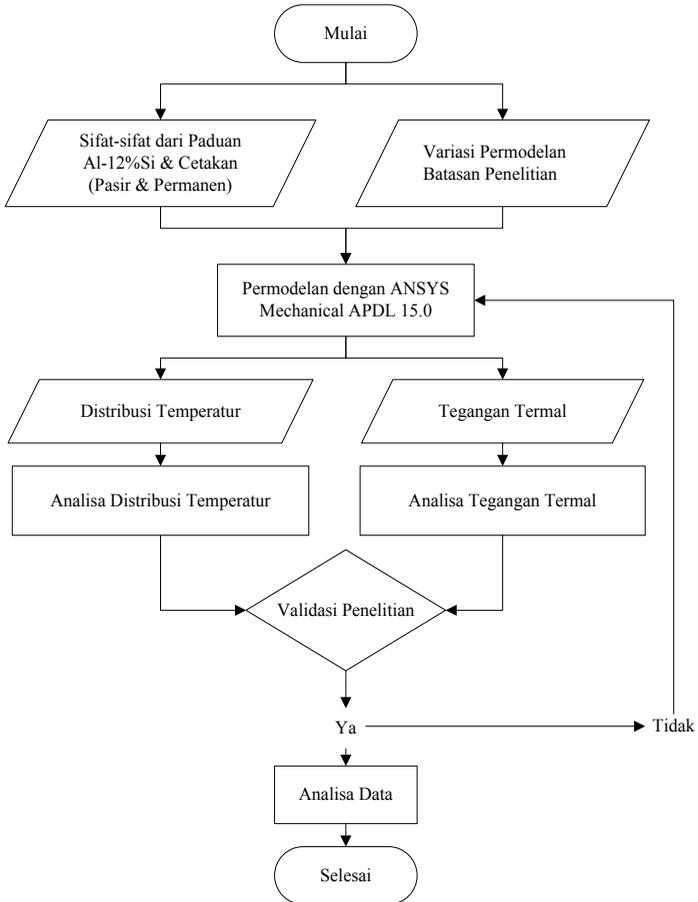
Dapat diketahui bahwa telah banyak penelitian yang berkaitan dengan paduan Al-Si dan juga penggunaan *software* yang berdasarkan metode elemen hingga untuk mengetahui fenomena-fenomena yang terjadi saat proses pengecoran berlangsung. Oleh karena itu dapat disimpulkan juga bahwa penggunaan *software* ANSYS *Mechanical* APDL yang menggunakan metode elemen hingga dapat membantu kita untuk mengetahui fenomena yang terjadi selama proses pengecoran.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI

3.1. Metode Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



3.2. Spesifikasi Material

3.2.1. Material Al-12%Si

Paduan Al-12%wt Si digunakan dalam penelitian ini sebagai material coran. Data-data diperoleh dari beberapa sumber yaitu *Comsol Materials Library*, *Thermophysical Properties of Matter Volume 12 : Thermal Expansion Metal and Alloys* dan *Thermophysical Properties of Matter Volume 5 : Specific Heat Non Metallic Solid* dari Touloukian pada tahun 1970, *FEA Simulations of Temperature Changes of Castings When Solidified and Cooled in Mould* dari Xinping Hu pada tahun 2011 serta *Density and Solidification Shrinkage of Hypoeutectic Aluminum-Silicon Alloys* dari Magnusson pada tahun 2001.

Sifat-sifat dan komposisi dari paduan Al-12%Si dijabarkan pada tabel 3.1 sampai dengan tabel 3.3.

Tabel 3.1 Komposisi Paduan Aluminium Al-12%Si (matweb.com)

Unsur	Al (%)	Cr (%)	Cu (%)	Mg (%)	Ni (%)	Fe (%)	Si (%)	Zn (%)
Min	81.1	-	0.50	0.80	0.50	-	11	-
Maks	87.2	0.10	1.3	1.3	1.3	1.0	13.5	0.25

Tabel 3.2 Modulus Elastisitas, *Poisson Ratio* (Comsol Material Library) serta Koefisien Ekspansi Termal Paduan Al-12%Si (Touloukian, 1970).

Temperatur (K)	Modulus Elastisitas (N/m ²)	<i>Poisson Ratio</i>	CTE (1/K)
303	7.88E+10	0.331425666	0.00002303
373	7.60E+10	0.332439981	0.00002373
473	7.18E+10	0.334288146	0.00002473
573	6.61E+10	0.340186815	0.00002573
673	5.68E+10	0.356735751	0.00002673
773	4.07E+10	0.39372582	0.00002773
873	3.02E+10	3.73E-01	0.00002873
973	2.22E+10	3.83E-01	0.00002973



1073	1.42E+10	3.93E-01	0.00003073
1173	6.16E+09	4.03E-01	0.00003173

Tabel 3.3 Konduktifitas Termal (Xinping, 2011), Kapasitas Panas Spesifik (Touloukian, 1970) serta Massa Jenis Paduan Al-12%Si (Magnusson, 2001)

Temperatur (K)	Konduktifitas Termal (W/m.K)	Kapasitas Panas Spesifik (J/kg.K)	Massa Jenis (Kg/m ³)
303	160.4584	5688.884	2686.7809
373	154.3544	6425.844	2667.9019
473	145.6344	7478.644	2640.9319
573	136.9144	8531.444	2613.9619
673	128.1944	9584.244	2586.9919
773	119.4744	10637.044	2560.0219
873	110.7544	11689.844	2533.0519
973	102.0344	12742.644	2506.0819
1073	93.3144	13795.444	2479.1119
1173	84.5944	14848.244	2452.1419

3.2.2. Material Cetakan Pasir

Material cetakan pasir yang digunakan pada penelitian ini adalah pasir silika. Dimana sifat-sifat dari material ini didapatkan oleh berbagai sumber antara lain *Comsol material library*. Serta buku *Thermophysical Properties of Matter Volume 5: Specific Heat Non Metallic Solid*, *Thermophysical Properties of Matter Volume 2: Thermal Conductivity Non Metallic Solid*, dan *Thermophysical Properties of Matter Volume 13: Thermal Expansion Non Metallic Solid* yang disusun oleh Touloukian pada tahun 1970.

Untuk sifat-sifat dari pasir silika disajikan pada tabel 3.4 sampai dengan tabel 3.6.



Tabel 3.4 Komposisi Paduan Pasir Silika (Idrisa, 2013)

Komposisi	Nilai (%)
SiO ₂	87.91
Al ₂ O ₃	4.70
Fe ₂ O ₃	0.94
CaO	0.14
MgO	0.30
Na ₂ O	0.19
K ₂ O	0.25
TiO ₂	0.15
Mn ₂ O ₃	0.02
L OI	5.15

Tabel 3.5 Modulus Elastisitas dan *Poisson Ratio* (*Comsol Materials Library*) serta Koefisien Ekspansi Termal Cetakan Pasir (Touloukian, 1970)

Temperatur (K)	Modulus Elastisitas (N/m ²)	<i>Poisson Ratio</i>	CTE (1/K)
303	7.31E+10	0.167113894	0.00000812
373	7.39E+10	0.168085255	0.00001092
473	7.51E+10	0.170127237	0.00001492
573	7.61E+10	0.173064368	0.00001892
673	7.70E+10	0.176260754	0.00002292
773	7.76E+10	0.178848158	0.00002692
873	7.82E+10	0.180370354	0.00003092
973	7.86E+10	0.18142747	0.00003492
1073	7.89E+10	0.184320347	0.00003892
1173	7.92E+10	0.193694883	0.00004292



Tabel 3.6 Konduktifitas Termal dan Kapasitas Panas Spesifik (Touloukian, 1970) serta Massa Jenis Cetakan Pasir (*COMSOL Material Library*)

Temperatur (K)	Konduktifitas Termal (W/m.K)	Kapasitas Panas Spesifik (J/kg.K)	Massa Jenis (Kg/m ³)
303	0.02	7315.576	1391.760205
373	0.783	8057.016	1369.038746
473	1.873	9116.216	1349.869384
573	2.963	10175.416	1340.181578
673	4.053	11234.616	1334.91849
773	5.143	12293.816	1330.948109
873	6.233	13353.016	1327.063261
973	7.323	14412.216	1323.981602
1073	8.413	15471.416	1324.345621
1173	9.503	16530.616	1332.722639

3.2.3 Material Cetakan Permanen (SS304)

Material cetakan yang digunakan untuk cetakan permanen adalah SS304 dengan data yang diperoleh dari *Comsol Materials Library* serta *British Stainless Steel Association*. Untuk komposisi serta sifat-sifat dari *stainless steel* SS304 dapat dilihat pada tabel 3.7 sampai dengan tabel 3.9.

Tabel 3.7 Komposisi SS304 (matweb.com)

Unsur	C (%)	Cr (%)	P (%)	Mn (%)	Ni (%)	Fe (%)	Si (%)	S (%)
Min	-	18	-	-	8	66.345	-	-
Maks	0.08	20	0.045	2	10.5	74	1	0.03



Tabel 3.8 Modulus Elastisitas, *Poisson Ratio* (*Comsol Materials Library*) serta Koefisien Ekspansi Termal (*British Stainless Steel Association*) dari SS304

Temperatur (K)	Modulus Elastisitas (N/m ²)	<i>Poisson Ratio</i>	CTE (1/K)
303	1.9724E+11	0.290164165	0.000021515
373	1.90993E+11	0.295921114	0.000021865
473	1.82068E+11	0.304145327	0.000022365
573	1.73143E+11	0.31236954	0.000022865
673	1.64218E+11	0.320593753	0.000023365
773	1.55293E+11	0.328817966	0.000023865
873	1.46368E+11	0.337042179	0.000024365
973	1.37443E+11	0.345266392	0.000024865
1073	1.28518E+11	0.353490605	0.000025365
1173	1.19593E+11	0.361714818	0.000025865

Tabel 3.9 Konduktifitas Termal, Koefisien Panas Spesifik serta Massa Jenis dari SS304 (*Comsol Materials Library*)

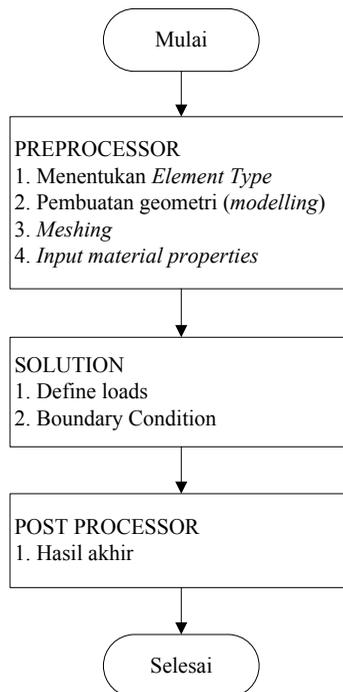
Temperatur (K)	Konduktifitas Termal (W/m.K)	Koefisien Panas Spesifik (J/kg.K)	Massa Jenis (Kg/m ³)
303	15.42294545	474.9497128	7856.908351
373	17.42838595	488.8977083	7830.229151
473	20.29330095	634.8495354	7789.351698
573	23.15821595	1280.052357	7745.94029
673	26.02313095	2995.126348	7700.679042
773	28.88804595	6545.974786	7654.128991
873	31.75296095	12893.78405	7606.728087
973	34.61787595	23195.02363	7558.791199
1073	37.48279095	38801.44612	7510.510114
1173	40.34770595	61260.0872	7461.953534



3.3. Proses Penelitian

Untuk membuat geometri pada penelitian ini digunakan Solidworks 2014 x64 Edition, serta ANSYS *Mechanical* APDL 17.0 yang digunakan untuk menganalisa distribusi temperatur dan defleksi pada proses pengecoran.

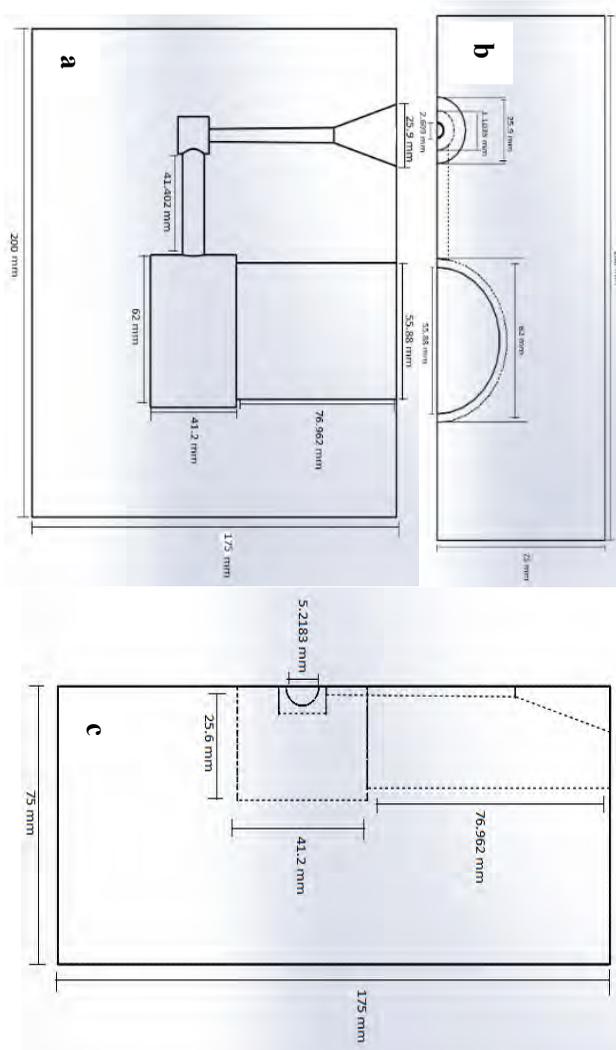
Dalam penelitian ini dibuat material cetakan yang berbeda. Yaitu menggunakan cetakan pasir silika serta cetakan permanen yang menggunakan *stainless steel* tipe SS304 yang kemudian akan dibandingkan bagaimana distribusi temperatur dan serta tegangan termal yang terjadi di dalamnya dan pengaruh dari kedua bahan cetakan tersebut terhadap cacat pada coran seperti deformasi serta *shrinkage* yang terjadi. Tahap-tahap pada penelitian kali ini ditampilkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Alir Pemodelan



Geometri yang digunakan di dalam pemodelan kali ini dapat dilihat pada gambar 3.3.



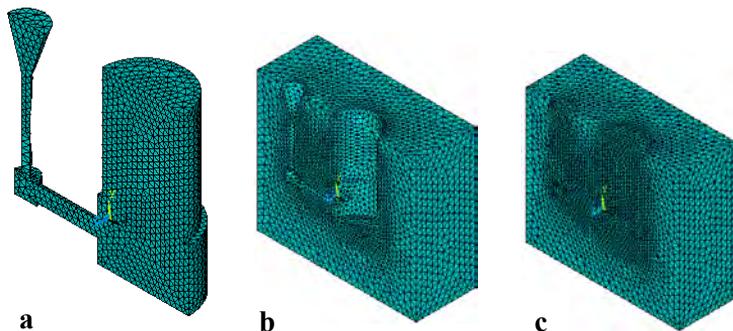
Gambar 3.3 Geometri Cetakan dan Material Coran (a) tampak depan (b) tampak atas (c) tampak samping



Gambar 3.3 merupakan geometri yang digunakan pada pemodelan ini. Digunakan satu buah geometri yaitu gabungan antara material coran dengan cetakan. Untuk material coran sendiri mengacu pada dimensi dari piston sepeda motor Ninja 250R dengan panjang piston 6,2 cm dan lebar sebesar 41,2 cm. Semuanya dibuat dengan aplikasi SolidWorks 2014 x64 Edition yang kemudian dimasukkan ke dalam ANSYS *Mechanical* APDL 17.0 menggunakan format parasolid.

Tipe elemen yang digunakan pada penelitian ini adalah SOLID278 (*brick 8node 278*) untuk analisa termal dikarenakan tipe elemen ini memiliki kapabilitas di dalam konduksi termal tiga dimensi. Elemen ini memiliki 8 nodal dengan 1 buah derajat kebebasan dan temperatur setiap nodal. Sedangkan untuk analisa struktural, digunakan elemen SOLID227 karena elemen ini dapat digunakan dalam analisa *couple-field* dari termal ke struktural. Elemen ini memiliki 8 nodal dengan 7 derajat kebebasan.

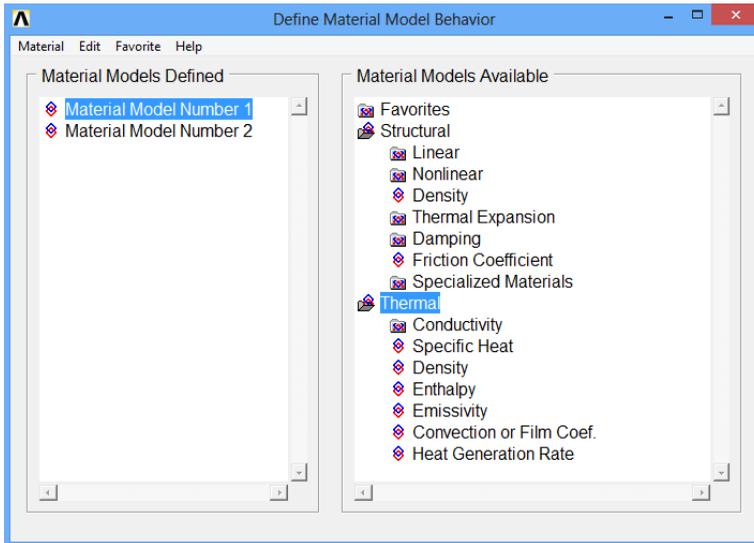
Meshing yang digunakan berukuran 0.004 untuk material coran serta ukuran 0.008 untuk material cetakan. Hal ini dikarenakan geometri yang digunakan pada penelitian ini membutuhkan *meshing* yang kecil. Yang ditampilkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 (a) *Meshing* dari Material Coran Al-12%Si (b) *Meshing* dari Material Cetakan (Cetakan Pasir & SS304) (c) *Meshing* Gabungan Antara Cetakan dengan Al-12%Si



Input dari sifat-sifat material dibagi dua yaitu untuk analisa termal serta struktural yang dapat dilihat pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 *Input* Sifat-Sifat Material

Setelah melakukan langkah-langkah tersebut, maka dimasukkan *boundary condition* pada pemodelan yang disesuaikan dengan kondisi asli jika dilakukan oengecoran secara eksperimen. Perpindahan panas yang terjadi pada proses pengecoran adalah konveksi, yang diletakkan pada bagian luar cetakan dimana akan berpengaruh kepada distribusi temperatur. Kemudian dianggap tidak ada inklusi benda asing di dalam rongga cetak, material cetakan serta material coran dianggap homogen, bagian dasar cetakan dianggap menyentuh tanah sehingga tidak terjadi konveksi serta pengamatan berfokus pada fenomena yang terjadi pada *riser* dan rongga cetak.

Heat flux diaplikasikan di dalam geometri cetakan, konveksi diaplikasikan pada bagian luar cetakan serta temperatur awal diaplikasikan baik pada coran maupun cetakan. Selama proses



pengecoran, akan terjadi perpindahan panas dari material coran ke dalam cetakan yang menyebabkan logam cair akan kehilangan panas ketika dituangkan ke dalam rongga cetak. Sedangkan cetakan akan mengalami penambahan panas dikarenakan transfer panas dari logam cair tadi.

Untuk validasi di dalam penelitian ini digunakan penelitian sebelumnya dimana akan dibandingkan pola dari distribusi temperatur, tegangan serta *shrinkage* yang terjadi pada simulasi ini.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Telah dilakukan beberapa simulasi dengan metode elemen hingga tentang pengecoran Al-12%Si dengan cetakan pasir serta cetakan SS304.

Pemodelan pertama dilakukan dengan analisa transien termal. Langkah ini digunakan untuk melihat distribusi temperatur serta proses pendinginan pada masing-masing percobaan baik itu pada cetakan pasir serta cetakan SS304. Dan untuk tahap selanjutnya adalah dengan analisa *couple-field* untuk mengetahui tegangan termal, serta *shrinkage* yang terjadi pada percobaan ini.

4.1. Analisa Termal

Di dalam analisa ini akan didapatkan beberapa hasil seperti distribusi temperatur, kurva pendinginan serta termal gradien yang ada selama proses pengecoran berlangsung.

Sifat-sifat material yang berpengaruh di dalam analisa ini antara lain konduktifitas termal yang berupa kemampuan suatu material untuk menghantarkan panas. Semakin besar konduktifitasnya maka suatu material akan semakin mudah menghantarkan panas. Sehingga apabila diaplikasikan ke dalam suatu cetakan di dalam pengecoran maka akan semakin mudah menyalurkan panas dari material coran ke dalam lingkungan. Kemudian massa jenis benda yang merupakan massa suatu benda per volume serta kapasitas panas spesifik yang merupakan besaran energi untuk menaikkan panas suatu benda setiap unit temperatur.

Pada penelitian ini diberikan pengaturan dengan kondisi yang sama pada kedua cetakan seperti yang tertera pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Pengaturan Simulasi Transien Termal

Total Waktu Simulasi	Time Step
5400 detik atau 1.5 jam	60 detik



Ditampilkan dua buah cetakan dimana pada cetakan pertama menampilkan keseluruhan cetakan yang mewakili suatu proses pengecoran yang sebenarnya dan yang kedua menampilkan setengah dari cetakan tersebut untuk mempermudah proses analisa fenomena yang terjadi selama proses pengecoran. Untuk cetakan penuh, *boundary condition* yang digunakan berupa konveksi pada sisi belakang, depan, atas serta samping kanan dan kiri cetakan. Kemudian pada bagian bawah diberikan *boundary condition* berupa temperatur sebesar 303K .

Untuk setengah cetakan *boundary condition* yang digunakan hampir sama, perbedaannya adalah pada bagian depan cetakan diberikan *heat flux* sebesar 0.

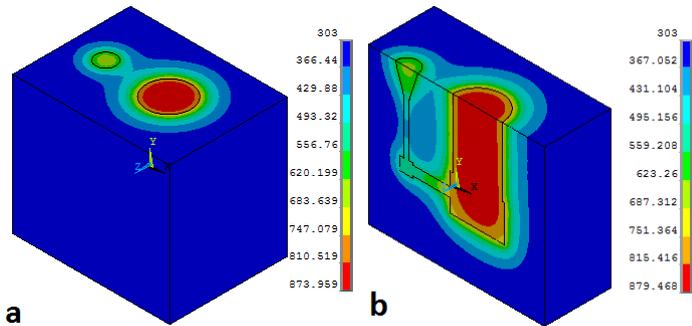
Temperatur penguangan yang digunakan adalah sebesar 963K dikarenakan Al-12%Si memiliki temperatur eutektik sebesar 850K. Dan pada temperatur 963K semua fasanya sudah berubah menjadi *liquid* sehingga kita dapat meneliti transfer panas di atas temperatur tersebut.

4.1.1. Distribusi Temperatur

Di dalam suatu proses pengecoran yang sebenarnya, suatu cetakan akan melingkupi keseluruhan dari material coran. Sehingga fenomena di dalam proses pengecoran ini akan sangat sulit untuk dianalisa. Oleh karena itu di dalam penelitian ini, suatu cetakan akan dipotong secara simetri yang kemudian akan dibuktikan bahwa hasil dari kedua coran identik sama ditandai dengan rentang temperatur antara cetakan penuh dengan setengah cetakan sama.

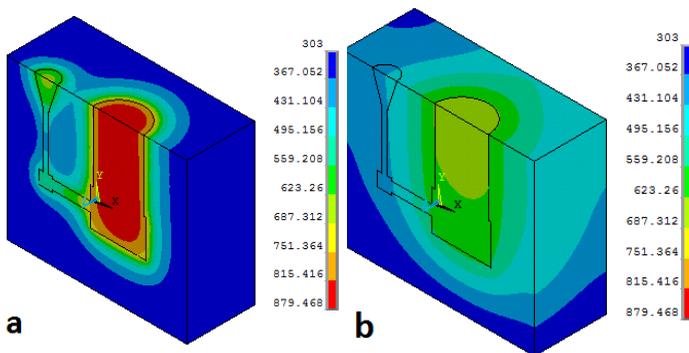
Konveksi yang digunakan adalah sebesar 11.45 W/m²K sesuai dengan yang didapatkan dari penelitian yang dilakukan oleh Pariona pada tahun 2005 yang berlaku untuk semua jenis cetakan.

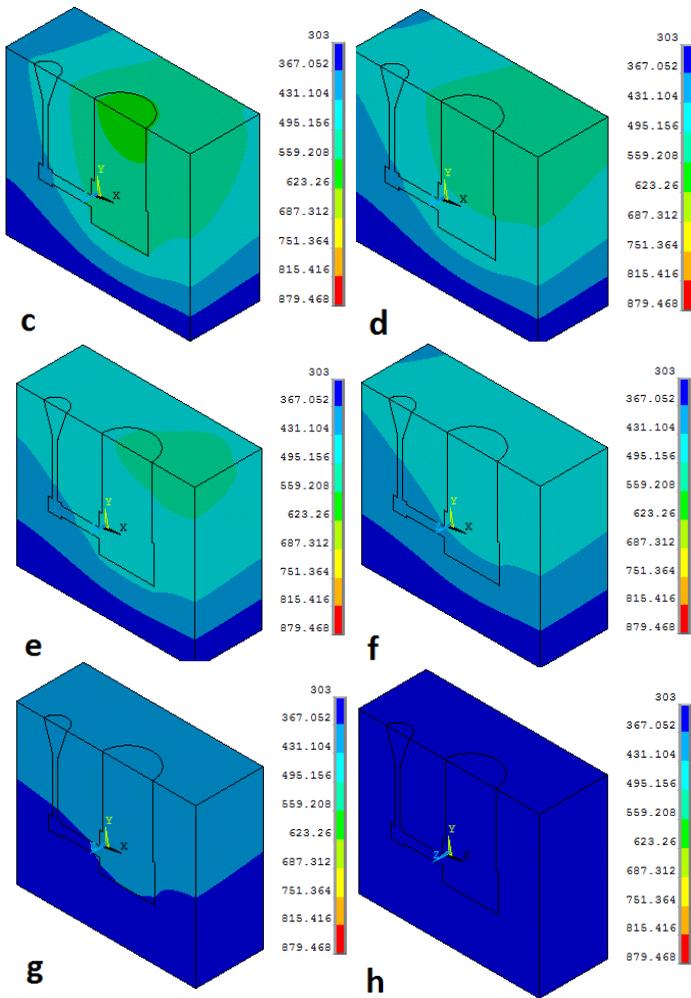
Perbandingan hasil simulasi pengecoran dengan cetakan penuh dan setengah cetakan berbahan SS304 ditunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil percobaan dari pengecoran selama 60 detik pada (a) cetakan SS304 penuh (b) setengah dari cetakan SS304

Dapat dilihat bahwa terdapat sedikit perbedaan rentang temperatur pada hasil cetakan penuh dengan setengah cetakan SS304 dimana pada masing-masing rentang temperatur perbedaannya tidak lebih dari 6K yang kemudian dapat diabaikan dikarenakan besar perbedaannya yang sangat kecil. Hal ini terjadi kemungkinan dikarenakan perbedaan numerik seperti pembulatan angka dan sebagainya. Untuk proses distribusi temperatur pada cetakan SS304 dapat dilihat pada gambar 4.2.





Gambar 4.2 Distribusi Temperatur Cetakan SS304 pada (a) 60 detik (b) 360 detik (c) 660 detik (d) 960 detik (e) 1260 detik (f) 1800 detik (g) 3600 detik (h) 5400 detik



Suatu pembekuan coran dimulai dari bagian logam yang paling banyak bersentuhan dengan cetakan. Ketika itu panas dari logam cair diambil oleh cetakan sehingga bagian logam yang bersentuhan dengan cetakan itu sendiri akan mendingin.

Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.2 (a) yang menyebabkan bagian coran yang berbatasan langsung dengan cetakan lebih dingin daripada bagian tengah coran yang tidak berbatasan dengan cetakan. Dapat dilihat juga pada bagian bawah coran yang merupakan cetakan piston, bahwa bagian yang berbatasan langsung dengan cetakan memiliki temperatur yang lebih dingin dibanding dengan daerah cetakan piston yang berada pada bagian tengah cetakan piston itu sendiri.

Sedangkan bagian dari material cetakan yang berbatasan langsung dengan material coran tampak lebih panas dari bagian lain yang tidak berbatasan langsung dengan coran. Hal ini disebabkan karena terjadi perpindahan panas dari material coran ke dalam cetakan dimana material coran semakin dingin sedangkan pada material cetakan semakin panas.

Selanjutnya pada saat pendinginan berlangsung selama 360 detik, panas di dalam cetakan semakin menyebar sedangkan material coran semakin dingin. Hal ini berarti panas yang ada di dalam coran telah diserap lebih banyak daripada saat 60 detik tadi.

Pada saat pendinginan selama 660 detik, masih terjadi pertambahan temperatur pada material cetakan dimana temperatur tersebut menyebar dan membuat coran semakin dingin. Dimana pada coran temperatur maksimalnya berada di rentang 559K sampai 623K.

Kemudian pada waktu pendinginan sebesar 960 detik mulai terjadi pendinginan di dalam cetakan yang dikarenakan persebaran temperatur yang terjadi di dalam cetakan.

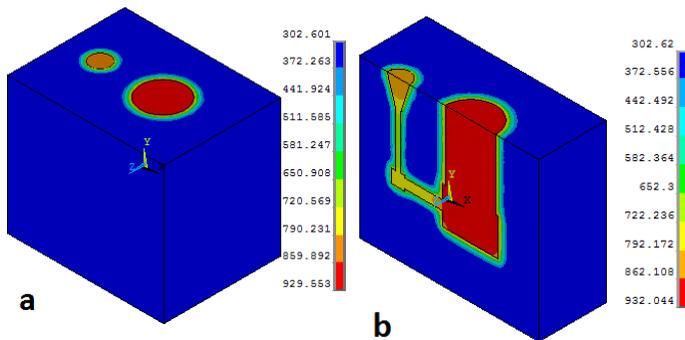
Semua sistem baik itu coran maupun cetakan telah mengalami penurunan temperatur saat waktu pendinginan mencapai 1260 detik. Dengan temperatur maksimal berada pada rentang 495K sampai 559K.



Pendinginan masih terus terjadi saat 1800 detik. Temperatur maksimal berada di rentang 431K sampai 495K dan semakin turun pada 3600 detik yang pada akhirnya mencapai rentang temperatur sebesar 303K sampai 367K pada 5400 detik.

Di gambar 4.2 dapat dilihat bahwa laju dari pendinginan adalah ke arah atas coran dan cetakan. Hal ini disebabkan oleh bagian dasar cetakan yang lebih tebal dari bagian lain dan juga tidak adanya konveksi di bagian tersebut. Serta pada bagian dasar cetakan tidak terkena panas langsung dari material coran seperti pada bagian atas cetakan yang merupakan pintu masuk bagi material coran yang panas.

Untuk perbandingan hasil simulasi pengecoran dengan cetakan penuh dan setengah cetakan berbahan pasir silika ditunjukkan pada gambar 4.3.

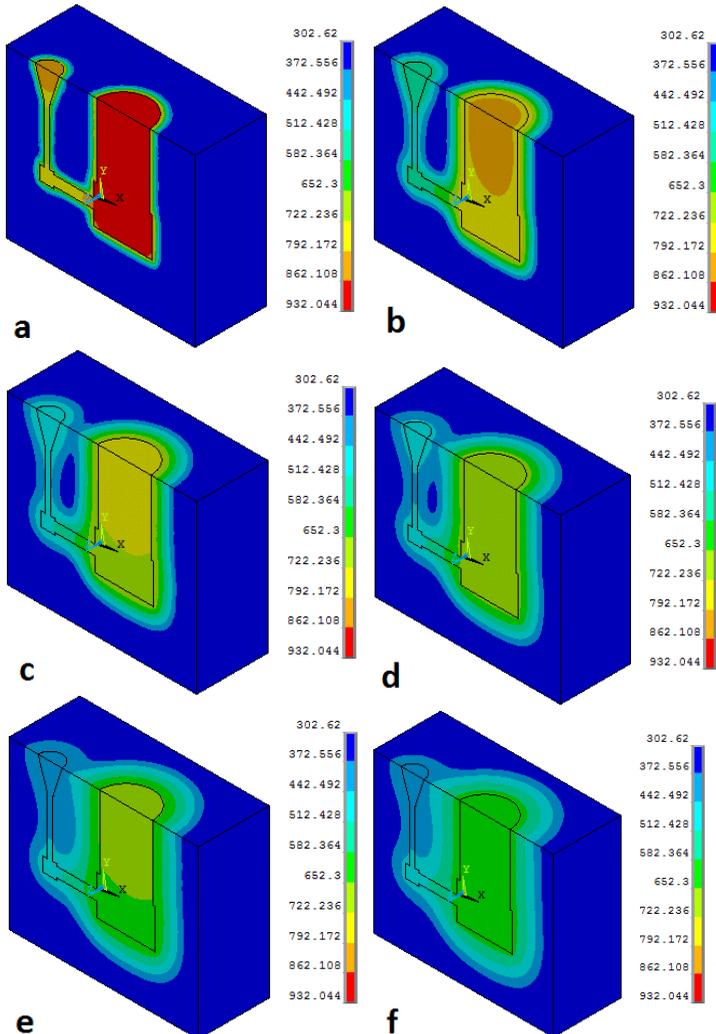


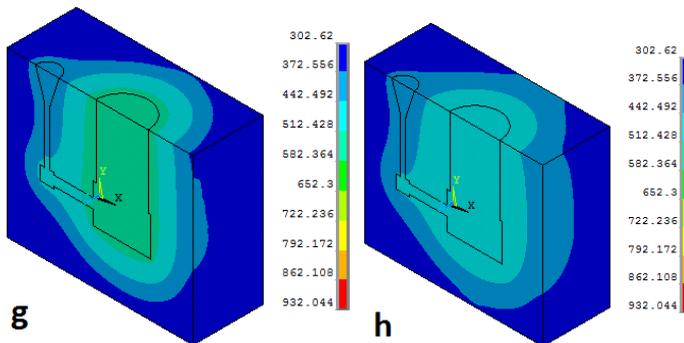
Gambar 4.3 Hasil percobaan dari pengecoran selama 60 detik pada (a) cetakan pasir penuh (b) setengah dari cetakan pasir

Dapat dilihat juga bahwa pada cetakan pasir perbedaan rentang temperatur pada hasil cetakan penuh dengan setengah cetakan yang sedikit. Dimana pada masing-masing rentang temperatur perbedaannya tidak lebih dari 4K yang kemudian dapat diabaikan dikarenakan besar perbedaannya yang sangat kecil. Hal ini terjadi kemungkinan dikarenakan perbedaan numerik seperti pembulatan angka dan sebagainya.



Untuk proses distribusi temperatur pada cetakan SS304 dapat dilihat pada gambar 4.4.





Gambar 4.4 Distribusi Temperatur Cetakan Pasir pada (a) 60 detik (b) 360 detik (c) 660 detik (d) 960 detik (e) 1260 detik (f) 1800 detik (g) 3600 detik (h) 5400 detik

Prinsip dari pengecoran di dalam cetakan pasir ini sama dengan yang terjadi pada cetakan SS304. Suatu pembekuan coran dimulai dari bagian logam yang paling banyak bersentuhan dengan cetakan. Ketika itu panas dari logam cair diambil oleh cetakan sehingga bagian logam yang bersentuhan dengan cetakan itu sendiri akan mendingin.

Dapat dilihat juga bahwa laju dari pendinginan adalah ke arah atas coran dan cetakan. Hal ini sama seperti yang terjadi pada cetakan SS304. Hal ini disebabkan oleh bagian dasar cetakan yang lebih tebal dari bagian lain dan juga tidak adanya konveksi di bagian tersebut. Serta pada bagian dasar cetakan tidak terkena panas langsung dari material coran seperti pada bagian atas cetakan yang merupakan pintu masuk bagi material coran yang panas.

Pada gambar 4.4 (a) fenomena yang terjadi pada cetakan SS304 juga terjadi di sini. Namun fenomena yang terjadi tidak sebesar pada cetakan SS304 yang disebabkan oleh beberapa faktor yang akan kita bahas pada bahas berikutnya. Dapat dilihat pada bagian bawah coran piston. Pada sudut bagian bawah terdapat bagian yang memiliki temperatur yang lebih rendah daripada temperatur di dalam coran lain. Hal ini disebabkan karena coran tersebut berbatasan langsung dengan cetakan yang menyebabkan



bagian coran lebih dingin daripada lainnya. Sedangkan bagian dari material cetakan yang berbatasan langsung dengan material coran tampak lebih panas dari bagian lain yang tidak berbatasan langsung dengan coran. Hal ini disebabkan karena terjadi perpindahan panas dari material coran ke dalam cetakan dimana material coran semakin dingin sedangkan pada material cetakan semakin panas.

Selanjutnya pada saat pendinginan berlangsung selama 360 detik, panas di dalam cetakan semakin menyebar sedangkan material coran semakin dingin. Hal ini berarti panas yang ada di dalam coran telah diserap lebih banyak daripada saat 60 detik tadi. Hal ini terjadi sampai detik 5400.

Pada detik 5400, baik temperatur coran maupun cetakan masih relatif tinggi. Pada akhir simulasi yaitu pada detik 5400 rentang temperatur maksimal yang ada masih berkisar antara 442K sampai dengan 512K dimana memiliki selisih yang cukup jauh dengan proses pada cetakan SS304 tadi.

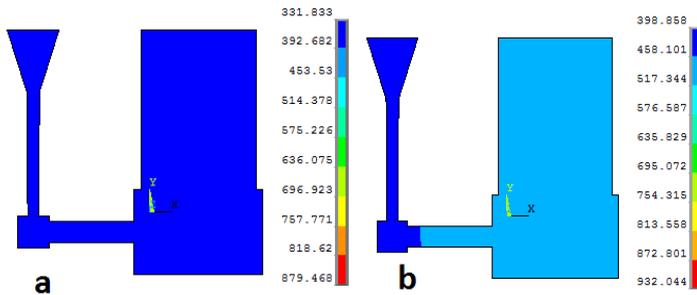
Perbedaan distribusi temperatur yang signifikan ini disebabkan oleh sifat dari material cetakan. Cetakan SS304 memiliki konduktifitas termal yang lebih tinggi, oleh karena itu cetakan SS304 memiliki kemampuan yang lebih baik untuk menyebarkan panas sehingga panas dari coran dapat dengan cepat menyebar ke dalam cetakan sebelum semuanya akan keluar menuju lingkungan sehingga dapat disimpulkan bahwa kecepatan pendinginan dari pengecoran dengan cetakan SS304 lebih besar daripada cetakan pasir.

Hal lain yang menyebabkan perbedaan distribusi temperatur ini adalah kapasitas panas dari cetakan. Diketahui bahwa kapasitas panas spesifik dari cetakan pasir jauh lebih besar dari cetakan SS304 yang menyebabkan peningkatan temperatur pada cetakan pasir relatif kecil. Dan juga cetakan pasir akan lebih sulit untuk menyerap panas dari coran.

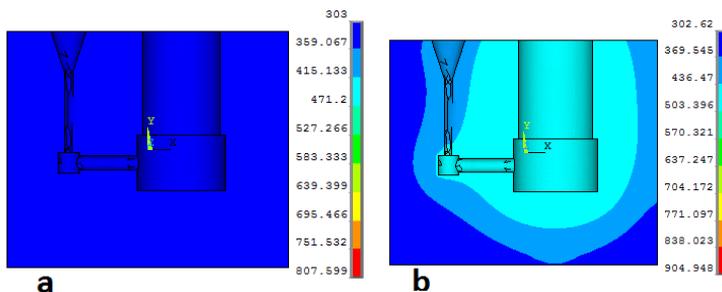
Perbedaan temperatur yang signifikan selama 5400 detik juga dapat dilihat di dalam material coran itu sendiri baik yang ada pada cetakan SS304 maupun cetakan pasir yang ditampilkan pada



gambar 4.5. Sedangkan untuk perbedaan temperatur pada bagian cetakan ditampilkan pada gambar 4.6.



Gambar 4.5 Distribusi temperatur di dalam material coran dari (a) cetakan SS304 dan (b) cetakan pasir selama 5400 detik



Gambar 4.6 Distribusi temperatur di dalam cetakan dari (a) cetakan SS304 dan (b) cetakan pasir selama 5400 detik.

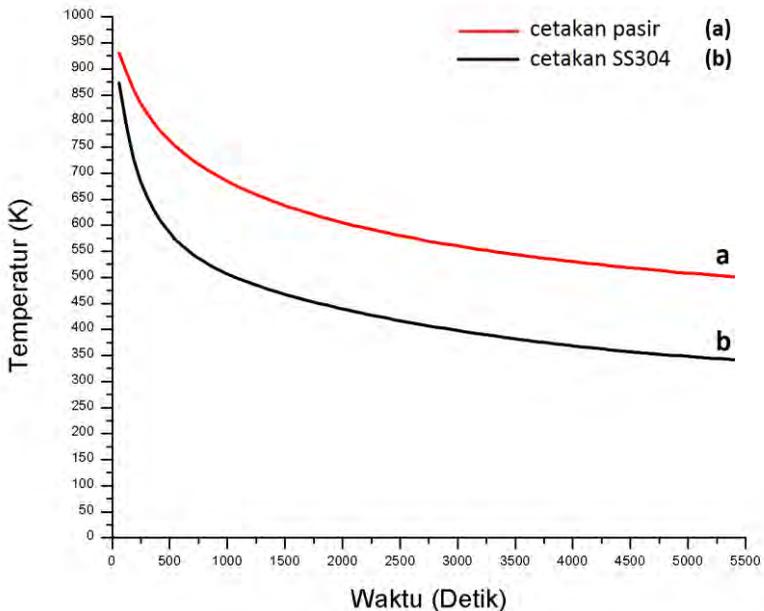
Dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan temperatur yang signifikan pada coran maupun pada cetakan antara bahan pasir dengan bahan SS304. Pada 5400 detik temperatur di dalam coran dengan cetakan berbahan SS304 sudah turun mendekati temperatur kamar sekitar 331K sampai 392K berbeda dengan yang terjadi pada cetakan pasir dimana temperaturnya masih berkisar antara 398K sampai 458K. Begitu juga pada cetakan dimana untuk cetakan SS304 temperatur telah mendekati temperatur kamar sedangkan pada cetakan pasir temperaturnya masih tinggi.



4.1.2. Perbandingan Kurva Pendinginan di Dalam Material Coran

Untuk melihat fenomena pendinginan di dalam coran, diambil salah satu *node* pada bagian tengah di dalam material coran. Kemudian perubahan temperatur yang terjadi diplot menjadi sebuah kurva sehingga dapat dibandingkan hasil dari kedua cetakan baik cetakan SS304 maupun cetakan pasir.

Kurva yang didapat setelah memilih salah satu *node* di dalam coran pada cetakan SS304 serta cetakan pasir didapatkan sebagai gambar 4.7.



Gambar 4.7 Kurva perbandingan penurunan temperatur di dalam coran selama pendinginan pada cetakan SS304 serta cetakan pasir

Dapat diketahui bahwa semakin lama, temperatur coran semakin dingin seiring bertambahnya waktu. Panas yang ada di dalam material coran menyebar ke cetakan hingga akhirnya coran semakin dingin.



Terlihat bahwa kurva pendinginan pada cetakan SS304 selalu berada di bawah kurva dari cetakan pasir yang menunjukkan bahwa temperatur dari coran dengan cetakan SS304 selalu lebih dingin selama proses pengecoran dibandingkan cetakan pasir. Kemiringan dari kurva pendinginan di dalam coran pada cetakan SS304 juga lebih besar daripada cetakan pasir. Sehingga, dapat diartikan bahwa pendinginan di dalam cetakan SS304 lebih cepat daripada pendinginan coran di dalam cetakan pasir. Hal ini sesuai dengan distribusi temperatur yang telah kita bahas sebelumnya.

Pada rentang waktu pengecoran sekitar 60 detik sampai dengan 1260 detik terlihat bahwa penurunan temperatur yang terjadi lebih curam dibandingkan penurunan temperatur pada detik-detik berikutnya baik pada cetakan SS304 maupun cetakan pasir. Hal ini disebabkan karena pada rentang waktu tersebut, temperatur di dalam coran masih tinggi sehingga membuat panas yang ditransfer juga tinggi dibandingkan pada laju pendinginan setelah itu dimana material coran telah mulai mendingin dan temperatur di dalamnya hampir sama dengan temperatur di dalam cetakan yang mengakibatkan transfer panas menjadi lambat. Sehingga Untuk melihat nilai dari bagian kurva 4.7 tersebut dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perbandingan temperatur di dalam coran pada cetakan pasir serta coran selama beberapa detik

Waktu (Detik)	Jenis Cetakan	
	SS304	Pasir Silika
60	873K	929K
360	629K	796K
660	550K	731K
960	510K	689K
1260	484K	658K
1800	449K	617K
3600	378K	540K
5400	341K	500K

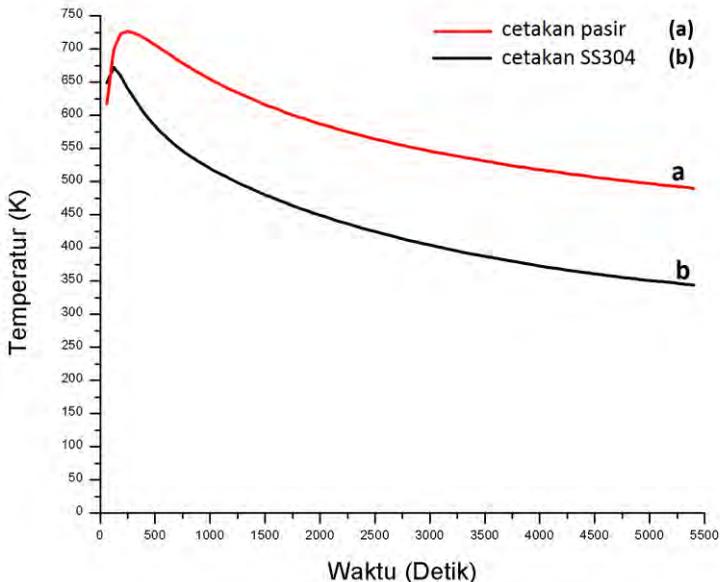


Dari tabel 4.2 dapat dilihat dengan jelas perbedaan temperatur dari cetakan SS304 dengan cetakan pasir. Temperatur pada cetakan SS304 selalu lebih rendah dari cetakan pasir yang berarti kecepatan pendinginan di dalam cetakan SS304 lebih cepat dibandingkan dengan cetakan pasir.

4.1.3. Perbandingan Kurva Pendinginan pada Cetakan

Sama seperti kurva pendinginan di dalam material coran. Untuk melihat fenomena pendinginan di dalam cetakan, diambil salah satu node yang sama di dalam cetakan baik pada pengecoran dengan cetakan SS304 maupun pada cetakan pasir. Kemudian perubahan temperatur yang terjadi diplot menjadi sebuah kurva sehingga dapat dibandingkan hasil dari kedua cetakan baik cetakan SS304 maupun cetakan pasir.

Kurva pendinginan di dalam cetakan baik cetakan SS304 serta cetakan pasir digambarkan pada kurva 4.8.



Gambar 4.8 Kurva perbandingan penurunan temperatur di dalam cetakan selama pendinginan pada cetakan SS304 serta cetakan pasir.



Dapat dilihat pada cetakan SS304 serta cetakan pasir bahwa temperatur dari cetakan naik sampai waktu dan temperatur tertentu yang disebabkan perambatan panas dari material coran. Suatu cetakan masih akan mengalami pertambahan panas apabila masih ada panas berlebih dari coran. Kemudian akan mulai turun ketika temperatur antara coran dengan cetakan sama yang kemudian temperatur turun setelah tidak ada input panas dari coran di mana pada saat itu panas yang berada di dalam cetakan akan disebar ke luar lingkungan. Temperatur kemudian turun hingga pada 344K untuk cetakan SS304 dan untuk cetakan pasir turun menjadi 490K. Kemiringan atau gradien kurva pendinginan dari cetakan pasir lebih landai dibandingkan cetakan SS304 yang berarti pendinginan pada cetakan pasir lebih lambat dibandingkan dengan cetakan SS304.

Untuk melihat nilai dari bagian kurva 4.8 tersebut dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Perbandingan temperatur di dalam cetakan pada cetakan pasir serta coran selama beberapa detik

Waktu (Detik)	Jenis Cetakan	
	SS304	Pasir Silika
60	649K	618K
120	672K	699K
180	660K	722K
240	643K	726K
300	627K	725K
1800	460K	597K
3600	383K	528K
5400	344K	490K

Kenaikan temperatur di dalam cetakan SS304 berakhir saat proses pengecoran berjalan setelah 120 detik yaitu pada temperatur 672K kemudian temperatur berangsur-angsur turun hingga



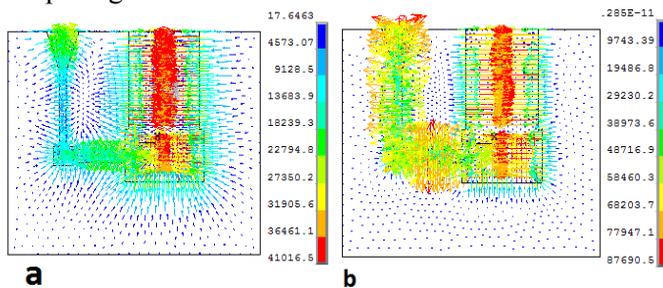
menyentuh 460K pada 1800 detik dan pada akhirnya temperatur kembali turun menyentuh 344K setelah 5400 detik.

Berbeda dengan cetakan pasir dimana penurunan temperatur mulai setelah proses berjalan selama 240 detik yaitu saat temperatur cetakan sebesar 726K yang kemudian turun menjadi 597K pada 1800 detik dan menjadi 490K selama 5400 detik.

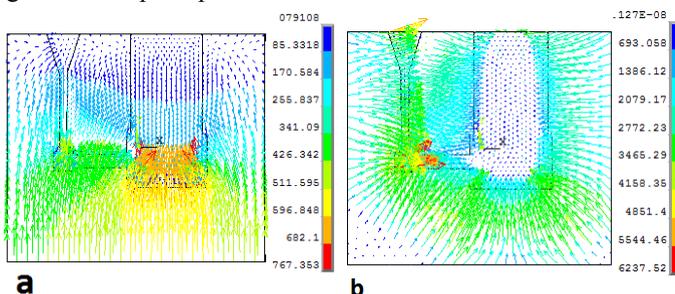
4.1.4. Perbandingan Gradien Temperatur

Gradien temperatur adalah rentang perubahan temperatur di dalam suatu sistem. Di dalam simulasi ini, gradien temperatur yang terbentuk menggambarkan arah mulainya pendinginan.

Untuk perbandingan gradien temperatur dari cetakan SS304 serta cetakan pasir pada waktu 60 detik serta 5400 detik dapat dilihat pada gambar 4.9 dan 4.10.



Gambar 4.9 Gradien temperatur pada (a) dengan cetakan SS304 (b) dengan cetakan pasir pada detik ke 60



Gambar 4.10 Gradien temperatur pada (a) dengan cetakan SS304 (b) dengan cetakan pasir pada detik ke 5400



Arah gradien temperatur mengarah ke atas menuju material coran. Hal ini sesuai dengan yang kita bahas sebelumnya bahwa pendinginan di dalam suatu coran berawal dari bagian yang terkena dinding cetakan paling banyak kemudian menuju ke tengah coran.

4.2. Analisa Struktural

Analisa struktural digunakan untuk menganalisa tegangan termal serta defleksi maupun shrinkage yang terjadi selama proses pengecoran berlangsung.

Pada suatu proses pengecoran, penyebaran atau perubahan temperatur yang ada akan menyebabkan beberapa hal seperti tegangan termal. Tegangan termal ini akan menyebabkan beberapa masalah selama proses pengecoran seperti patahan ataupun deformasi.

Sifat-sifat material yang berpengaruh di dalam analisa ini adalah semua sifat yang ada pada analisa termal yang kemudian ditambah seperti modulus elastisitas dimana semakin besar modulus elastisitas maka suatu material akan semakin tidak mudah terdeformasi. Kemudian sifat material yang berpengaruh lainnya adalah *poisson ratio* dari setiap material yang merupakan konstanta elastisitas suatu material. Dan yang terakhir adalah koefisien ekspansi termal material yang berpengaruh pada perubahan panjang atau volume dari sebuah material pada satu unit temperatur.

Pengaturan yang diberikan sama seperti analisa termal. Pengaturan tersebut diberikan pada kedua cetakan seperti yang tertera pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Pengaturan Analisa Struktural

Total Waktu Simulasi	Time Step
5400 detik atau 1.5 jam	60 detik

Digunakan metode *couple-field* dimana hasil dari analisa termal akan dimasukkan ke dalam analisa struktural yang

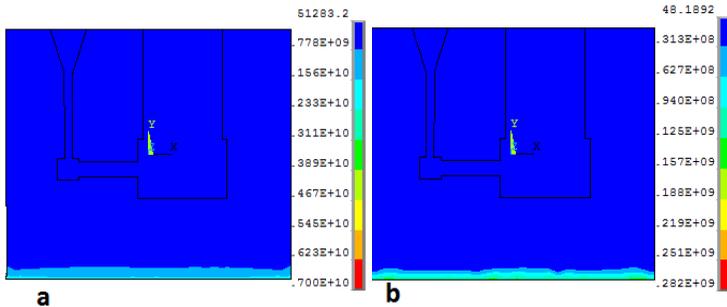


kemudian *boundary condition* di dalam analisa ini ditambah agar sesuai dengan analisa struktural.

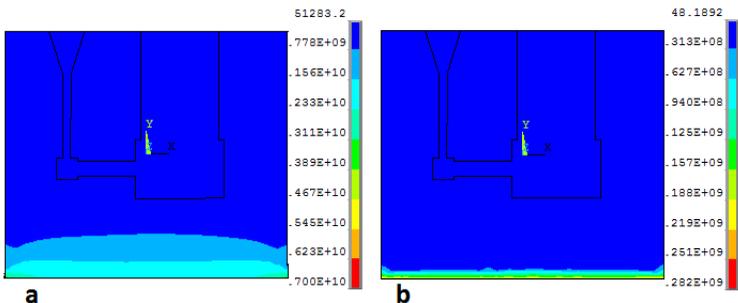
Boundary condition yang diaplikasikan pada cetakan adalah *displacement* sebesar 0 pada permukaan cetakan bagian bawah. Kemudian *symmetry boundary condition* pada bagian depan cetakan.

4.2.1. Tegangan Termal

Tegangan termal dipengaruhi oleh beberapa sifat material yaitu modulus elastisitas suatu material, koefisien ekspansi termal serta perbedaan temperatur pada suatu material. Tegangan termal yang terjadi pada cetakan SS304 dan juga cetakan pasir selama 60 detik dan 5400 detik ditampilkan pada gambar 4.11 dan 4.12.



Gambar 4.11 Tegangan termal pada (a) cetakan SS304 dan (b) cetakan pasir saat 60 detik

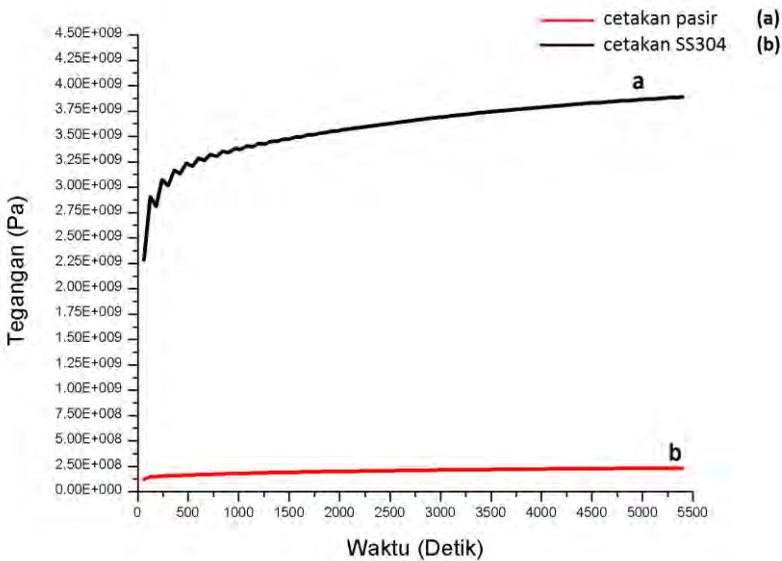


Gambar 4.12 Tegangan termal pada (a) cetakan SS304 dan (b) cetakan pasir saat 5400 detik



Dapat dilihat baik pada waktu pendinginan selama 60 detik, tegangan termal yang terjadi pada cetakan SS304 lebih besar daripada cetakan pasir. Tegangan yang paling besar berada di bagian dasar dari cetakan. Hal ini diakibatkan karena bagian dasar cetakan dianggap berada di atas tanah sehingga tegangan berpusat pada dasar cetakan tersebut.

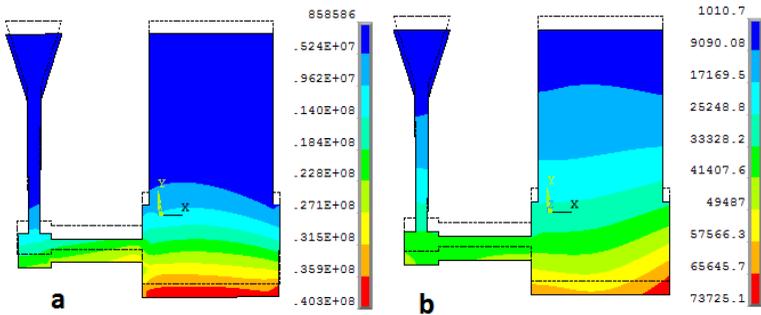
Begitu juga saat waktu pendinginan berlangsung selama 5400 detik. Tegangan termal di dalam cetakan SS304 memiliki persebaran serta nilai tegangan termal yang lebih dibandingkan dengan cetakan pasir. Untuk mengetahui perbandingan distribusi tegangan termal dari cetakan SS304 serta cetakan pasir dapat dilihat pada kurva 4.13.



Gambar 4.13 Perbandingan Nilai Tegangan Termal pada (a) cetakan SS304 serta (b) cetakan pasir selama pengecoran

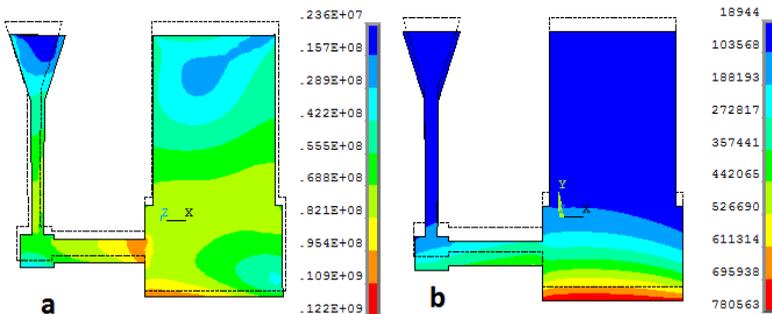


Sedangkan tegangan termal pada material coran baik pada cetakan SS304 dengan cetakan pasir saat 60 detik dapat dilihat pada gambar 4.14.



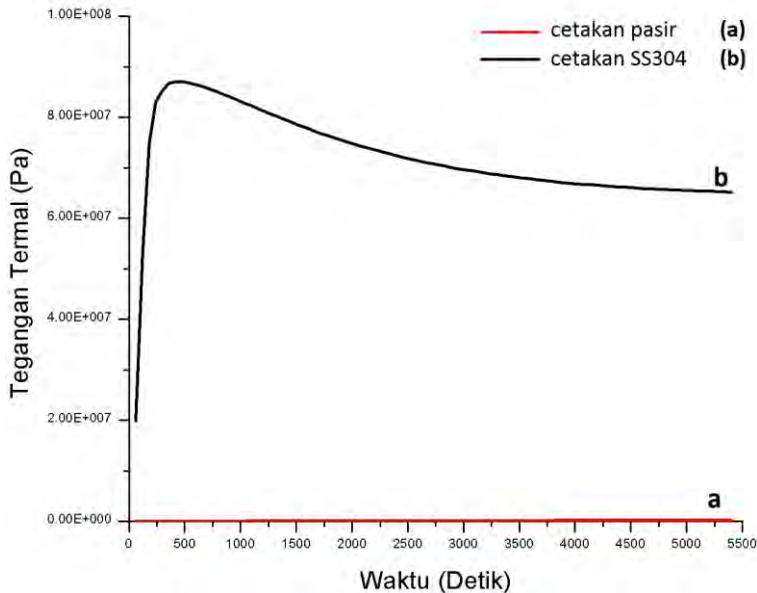
Gambar 4.14 Tegangan Termal pada Material Coran pada (a) cetakan SS304 dan (b) pasir saat 60 detik

Dan untuk waktu pendinginan setelah 5400 detik didapatkan distribusi tegangan termal seperti gambar 4.15.



Gambar 4.15 Tegangan Termal pada Material Coran pada (a) cetakan SS304 dan (b) pasir saat 5400 detik

Untuk mengetahui perbandingan distribusi tegangan termal di dalam material coran pada cetakan SS304 serta cetakan pasir dapat dilihat pada kurva 4.16.



Gambar 4.16 Perbandingan Nilai Tegangan Termal di dalam coran pada (a) cetakan SS304 serta (b) cetakan pasir selama pengecoran

Nilai dari tegangan termal pada suatu titik baik pada coran serta keseluruhan cetakan dapat dilihat pada tabel 4.5 dimana digunakan perbedaan waktu setiap 900 detik agar dapat melihat kenaikan tegangan termal secara merata.

Tabel 4.5 Perbandingan Nilai Tegangan Termal antara Cetakan SS304 dengan Cetakan Pasir di Berbagai Waktu

Waktu (Detik)	Jenis Cetakan			
	SS304	Pasir	Coran SS304	Coran Pasir
60	2.28E+09 Pa	1.2E+08 Pa	19922796.3 Pa	39317.88 Pa
960	3.38E+09 Pa	1.79E+08 Pa	83539696.3 Pa	71006.36 Pa



1860	3.54E+09 Pa	1.99E+08 Pa	75799079. 5 Pa	105314.74 Pa
2760	3.66E+09 Pa	2.12E+08 Pa	70636066. 7Pa	144057.54 Pa
3660	3.76E+09 Pa	2.21E+08 Pa	67639227 Pa	183336.46 Pa
4560	3.84E+09 Pa	2.29E+08 Pa	66012923. 5 Pa	222457.66 Pa
5400	3.89E+09 Pa	2.35E+08 Pa	65228892. 2Pa	258718.87Pa

Melalui kurva 4.16 serta tabel 4.5 dapat dilihat dengan jelas bahwa tegangan termal di dalam cetakan SS304 lebih tinggi daripada cetakan pasir. Hal tersebut sesuai dengan sifat-sifat material yang telah dijelaskan tadi bahwa suatu tegangan termal bergantung pada modulus elastisitas, koefisien ekspansi termal dan juga selisih temperatur. Dan telah disebutkan juga bahwa modulus elastisitas dari cetakan SS304 lebih tinggi dibanding cetakan pasir demikian dengan koefisien ekspansi termal yang juga lebih tinggi daripada cetakan pasir.

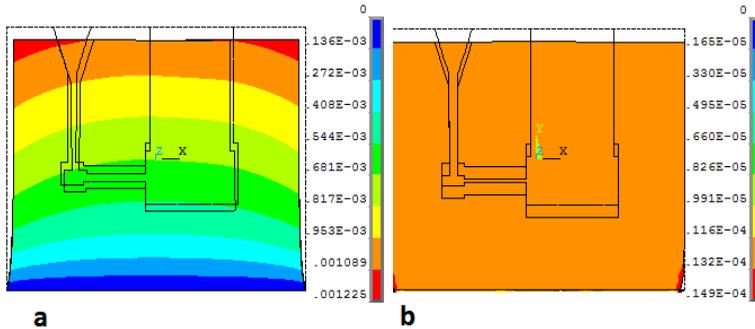
4.2.2. *Shrinkage*

Shrinkage merupakan penyusutan volume di selama proses pengecoran. Hal ini menyebabkan volume dari suatu benda akan menyusut setelah dilakukan pendinginan sehingga benda yang dihasilkan tidak sesuai dimensinya dengan yang diharapkan.

Setelah dilakukan simulasi, baik material coran dengan cetakan mengalami deformasi yaitu berupa penyusutan. Hal ini mengakibatkan volume dari cetakan maupun coran menjadi berkurang. Hal ini disebabkan oleh tegangan termal yang ada di dalam suatu proses pengecoran yang telah kita bahas sebelumnya. Karena tegangan termal tersebut, akan terjadi *shrinkage* di dalam coran.

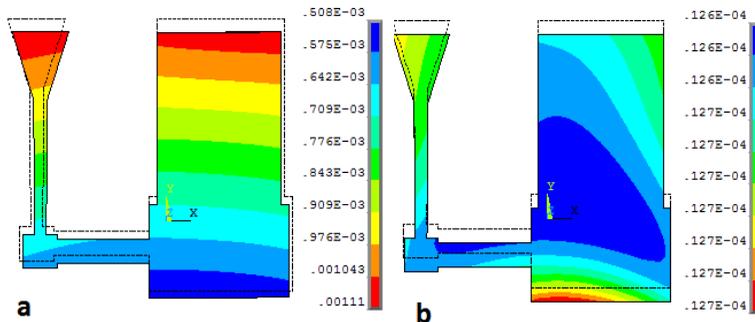


Untuk melihat deformasi yang terjadi selama proses pengecoran dapat dilihat pada gambar 4.17.



Gambar 4.17 Deformasi yang terjadi pada cetakan (a) SS304 dan (b) pasir pada 5400 detik

Dan deformasi untuk daerah coran baik dengan cetakan SS304 ataupun cetakan pasir dapat dilihat pada gambar 4.18.



Gambar 4.18 Deformasi yang terjadi pada daerah coran pada (a) cetakan SS304 dan (b) cetakan pasir pada 5400 detik

Dapat dilihat bahwa deformasi yang terjadi baik pada cetakan dan coran SS304 lebih besar daripada deformasi yang terjadi pada cetakan dan coran pasir. Hal ini sangat berkaitan dengan tegangan termal pada cetakan logam yang lebih besar



daripada cetakan pasir sehingga menyebabkan cetakan logam terdeformasi lebih besar daripada cetakan pasir.

Hal di atas membuktikan bahwa terjadi penyusutan baik pada material cetakan dengan material coran dikarenakan tegangan termal.

Untuk menghitung *shrinkage* yang terjadi selama simulasi, maka dicari terlebih dahulu nilai deformasi pada setiap sumbu. Kemudian geometri awal dikurangi dengan deformasi yang ada sesuai sumbunya. Setelah itu dilanjutkan dengan menghitung volume akhir dari geometri tersebut. Dengan mengurangi volume awal dengan volume akhir yang telah dihitung tadi. Sehingga nilai *shrinkage* yang telah dihitung dapat dilihat pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 *Shrinkage* maksimum yang terjadi selama proses pengecoran

Material	Shrinkage yang terjadi (mm³)
Keseluruhan cetakan SS304	31135.5 mm ³
Keseluruhan cetakan pasir	600 mm ³
Coran pada cetakan SS304	6.95 mm ³
Coran pada cetakan pasir	0.025 mm ³

4.2.3. Perbandingan Massa Jenis di Dalam Coran pada Beberapa Waktu

Untuk membuktikan adanya penyusutan juga dapat dilakukan dengan membandingkan massa jenis dengan volumenya. Selama pengecoran massa dari material coran dianggap tetap. Kemudian seiring dengan berjalannya waktu yaitu proses pendinginan, maka volume akan menyusut. Diketahui bahwa massa jenis adalah massa per volume. Sehingga secara teori apabila volume semakin menyusut maka massa jenis akan naik dikarenakan massa yang tetap. Massa di dalam coran didapat dengan merata-rata massa jenis yang telah diperoleh kemudian mengalikannya dengan volume coran yang ada. Massa yang didapat dijadikan sebagai patokan di dalam penelitian ini. Di dalam penelitian ini, massa Al-12%Si yang didapat sebesar 0.84 kg.

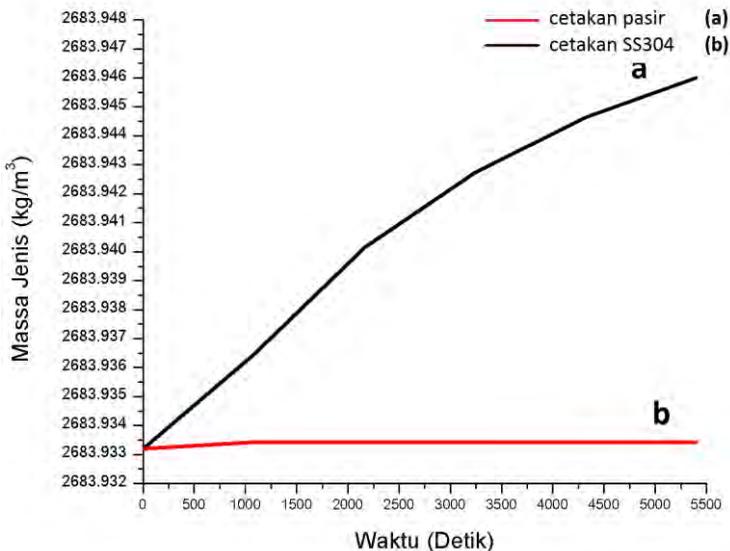


Berikut dapat dilihat pada tabel 4.7 beberapa data yang diperoleh selama simulasi pengecoran ini yang dibagi setiap 1080 detik agar dapat melihat *shrinkage* yang terjadi secara merata.

Tabel 4.7 Volume Material Coran pada Berbagai Waktu

Waktu (detik)	Volume Akhir (mm ³)	
	Cetakan SS304	Cetakan Pasir
0	312973.51	312973.51
1080	312973.13	312973.49
2160	312972.70	312973.49
3240	312972.40	312973.49
4320	312972.18	312973.49
5400	312972.02	312973.49

Kemudian untuk melihat kurva kenaikannya dapat dilihat pada kurva 4.19.



Gambar 4.19 Kurva Kenaikan Massa Jenis pada Coran



Dapat dilihat pada tabel beserta kurva tersebut, bahwa penyusutan volume di dalam coran pada cetakan SS304 semakin besar sesuai dengan bertambahnya waktu. Hal ini juga dialami oleh coran pada cetakan pasir. Namun, selisih penyusutan tiap waktu pada cetakan pasir sangatlah sedikit. Sehingga penyusutan tidak dapat dilihat di dalam kurva maupun tabel.

Dapat dilihat juga nilai penyusutan volume di dalam coran pada cetakan SS304 lebih tinggi dibandingkan dengan cetakan pasir. Hal ini berarti pada cetakan SS304 shrinkage yang terjadi lebih besar jika dibandingkan dengan *shrinkage* yang terjadi pada coran dengan cetakan pasir.

4.3. Kualitas Cetakan

Kualitas suatu cetakan sendiri tidak jauh dari efisiensi cetakan yang ada. Untuk melihat efisiensi serta kualitas dari suatu cetakan dapat menggunakan *yield*. Di dalam proses pengecoran, *yield* merupakan presentase dari massa atau volume coran yang baik dari semua logam yang dimasukkan. Dengan nilai *yield* yang tinggi maka logam yang harus dicairkan kembali akan lebih sedikit sehingga biaya untuk sebuah pengecoran menjadi lebih sedikit.

Berikut adalah formula untuk mencari nilai dari kualitas cetakan yang dapat dilihat dalam tabel 4.8.

Tabel 4.8 Formula Kualitas Cetakan Pengecoran

Jenis	Formula
<i>Quality</i>	$\frac{\text{volume coran yang bebas dari shrinkage}}{\text{volume cetakan}}$
<i>Feeding Yield</i>	$\frac{\text{volume cetakan}}{\text{volume riser} + \text{volume riser}}$
<i>Feeding Efficiency</i>	$\frac{\text{volume shrinkage}}{\text{volume riser}}$
<i>Gating Yield</i>	$\frac{\text{berat cetakan}}{\text{berat cetakan} + \text{berat gating}}$



<i>Casting Yield</i>	Berat Cetakan
	$\frac{\text{Berat Cetakan}}{\text{Berat Cetakan} + \text{Berat Riser} + \text{Berat Gating}}$

Kemudian, sesuai dengan cetakan di dalam simulasi ini didapatkan nilai seperti ditampilkan pada tabel 4.9.

Tabel 4.9 Nilai Kualitas Cetakan Pengecoran

Variabel	Jenis Cetakan	
	SS304	Cetakan Pasir
<i>Quality</i>	99.9%	99.9%
<i>Casting Yield</i>	39.6%	39.6%
<i>Gating Yield</i>	99%	99%
<i>Feeding Efficiency</i>	16.5%	0.3%
<i>Feeding Yield</i>	39.7%	39.7%

Dapat dilihat bahwa kualitas dari hasil coran baik pada cetakan pasir serta cetakan SS304 sebesar 99.9%. Hal ini dapat diartikan bahwa cetakan tersebut memiliki kualitas yang sangat bagus, namun bukan berarti cetakan ini memiliki nilai efisiensi yang tinggi.

Dapat dikatakan bahwa daerah *feeding* serta daerah *casting* masih perlu dioptimisasi supaya lebih efisien nilai dari *casting yield* serta *feeding yield* yang masih rendah.. Namun untuk *gating yield*, nilainya telah mencapai 99% yang berarti *gating system* yang ada sudah bagus.

Kemudian *feeding* efisiensi dari cetakan SS304 masih berkisar 16.5% dan untuk cetakan pasir sebesar 0.3%. Hal ini berarti *riser* yang ada hanya dapat mengisi sebesar 16.5% kekosongan yang disebabkan oleh *shrinkage* pada cetakan SS304 serta mengisi 0.3% kekosongan yang disebabkan oleh *shrinkage* pada cetakan pasir.



4.4. Perbandingan Keseluruhan Hasil dari Cetakan SS304 serta Cetakan Pasir

Setelah melakukan analisa di atas didapatkan beberapa data yang mempengaruhi pemilihan cetakan yang baik untuk melakukan proses pengecoran. Data tersebut dapat dilihat pada tabel 4.10.

Tabel 4.10 Perbandingan Keseluruhan Hasil Cetakan SS304 dengan Cetakan Pasir

Jenis Cetakan	Keseluruhan Cetakan		Bagian Coran	
	<i>Shrinkage</i>	Tegangan Termal Maksimum	<i>Shrinkage</i>	Tegangan Termal Maksimum
SS304	31135.5 mm ³	3.89E+09 Pa	6.95 mm ³	65228892.2 Pa
Pasir	600 mm ³	2.35E+08 Pa	0.025 mm ³	258718.87 Pa

Setelah mendapat data di atas, kita dapat membandingkan bagaimana hasil dari pengecoran dengan cetakan SS304 serta cetakan pasir.

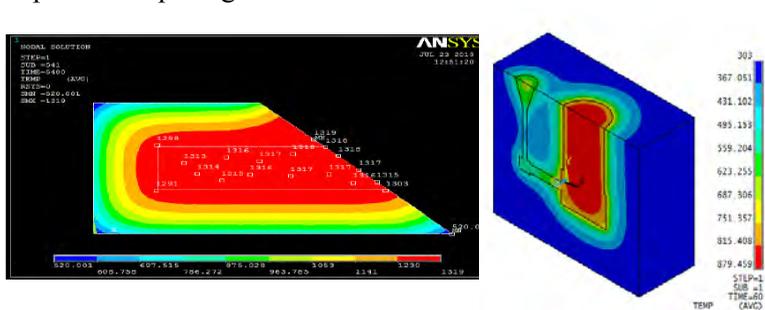
Dari data di atas, dapat diketahui kekurangan dan kelebihan masing-masing cetakan. Cetakan SS304 memiliki kelebihan proses pendinginan yang lebih cepat dibandingkan cetakan pasir. Namun, cetakan SS304 ini memiliki kekurangan yaitu memiliki tegangan termal serta *shrinkage* yang lebih besar daripada cetakan pasir. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa cetakan pasir lebih cocok untuk mendapatkan hasil coran yang lebih bagus. Namun, apabila menginginkan kecepatan pendinginan yang cepat dapat digunakan cetakan SS304 sebagai pilihannya.



4.5. Validasi

Untuk validasi dari penelitian ini, dilakukan perbandingan dengan referensi sebelumnya. Yaitu penelitian yang dilakukan oleh Sunanda pada tahun 2013 yang melakukan penelitian tentang pengecoran besi menggunakan cetakan pasir serta mullite secara dua dimensi dengan ANSYS. Penelitian ini juga bertujuan membandingkan jenis cetakan mana yang lebih baik untuk pengecoran besi. Kemudian parameter yang akan dijadikan perbandingan adalah pola distribusi temperatur serta pola deformasi selama pengecoran.

Untuk melihat perbandingan pola distribusi temperatur antara penelitian ini dengan penelitian yang dilakukan oleh Sunanda dapat dilihat pada gambar 4.20.

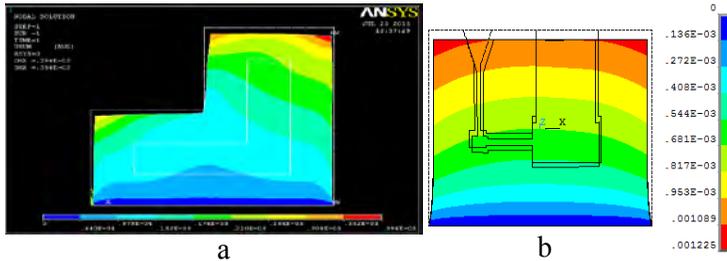


Gambar 4.20 (a) Pola Distribusi Temperatur Pemodelan yang Dilakukan Sunanda (b) Pola Distribusi Temperatur pada Pemodelan ini.

Pola distribusi temperatur yang terjadi memiliki kesamaan dimana pada kondisi awal panas dari daerah coran menyebar di dalam cetakan. Dan temperatur yang paling panas adalah daerah coran.



Kemudian untuk melihat pola penyusutan yang ada akan ditampilkan pada gambar 4.21.



Gambar 4.21 (a) Pola Deformasi Pemodelan yang Dilakukan Sunanda
(b) Pola Deformasi pada Pemodelan ini.

Dapat dilihat bahwa pola deformasi yang terjadi sama. Dimana pada kedua penelitian deformasi yang terjadi merupakan penyusutan dari kedua cetakan.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil dan analisa data yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan:

1. Pada cetakan SS304, temperatur lebih cepat menyebar daripada cetakan pasir. Sehingga menyebabkan pendinginan di dalam cetakan SS304 berlangsung lebih cepat. Pada daerah coran dengan cetakan SS304 didapatkan bahwa pada rentang 60 detik sampai 1260 detik terjadi penurunan temperatur dari 873K menjadi 484K sedangkan pada cetakan pasir sebesar 929K menjadi 658K.
2. Tegangan termal maksimum yang terjadi pada cetakan SS304 adalah sebesar $3.89E+09$ Pa. Lebih besar daripada cetakan pasir yang sebesar $2.35E+08$ Pa.
3. Distribusi temperatur sangat berpengaruh terhadap tegangan termal. Dengan kecepatan penyebaran yang tinggi maka tegangan termal juga semakin tinggi. Semakin tingginya tegangan termal maka *shrinkage* yang terjadi akan semakin besar. Nilai *shrinkage* maksimum pada keseluruhan cetakan SS304 sebesar 31135.5 mm^3 dan untuk cetakan pasir sebesar 600 mm^3 . Sedangkan nilai *shrinkage* maksimum pada coran sebesar 6.95 mm^3 pada cetakan SS304 dan 0.025 mm^3 pada cetakan pasir.
4. Untuk mendapatkan hasil yang baik di dalam pengecoran, maka cetakan pasir lebih cocok dibandingkan cetakan SS304 dikarenakan *shrinkage* yang terjadi lebih kecil jika dibandingkan dengan cetakan SS304.



5.2 Saran

1. Dilakukan penelitian lebih lanjut yang dapat mengetahui laju aliran logam cair selama pengecoran serta fenomena lainnya yang lebih kompleks seperti *crack* dan juga porositas yang terjadi selama pengecoran.
2. Untuk penelitian selanjutnya bentuk cetakan lebih disempurnakan sehingga memiliki kualitas serta efisiensi yang tinggi.

DAFTAR ACUAN

- Alawadhi, Esam M. 2010. *Finite Element Simulations Using ANSYS*. New York : CRC Press.
- Azdast, Taher., dkk. 2008. “Numerical simulation and experimental validation of residual stress induced constrained shrinkage of injection molded parts”. **POLIMERY** 53, 4 : 304-310
- Basavakumar . 2008. “Influence of grain refinement and modification on microstructure and mechanical properties of Al-7Si and Al-7Si-2.5Cu cast alloys”. **Materials Characterization**. 59 : 283–289.
- British Stainless Steel Association
- Callister, William D., David G. Rethwisch. 2009. *Materials Science and Engineering an Introduction Eight Edition*. US : John Wiley & Sons, Inc.
- Campbell, John. 2003. *The New Metallurgy of Cast Metals Castings Second Edition*. UK : University of Birmingham.
- Cevik, E. 2012. “Effect of Peak-Aged Heat Treatment on Corrosion Behavior of The Aa6063 Alloy Containing Al₃Ti”. **Archives of Metallurgy and Materials** 57, 2 : 469-477.
- Chen, Yin-Heng. 1989. “Analysis of Solidification in Sand and Permanent Mold Castings and Shrinkage Prediction”. **Int. J. Mach. Tools Manufact** 30, 2 : 175-189.
- Choudari. 2014. “Methoding and Simulation of LM 6 Sand Casting for Defect Minimization with its Experimental Validation”. **12th Global Congress on Manufacturing And Management** 97 : 1145 – 1154.
- Comsol Materials Library
- Das, Sunanda, dan Rakesh L. Himte. 2013. “Design & Analysis of Pure Iron Casting with Different Moulds”. **International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)** 3, 5: 2875-2887.



- Email, Idrisa Wazamtu. 2013. "Extraction and Quantification of Silicon from Silica Sand Obtained from Zauma River, Zamfara State, Nigeria". **European Scientific Journal** 9 : 160-168
- Gopinath, V., dan N. Balanarasimman. 2012. "Effect of Solidification Parameters on the Feeding Efficiency of Lm6 Aluminium Alloy Casting". **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering** 4 : 32-38.
- Gupta, Arun. 2001. *A Better Way to Cast Aluminum*. Cleveland : Penton Media, Inc.
- Hu, Xinping., Ling Xie. 2011. "FEA Simulations of Temperature Changes of Castings When Solidified and Cooled in Mould". **Journal of Advances in Computer Science and Education Applications part II**. Pp 178 – 183.
- Kaufman, J. Gilbert., dan Elwin L. Rooy. 2004. *Aluminum Alloy Castings : Properties, Processes, and Applications*. ASM International.
- Magnusson, T., L. Arnberg. 2001. "Density and Solidification Shrinkage of Hypoeutectic Aluminum-Silicon Alloys". **Metallurgical and Materials Transactions** 32 : 2605 – 2613
- Nimbulkar, Sachin L, Rajendra S Dalu. 2016. "Design optimization of gating and feedingsystem through simulation technique for sand casting of wear plate". **Perspectives in Science**. Pp 44.
- Pariona, M. M., dan A. C. Mossi. 2005. "Numerical Simulation of Heat Transfer During the Solidification of Pure Iron in Sand and Mullite Molds". **J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng** 27, 4 : 399-406.
- Sudjana, Hardi. 2008. *Teknik Pengecoran Jilid 2*. Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- Surdia, Tata., dan Kenji Chijiwa. 2013. *Teknik Pengecoran Logam*. Jakarta : Balai Pustaka
- Touloukian, Y.S. 1970 a. *Thermophysical Properties of Matter Volume 2 : Thermal Conductivity Non Metallic Solid*. New York: Plenum Publishing Corporation.

- Touloukian, Y.S. 1970 b. *Thermophysical Properties of Matter Volume 5 : Specific Heat Non Metallic Solid*. New York: Plenum Publishing Corporation.
- Touloukian, Y.S. 1970 c. *Thermophysical Properties of Matter Volume 12 : Thermal Expansion Metal and Alloys*. New York: Plenum Publishing Corporation.
- Touloukian, Y.S. 1970 d. *Thermophysical Properties of Matter Volume 13 : Thermal Expansion Non Metallic Solid*. New York: Plenum Publishing Corporation.
- Vaghasia, Dolar. 2009. "Gating System Design Optimization for Sand Casting". Bombay : Department of Mechanical Engineering Indian Institute of Technology Bombay
- Wang, Hong., Shuli Wang, Xiaobing Wang, Entian Li. 2015. "Numerical modeling of heat transfer through casting–mould with 3D/1D patched transient heat transfer model". **International Journal of Heat and Mass Transfer** 81 : 81-89. www.kawasaki.ca/12ninja250r
- Xin-ping, Hu., XIE Ling, ZHANG Juan. 2011. "Self tempering effect of near eutectic Al–Si casting with different wall thickness solidified and cooled in permanent die". **Transactions of Nonferrous Metals Society of China** 21 : 2576-2583.
- Yang, L. 2015. "Numerical simulation and experimental verification of gravity and centrifugal investment casting low pressure turbine blades for high NbTiAl alloy". **Intermetallics** 66 : 149-155.
- Zamani, Mohammadreza. 2015. "Al-Si Cast Alloys - Microstructure and Mechanical Properties at Ambient and Elevated Temperature". Jönköping : School of Engineering, Jönköping University Department of Materials and Manufacturing.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis yang bernama lengkap Muhammad Bahtiyar Firdaus dilahirkan di Magelang pada 25 Juli 1994. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu SD N Kajoran 2, SMP N 1 Salaman dan SMAN 1 Magelang. Setelah lulus dari SMA, penulis mengikuti tes dan diterima sebagai calon Mahasiswa Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2012 serta melanjutkan studi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS dengan nomor registrasi pokok

2712100077.

Semasa kuliah, penulis terdaftar sebagai anggota aktif BSO Material Techno Club selama periode 2013 hingga 2015.

Selesainya tugas akhir ini mengantarkan penulis memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) pada Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi sepuluh Nopember Surabaya.

Email : muhammadbahtiyarf@gmail.com