TUGAS AKHIR – TL184834

SIMULASI TRANSIENT THERMAL PADA PENGECORAN CONNECTING ROD BERBAHAN ALUMINIUM 7075 UNTUK APLIKASI MESIN 150 CC DENGAN VARIASI MATERIAL DAN DESAIN CETAKAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Muhammad Puri Yogatama
NRP. 02511640000114

Dosen Pembimbing
Mas Irfan P Hidayat, S.T., M.Sc., Ph. D.
Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR – TL 184834

SIMULASI TRANSIENT THERMAL PADA PENGECORAN CONNECTING ROD BERBAHAN ALUMINIUM 7075 UNTUK APLIKASI MESIN 150 CC DENGAN VARIASI MATERIAL DAN DESAIN CETAKAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

MUHAMMAD PURI YOGATAMA
NRP. 02511640000114

Dosen Pembimbing
Mas Irfan P Hidayat, S.T., M.Sc., Ph. D.
Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

FINAL PROJECT – TL 184834

SIMULATION OF THERMAL TRANSIENT IN CONNECTING ROD CASTING WITH ALUMINUM 7075 FOR 150 CC MACHINE APPLICATIONS WITH MATERIAL VARIATIONS AND MOLD DESIGN USING FINITE ELEMENT METHODS

Muhammad Puri Yogatama
NRP. 02511640000114

Supervisor
Mas Irfan P Hidayat, S.T., M.Sc., Ph. D.
Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

(*This page is intentionally left blank*)

SIMULASI TRANSIENT THERMAL PADA PENGECORAN CONNECTING ROD BERBAHAN ALUMINIUM 7075 UNTUK APLIKASI MESIN 150 CC DENGAN VARIASI MATERIAL DAN DESAIN CETAKAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
MUHAMMAD PURI YOGATAMA
NRP 02511640000114

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Mas Irfan P Hidayat, S.T., M.Sc., Ph. D.. .....(Pembimbing I)
2. Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.. ..... (Pembimbing II)

SURABAYA
Juli, 2020

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

SIMULASI TRANSIENT THERMAL PADA PENGECORAN CONNECTING ROD BERBAHAN ALUMINIUM 7075 UNTUK APLIKASI MESIN 150 CC DENGAN VARIASI MATERIAL DAN DESAIN CETAKAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama : Muhammad Puri Yogatama
NRP : 02511640000114
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing I : Mas Irfan P Hidayat, S.T., M.Sc., Ph. D.
Pembimbing II : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

Abstrak

Connecting rod merupakan komponen yang penting pada sebuah kendaraan. Pembuatan connecting rod dilakukan dengan pengecoran. Dalam proses pengecoran terdapat banyak fenomena tidak dapat dikontrol secara langsung seperti distribusi temperatur, tegangan termal. Oleh karena itu digunakan ANSYS Mechanical Workbench untuk memprediksi fenomena dalam proses pengecoran. Menggunakan cetakan pasir silika untuk cetakan pasir dan besi cor kelabu sebagai permannet mold. Material yang digunakan untuk coran adalah alumunium alloy 7075 . pada simulasi ini menganalisa distribusi temperatur pada saat pendinginan dan tegangan termal, setelah simulasi didapatkan hasil bahwa kecepatan pendingiann cetakan besi cor kelabu untuk mencapai temperatur minimum 30°C lebih tinggi daripada cetakan pasir yaitu sebesar 36,64 detik untuk model 1 dan 34,64 detik untuk model 2 dibanding cetakan pasir sebesar 44,766 detik untuk model 1 dan 45,334 detik untuk model 2 detik dan tegangan termal pada material besi cor kelabu lebih besar daripada cetakan pasir yaitu tegangan termal tertinggi maksimum pada model 1 cetakan besi cor kelabu sebesar 1,5541e+015 pa dan teredah pada model 2 cetakan pasir sebesar 6,0414e+014 pa

Kata Kunci: ***Metode elemen hingga, pengecoran, connecting rod, Alumunium 7075, tegangan termal, distribusi temperatur,***

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

SIMULATION OF THERMAL TRANSIENT IN CONNECTING ROD CASTING WITH ALUMINUM 7075 FOR 150 CC MACHINE APPLICATIONS WITH MATERIAL VARIATIONS AND MOLD DESIGN USING FINITE ELEMENT METHODS

Student Name : Muhammad Puri Yogatama
NRP : 02511640000114
Department : Material and Metallurgical Engineering
Supervisor : Mas Irfan P Hidayat, S.T., M.Sc., Ph. D.
Co-Supervisor : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

Abstract

Connecting rod is an important component in a vehicle,. Making connecting rod is done by casting. In the casting process there are many common phenomena that cannot be controlled directly such as temperature distribution, thermal stress, shrinkage and mold deformation. Therefore used ANSYS Mechanical Workbench based on finite element method to predict phenomena in the casting process. Use silica sand molds for gray sand and cast iron molds as permanent mold. The material used for castings is 7075 aluminum alloy. in this simulation analyze the temperature distribution during cooling and thermal stress, after the simulation results show that the cooling speed of gray cast iron molds to reach a minimum temperature of 30oC is higher than the sand mold that is equal to 36.64 seconds for model 1 and 34.64 seconds for the model 2 compared to the sand mold of 44.766 seconds for model 1 and 45.333 seconds for the 2 second model and the thermal stress on the gray cast iron material is greater than the sand mold which is the highest maximum thermal stress on the model 1 gray cast iron mold of 1.5541e + 015 pa and the sand mold model 2 is 6.0414e + 014 pa

Keywords: ***Finite element method, casting, connecting rod, Aluminum 7075, thermal stress, temperature distribution***

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

KATA PENGANTAR

Puji sykur kehadirat Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa atas tersusunya laporan tugas akhir berjudul Simulasi Transient Thermal Pada Pengecoran *Connecting Rod* Berbahan Aluminium 7075 Untuk Aplikasi Mesin 150 Cc Dengan Variasi Material Dan Desain Cetakan Menggunakan Metode Elemen Hingga.

Penulis mengucapkan terima kasih ke semua pihak yang telah membantu penulis dalam penyusunan laporan tugas akhir ini, semoga semua bantuan mendapat balasan oleh Allah SWT.

Disamping itu penulis memohon maaf sebesar besarnya jika ada kesalahan saat proses penulisan maupun setelah selesainya penulisan ini, penulis terbuka akan kritikan maupun saran agar menjadikan laporan tugas akhir in menjadi lebih baik.

Surabaya, 18 Juli 2020
Penulis

M. Puri Yogatama

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL ..... **i**
LEMBAR PENGESAHAN ..... **v**
Abstrak ..... **vii**
Abstract ..... **ix**
KATA PENGANTAR ..... **xi**
DAFTAR ISI ..... **xiii**
DAFTAR GAMBAR ..... **xvii**
DAFTAR TABEL ..... **xix**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 1
1.3 Batasan Masalah 2
1.4 Tujuan Penelitian 3
1.5 Manfaat Penelitian 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA **5**
2.1 Penelitian Sebelumnya 5
2.2 Teori Dasar *Connecting Rod* 11
2.2.1 Desain *Connecting Rod* 13
2.3 Alumunium 14
2.3.1 Alumunium Alloy 7075 15
2.4 Pengecoran Pasir 15
2.4.1 *Green sand* 16
2.5 *Permanent Mold Casting* 17
2.5.1 *Gravity Process* 17
2.5.2 Cetakan *Permanent Mold* 18
2.5.3 Keuntungan dan Kerugian Cetakan *Permannet Mold* 19
2.6 Sistem Saluran (*Gating System*) 20
2.6.1 Cawan Tuang (*Laddle*) 21
2.6.2 Saluran Turun (*Sprue*) 21
2.6.3 *Sprue Base Well* 22
2.6.4 *Runner* 22

2.6.5 *Ingate* 23
2.7 Desain *Gating System* 24
2.7.1 Waktu Penuangan 25
2.7.2 *Choke Area* 26
2.8 Toleransi Produk Cor 32
2.8.1 *Shrinkage Allowance* 32
2.8.2 *Draft Allowance* 34
2.8.3 Finishing/Machining Allowance 35
2.9 Diskontinuitas pada pengecoran 36
2.9.1 *Cracks* 36
2.9.2 Penyusutan 36
2.10 Metode Elemen Hingga 37
2.11 Metode Elemen Hingga Menggunakan Ansys Workbench 38
2.12 Aplikasi Metode Elemen Hingga pada Teknik 39
2.13 Analisa Termal 41
2.13.1 Analisa Termal Dengan Metode Elemen Hingga 41
2.13.2 Metode Elemen Hingga pada Konduksi Panas 43
2.13.3 Analisa Tegangan Termal 44
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 47
3.1 Diagram Alir 47
3.2 Spesifikasi Material 48
3.2.1 Alumunium 7075 48
3.2.2 Pasir Silica 49
3.2.3 Besi Cor Kelabu 50
3.3 Perhitungan Data Awal 51
3.3.1 Dimensi *Connecting Rod* 51
3.3.2 Dimensi Pada *Gating System* 52
3.4 Proses Simulasi 53
3.4.1 *Meshing* 53
3.4.2 Simulasi 54
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 55
4.1 Analisa Termal 55

4.1.1 Disribusi Temperatur.....55
4.1.2 Gradien Temperatur 64
4.2 Analisa Struktural 65
4.2.1 Tegangan Termal.....66
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 69
5.1 Kesimpulan 69
5.2 Untuk Saran 69
DAFTAR PUSTAKA 71
LAMPIRAN.....75
UCAPAN TERIMA KASIH.....89
BIODATA PENULIS.....91

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 *Connecting rod*.....12
Gambar 2. 2 Kontruksi *connectinb rod* 12
Gambar 2. 3 Tahapan pembuatan cetakan pasir (T. V. Rao 2003).....16
Gambar 2. 4 *Laddle* dan tanpa *slag* 21
Gambar 2. 5 *Sprue* dengan bentuk lurus dan mempunyai sudut kemiringan (P. Rao 2013).....22
Gambar 2. 6 Perbedaan *runner* penuh dan hanya terisi sebagian (P. Rao 2013).....23
Gambar 2. 7 Jenis-jenis *ingate* (P. Rao 2013) 24
Gambar 2. 8 Tinggi *sprue* (P. Rao 2013).....29
Gambar 2. 9 Dimensi *laddle* (P. Rao 2013).....29
Gambar 2. 10 Dimensi *sprue base well* (P. Rao 2013).....30
Gambar 2. 11 Cacat retak 36
Gambar 2. 12 bidang suhu pada model batang 1 dimensi 42
Gambar 2. 13 kondisi batas suatu kasus pada konduksi panas.....43
Gambar 2.14 pertambahan panas akibat ekpnasi temperature.....45

Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian 47
Gambar 3. 2 Gambar teknik *connecting rod*.....52
Gambar 3. 3 Model 1 *Gating System*.....53
Gambar 3. 4 Model 2 *Gating System*.....53
Gambar 3. 5 Contoh hasil *meshing salah satu cetakan* beserta *connecting rod*.....54

Gambar 4. 1 Distribusi temperature material pasir silika pada model 1 saat step pertama 56
Gambar 4. 2 Distribusi temperature material besi cor kelabu pada model 1 saat step pertama 56
Gambar 4. 3 Distribusi temperature material pasir silika pada model 2 saat step pertama 56

Gambar 4. 4 Distribusi temperature material besi cor kelabu pada model 2 saat step pertama 57
Gambar 4. 5 Distribusi temperature material pasir silika pada model 1 akhir simulasi 57
Gambar 4. 6 Distribusi temperature material besi cor kelabu pada model 1 saat akhir simulasi 58
Gambar 4. 7 Distribusi temperatur material pasir silika pada model 2 saat akhir akhir simulasi 58
Gambar 4. 8 Distribusi temperature material besi cor kelabu pada model 2 saat akhir simulasi 58
Gambar 4. 9 Kurva perubahan temperatur pada Model 1 pasir silika..... 59
Gambar 4. 10 Kurva perbandingan temperatur model 1 besir cor kelabu..... 60
Gambar 4. 11 Kurva perbandingan temperatur model 2 pasir silika..... 60
Gambar 4. 12 kurva perbandingan temperatur model 2 besi cor kelabu 61
Gambar 4. 13 Gradien temperatur model 1 pasir silika 64
Gambar 4. 14 Gradien temperatur model 1 besir cor kelabu 64
Gambar 4. 15 Gradien temperatur model 2 pasir silika 65
Gambar 4. 16 Gradien temperatur model 2 besi cor kelabu 65
Gambar 4. 17 Tegangan termal model 1 pasir silika 66
Gambar 4. 18 Tegangan termal model 1 besi cor kelabu..... 67
Gambar 4. 19 Tegangan termal model 2 pasir silika 67
Gambar 4. 20 Tegangan termal model 2 besi cor kelabu..... 67

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel penelitian sebelumnya 5
Tabel 2.2 Waktu Penuangan Khusus untuk Pengecoran pasir (P. Rao 2013).....26
Tabel 2.3 Nilai koefisien yang hilang untuk berbagai element gate.....27
Tabel 2.4 Rasio luas potongan melintang antara *choke*, *runner*, dan *ingate* (P. Rao 2013) 30
Tabel 2.5 *Shrinkage allowance* untuk beberapa material (P. Rao 2013) 33
Tabel 2.6 *Draft allowance* untuk beberapa material pola.....34
Tabel 2. 7 *Machining allowance* untuk beberapa material.....35
Tabel 2. 8 Aplikasi Metode Elemen Hingga (Liu 2019) 40
Tabel 3. 1 Komposisi Alumunium 7075 (ASM International 1990).....48
Tabel 3. 2 Konduktifitas Thermal terhadap Temperatur (JMatPro).....48
Tabel 3. 3 Young Modulus dan nilai *poisson ratio* Alumunium 7075 (JMatPro).....48
Tabel 3. 4 Komposisi Pasir Silica.....49
Tabel 3. 5 Konduktifitas Thermal terhadap Temperatur (JMatPro).....49
Tabel 3. 6 Tabel sifat fisik dari besi cor kelabu (L. H. Van Vlack 1982) 50
Tabel 3. 7 Tabel komposisi besi cor kelabu (L. H. Van Vlack 1982).....50
Tabel 3. 8 Konduktifitas Thermal terhadap Temperatur (JMatPro).....51
Tabel 3. 9 Tabel dimensi connecting rod.....51
Tabel 3. 10 Tabel dimensi *gating system connecting rod*.....52
Tabel 4 1 Perbandingan temperatur pada awal simulasi.....57
Tabel 4 2 Perbandingan temperatur pada akhir simulasi 59
Tabel 4 3 Perbandingan tegangan termal.....67

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Connecting rod adalah komponen mesin berfungsi meneruskan gaya dari piston menuju *crankshaft* yang akan diteruskan sistem *gear* sampai dapat menggerakkan roda. *Connecting rod* dapat dibuat dengan berbagai metode seperti forging (penempaan) dan casting (pengecoran). Dalam memilih metode pembuatan *connecting rod* dibutuhkan banyak pertimbangan seperti biaya pembuatan hingga material. Menurut (Plancak, et al. 2013), pembuatan *connecting rod* berdasarkan sifat mekanik,berat dan biaya. Mesin yang membutuhkan kinerja tinggi *connecting rod* dibuat dengan cara penempaan. *Connecting rod* tempa memberikan sifat mekanik yang tinggi yang mampu menahan beban tinggi. Mobil berkecepatan tinggi semuanya menggunakan *connecting rod* dengan cara penempaan. Sedangkan *connecting rod* dengan pembuatan melalui pengecoran mempunyai sifat mampu mesin yang baik, namun sifat mekanik yang lebih rendah dibandingkan *connecting rod* tempa. Maka *connecting rod* jenis cor digunakan untuk mesin dengan beban dan kecepatan yang rendah antara lain adalah sepeda motor. Sebagai pertimbangan lain melihat sisi biaya pembuatan dalam manufaktur. (Sidhpara, Kureshi and Patel 2013) melakukan penelitian tentang perbandingan biaya pembuatan *connecting rod* antara proses penempaan dan pengecoran. Disimpulkan bahwa biaya proses pengecoran lebih murah daripada proses penempaan untuk *connecting rod*. Untuk jenis pengecoran yang digunakan berdasarkan jumlah produk memiliki keterkaitan, menurut (Ashby 2011) yaitu biaya pembuatan *connecting rod* dengan jumlah dibawah ±100 unit adalah menggunakan pengecoran pasir karena memiliki biaya produksi paling rendah daripada metode pengecoran lain. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Rao, Kumar and Vijayaganapathy 2018), material aluminium 7075 bisa

digunakan untuk membuat *connecting rod* mesin kendaraan roda dua. Penelitian tersebut bertujuan mencari alternatif material pengganti selain aluminium 360 yang banyak digunakan.

Agar dapat menghemat waktu serta biaya eksperimen dan mencapai hasil yang memuaskan maka digunakan metode elemen hingga agar dapat meningkatkan efisiensi dan menganalisa pengecoran dengan berbagai macam variabel yang berpengaruh pada hasil coran tanpa memakan waktu dan biaya. Dengan metode elemen hingga dapat mengetahui berbagai variabel dan faktor pada pengecoroan yang dapat diprediksi sebelum atau sesudah pengecoran seperti laju aliran logam cair, distribusi panas, tegangan termal, penyusutan, kecepatan solidifikasi dan retakan dalam yang dapat diprediksi.

1.2 Perumusan Masalah

Dari latar belakang di atas dapat dirumuskan beberapa permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana tegangan termal yang terjadi saat proses pengecoran?
2. Bagaimana distribusi panas yang terjadi saat proses pengecoran?
3. Bagaimana pengaruh material cetakan terhadap distribusi temperature serta tegangan termal?
4. Bagaimana pengaruh desain cetakan terhadap pendinginan hasil coran?

1.3 Batasan Masalah

Untuk mendapatkan hasil penelitian yang optimal maka perlu dibatasi beberapa aspek yaitu sebagai berikut:

1. Pengecoran dilakukan dengan *sand casting* dan di mana karakteristik cetakan dianggap dalam kondisi optimal
2. Material Cetakan dan Coran dianggap homogen
3. Perhitungan simulasi material coran dimulai pada temperature benda mencapai 200°C

1.4 Tujuan Penelitian

Dari rumusan masalah di atas dapat dituliskan tujuan dari penelitian sebagai berikut:

1. Menganalisis tegangan termal yang terjadi saat proses pengecoran
2. Menganalisis distribusi panas yang terjadi saat proses pengecoran
3. Menganalisis pengaruh material cetakan terhadap distribusi temperature serta tegangan termal
4. Menganalisis pengaruh desain cetakan terhadap pendinginan hasil coran

1.5 Manfaat Penelitian

Setelah melakukan penelitian ini diharapkan membawa manfaat sebagai berikut:

1. Mampu memahami dan menjelaskan persebaran panasyang terjadi saat solidifikasi untuk dapat mengetahui cacat dalam pengecoran dan memperoleh solusi untuk mendapat persebaran panas yang merata.
2. Mampu memahami dan membuat desain cetakan coran (*sprue, pouring basin, runner, dan ingate*) untuk menghindari aliran turbulen logam cair.
3. Mampu memahami dan membuat desain *connecting rod* sesuai dengan material dan spesifikasi mesin pembakaran dalam.
4. Mampu menyediakan sumber belajar dalam bidang pengecoran logam

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Tabel 2.1 Tabel penelitian sebelumnya

No	Peneliti	Metode	Hasil
1	Muhammad Bahtiyar Firdaus (2016)	Menggunakan metode elemen hingga untuk mengalanisa proses perpindahan panas pada pada paduan AL-Si dengan variable material cetakan yaitu cetakan pasir silika dan cetakan SS304	1. Tegangan termal pada cetakan SS304 lebih besar dari cetakan pasir 2. Distribusi panas lebih cepat menyebar di cetakan SS304 daripada cetakan pasir
2	Shubham Chougale (2017)	Mengunakan metode elemen hingga untuk menganalisa dan membandingkan pengaruh material	1. *Connecting rod* dari Al 360 mempunyai ketahan lebih baik daripada *structural steel*

		connecting rod terhadap termal dan struktural	2. Pada *connecting rod* Al 360 mempunyai *heat flux* yang lebih tinggi dari *structural steel*
3	Anshul Tiwari, Aakash Singh Bhadauria (2018)	Perhitungan gating system untuk material 6061T6 Alumunium meggunakan rasio 1:4:4 pada cetakan pasir silika	Penggunaan desain *feeder* dan lokasinya dapat mentransfer cacat penyusutan dan menyediakan tambahan material
4	Srikanth Karumuri , Terefe Jima , Masresha Adasho , Veeranjaneyulu Itha (2017)	Desain *Connecting rod* menggunakan software pro engineering dengan 8 *cavity*	Desain *connecting rod* dengan 8 *cavity* dilakukan pengalisaan dengan program CNC programming dan disimpulkan *connecting*

			rod siap diprodksi
5	C M Choudhari ,B E Narkhede , V.J.T.I., Mumbai,S K Mahajan	Menggunakan metode elemen hingga untuk penyusutan pada cetakan pasir	Dengan menggunkan *sotware* ansys dapat mengetahu penempatan *riser* dan *feeder* yang optimal sehingga tidak perlu melakukan percobaan eksperimental yang erulang - ulang serta meringkan biaya dan mempercepat waktu pengerjaan
6	Bayu Prayoga (2015)	Menganalisa sistem saluran menggunakan metode elemen hingga untuk mendeteksi cacat penyustan	Dengan menggunkan *software* ansys dapat diketahui letak cact penyusutan dan menemukan

			dimensi optimal pada *riser*
7	S. Aishwarya , E.V.V.Ramanamurthy (2015)	Optimisasi desain *connecting rod* menggunakan metode elemen hingga	Tegangan dan regangan dari desain yang dimodfikasi lebih kecil dari aslinya dan material dari modifikasi baru lebih bagus daris sebelumnya
8	Ankit B. Sidhpara, Vashim I. Kureshi, Prof. Pinank A. Patel	Menganalisa metode *manufacturing connecting rod* untuk mengurangi biaya menggunkan metode elemen hingga	Didapatkan *connecting rod* dari besi dari cetakan pasir mempunyai kekuatan yang sama dengan *connecting rod* dari baja yang dibuat dengan proses *forging* dan biayanya lebih murah menggunkaan *coennecting rod* dari besi

9	Miroslav Plancal, Dragisa Vilotic, Ognjan Luzanin, Igor Kacmarcik, Aljosa Ivanisevic, Dejan Movrin, Plavka Skakun, dan Mladomir Milutinovic	Studi lapangan di perusahaan-perusahaan China.	1. Metode *forging* menghasilkan sifat mekanik yang tinggi dan mampu menahan beban berat. Digunakan untuk semua mobil dengan kecepatan tinggi 2. Metode *powder forging* dicirikan dengan akurasi dimensi yang tinggi dan *zero waste* (limbah yang sedikit), namun biaya yang

			dibutuhkan 30% lebih tinggi dari metode *forging* Metode pengecoran digunakan karena biaya manufaktur yang paling rendah, namun sifat mekaniknya yang dihasilkan juga rendah. *Connecting rod* dengan cara dicor hanya digunakan untuk mesin berkekuatan rendah.
10	F. Michael Ashby	Studi perbandingan biaya material dalam pengecoran *connecting rod* antara	Membandingkan biaya material berdasarkan jumlah *connecting rod* yang

	sand casting, low pressure casting, dan *die casting*.	dicor. Didapatkan grafik antara biaya material, jenis pengecoran, dan jumlah produk yang dihasilkan. Untuk pengecoran pasir paling murah ketika digunakan untuk membuat produk sampai dengan 100 buah.

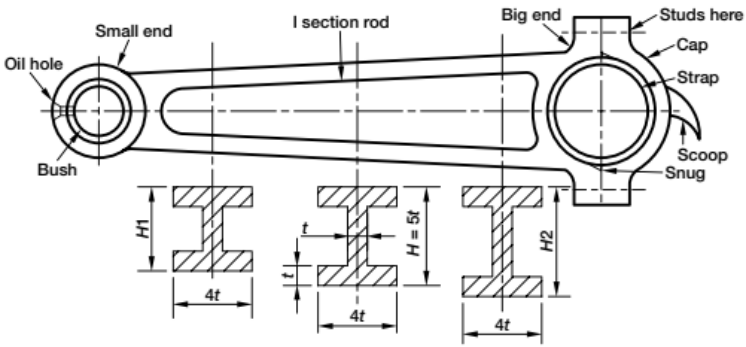
2.2 Teori Dasar *Connecting Rod*

Connecting rod adalah salah satu komponen pada mesin pembakaran dalam (*internal Combustion Engine)*. Fungsi *connecting rod* adalah menyalurkan gaya dorong bahan bakar dari piston (gerakan naik turun) ke *crankshaft* (gerak rotasi). Bagian *connecting rod* yang tersambung pada piston disebut *small end* dan bagian yang tersambung pada *crankshaft* disebut *big end*. Panjang *connecting rod* diukur dari pusat *gudgeon pin* (bagian pada piston) sampai pusat *crank pin* (bagian pada *crankshaft*). Semakin pendek *connecting rod* akan meningkatkan gerakan bolak-balik pada *gudgeon pin* dan gaya dorong pada sisi piston sehingga menyebabkan cepat aus. Semakin panjang *connecting rod* maka

akan meningkatkan berat *connecting rod.* Sehingga rasio panjang *connecting rod* dengan jari-jari *crankshaft* dibuat antara 4-5.

Gambar 2. 1 *Connecting rod*

Potongan melintang *connecting rod* berbentuk lingkaran atau persegi untuk mesin sederhana. Untuk mesin berkecepatan tinggi menggunakan potongan melintang berbentuk I (*I section*) untuk mengurangi berat *connecting rod* dan gaya inersianya. Jika t adalah ketebalan *I secrion* seperti pada Gambar 2.2, maka lebar *connecting rod* adalah 4t. Lebar *connecting rod* dibuat sama dari *small end* sampai *big end*, sedangkan tingginya tidak semakin besar dari *small end* sampai *big end*. Tinggi di tengah *connecting rod* adalah 5t. Ketebalan t dihitung berdasarkan gaya piston yang dihasilkan bahan bakar. Tinggi *small end* (H1) adalah 0,75H sampai 0,95H, sedangkan tinggi *big end* (H2) adalah 1,1H sampai 1,25H. (A. Singh 2017)



Gambar 2. 2 Kontruksi *connectinb rod*

2.2.1 Desain *Connecting Rod*

Dalam membuat dimensi *connecting rod* terdapat tiga bagian utama yaitu *small end*, *I section*, dan *big end*. Untuk diameter *small end* bergantung pada diameter *gudgeon pin* (penghubung piston dengan *connecting rod*) menggunakan persamaan 2.1

$$F = d_p l_p p_{bp} \text{.....(2.1)}$$

Dimana d_p adalah diameter *gudgeon pin*, F adalah gaya hasil pembakaran, l_p adalah panjang *gudgeon pin* (1,5d_p sampai 2d_p), dan p_{bp} adalah tekanan bantalan (10 MPa sampai 15 MPa). Lalu untuk mengetahui diameter dalam *small end* adalah diameter *gudgeon pin* ditambah dengan dua kali ketebalan bantalan (2 mm sampai 5 mm), sedangkan diameter luar *small end* adalah diameter dalam ditambah dengan dua kali ketebalan marginal (5 mm sampai 10 mm). Demikian juga dengan diameter dari *big end* prinsip perhitungannya sama dengan diameter *small end*. Bedanya adalah pada panjang *crank pin* ($l_c = 1{,}25d_c$ sampai $1{,}5d_c$) dan tekanan bantalan ($p_{bc} = 7$ MPa sampai 12 Mpa)

Untuk *I section* yang diperlukan adalah mencari nilai t. Mula-mula adalah mencari momen inersia dari *I section* menggunakan persamaan 2.2.

$$I = \frac{1}{12}[\{4t \times (5t)^3\} - \{3t(3t)^3\}] \text{.....(2.2)}$$

Dari momen inersia dapat diketahui radius girasi yaitu ukuran distribusi massa yang disimbolkan huruf k sesuai Persamaan 2.3.

$$k = \sqrt{\frac{I}{A}} \text{.....(2.3)}$$

Radius girasi ini dimasukkan dalam persamaan rankine 2.4 untuk mendapatkan nilai t.

$$F_p = \frac{\sigma_c A}{1 + a\left(\frac{1}{k}\right)^2} \text{.....(2.4)}$$

Dimana F_p adalah gaya piston, σ_c adalah *compressive yield strength* material yang digunakan, A adalah luas *I section*, dan a adalah konstanta sesuai dengan material yang digunakan. a didasarkan pada modulus elastisitas dan *compressive yield*

strength. Untuk mencari a digunakan persamaan 2.5. (A. Singh 2017)

$$\frac{\sigma_c}{\pi^2 E} \quad (2.5)$$

2.3 Alumunium

Dari semua *non-ferrous alloy*, aluminium dan paduanya sangat penting karena sifatnya yang bagus. Beberapa sifat dari alumunium murni yang digunakan dalam industry Teknik antara lain adalah :

1. Konduktivtas *thermal* yang baik (0.53 cal/cm/^{o}C)
2. Konduktivitas elektrik yang baik (376,600/ohm/cm)
3. Kepadatan massa yang rendah (2,7g/cm^3)
4. Titik leleh yang rendah (658°C)
5. Daya tahan terhadap korosi yang baik. Aluminium mempunyai afinitas yang lebih besar terhadap oksigen, sebagai hasilnya ketika alumunium terkena udara, lapisan luar teroksidasi membentuk alumunium oksida, lapisan oksida mempunyai ikatan yang baik dengan alumunium dan melindunginya dari oksidasi yang berlebihan.
6. Tidak beracun
7. Mempunyai refleksitas yang tinggi (85 sampi 95%) dan emisivitas yang sangat rendah (4 sampai 5%)
8. Sangat lunak dan ulet yang menjadikan sifat mampu mesin yang baik

Meskipun beberapa kegunaan diatas, alumunium murni tidak biasa digunakan karena permasalahan berikut ini

1. Mempunyai kekuatan tarik yang rendah
2. Sulit untuk dilas atau solder

Sifat mekanik dari alumunium dapat ditingkatkan dengan paduan. Paduan utama dari element paduan yang digunakan adalah tembaga, mangan, silicon, nickel dan seng. (Rao P. , 2013)

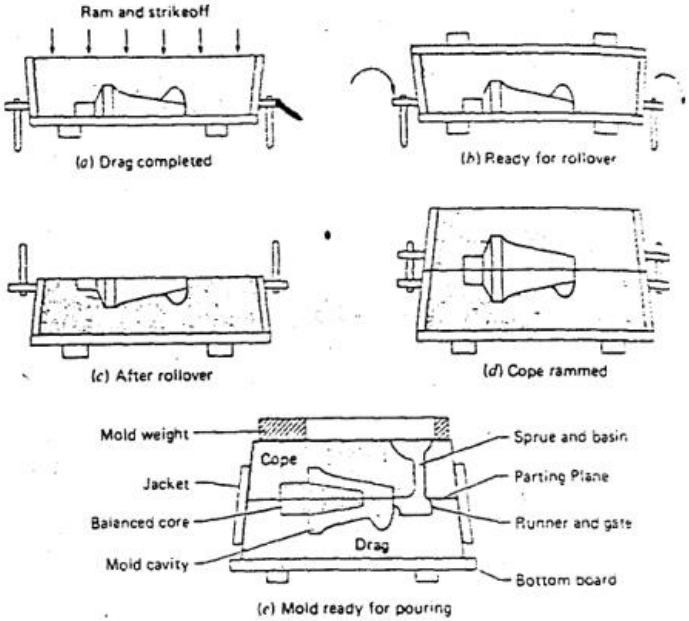
2.3.1 Alumunium Alloy 7075

7075 paduan aluminium (AA7075) adalah paduan aluminium, dengan seng sebagai elemen paduan utama. Memiliki sifat mekanik yang sangat baik, dan menunjukkan keuletan yang baik, kekuatan tinggi, ketangguhan dan ketahanan yang baik untuk kelelahan. Hal ini lebih rentan terhadap penggetasan dari banyak paduan aluminium lain karena microsegregasi, tetapi memiliki ketahanan korosi secara signifikan lebih baik daripada paduan 2000. Komposisi paduan aluminium 7075 secara kasar meliputi seng 5,6–6,1%, magnesium 2,1–2,5%, tembaga 1,2–1,6%, dan kurang dari setengah persen silikon, besi, mangan, titanium, kromium, dan logam lainnya. (ASM International, 1990)

7075 pertama dikembangkan secara rahasia oleh perusahaan Jepang, Sumitomo Metal, pada tahun 1935, tetapi diperkenalkan oleh Alcoa pada tahun 1943 dan distandarisasi untuk penggunaan luar angkasa pada tahun 1945. Umum 7075 karakteristik dan penggunaan (dari Alcoa): Bahan berkekuatan sangat tinggi digunakan untuk bagian struktural yang menerima tekanan tinggi. aplikasi: Alat kelengkapan pesawat terbang, roda gigi dan poros, *connecting rods*, bagian sekering, poros dan roda meter, bagian rudal, pengatur bagian katup, roda gigi cacing, kunci, pesawat udara, aplikasi luar angkasa dan pertahanan; dan frame sepeda

2.4 Pengecoran Pasir

Pengecoran pasir, juga dikenal sebagai pengecoran cetakan pasir, adalah proses pengecoran logam yang ditandai dengan menggunakan pasir sebagai bahan cetakan. Istilah "pengecoran pasir" juga bisa merujuk ke objek yang diproduksi melalui proses pengecoran pasir. Pengecoran pasir diproduksi di pabrik khusus yang disebut *Foundry*. Lebih dari 60% dari semua coran logam diproduksi melalui proses pengecoran pasir. (T. V. Rao 2003)



Gambar 2. 3 Tahapan pembuatan cetakan pasir (T. V. Rao 2003)

Cetakan pasir paling banyak digunakan karena murah dan murah dilaksanakan. Proses pembuatan cetakan dapat dilakukan secara manual, atau mekanikal pada mesin *jolting* untuk memadatkan pasir. (Sadino 2007)

2.4.1 *Green sand*

Green sand yaitu pasir cetak dengan pengikat tanah liat. Green sand adalah agregat pasir, tanah liat bentonit, batu bara bubuk dan air. Pembuatannya dapat dilakukan dengan *bench molding, joint-squeeze molding, automatic molding, high- pressure molding, floor molding* dan *pit molding*. (Sadino 2007)

Secara singkat cetakan harus kuat untuk dapat menahan berat logam cair, tahan terhadap erosi akibat aliran dan panasnya logam

cair, mampu mengalirkan gas, tahan terhadap temperatur tinggi dan mampu ambruk setelah penuangan selesai. Dengan mampu ambruk yang baik dimaksudkan agar tidak menghambat perubahan dimensi pada saat pendinginan coran. (Sadino 2007)

2.5 *Permanent Mold Casting*

Pengecoran cetakan permanen adalah proses pengecoran logam yang menggunakan cetakan yang dapat digunakan kembali ("cetakan permanen"), biasanya terbuat dari logam. Proses yang paling umum menggunakan gravitasi untuk mengisi cetakan, namun tekanan gas atau ruang hampa juga digunakan. Variasi pada proses pengecoran gravitasi khusus, yang disebut pengecoran *slush*, menghasilkan coran berongga. Logam casting yang umum adalah aluminium, magnesium, dan paduan tembaga. Bahan lain termasuk timah, seng, dan paduan timah dan besi dan baja juga dicetak dalam cetakan grafit (Degarmo, Black and Kohser 2003). Produk khas adalah komponen seperti roda gigi, *connecting rod*, roda, perlengkapan pipa, dan piston mesin otomotif. (Todd, Allen and Alting 1994)

2.5.1 *Gravity Process*

Proses gravitasi dimulai dengan memanaskan cetakan hingga 150–200 ° C (300–400 ° F) untuk memudahkan aliran dan mengurangi kerusakan termal pada cetakan. Rongga cetakan kemudian dilapisi dengan bahan tahan api atau pencuci cetakan, yang mencegah pengecoran menempel pada cetakan dan memperpanjang umur cetakan. Pasir atau inti logam apa pun kemudian dipasang dan cetakan dijepit tertutup. Logam cair kemudian dituangkan ke dalam cetakan. Segera setelah pemadatan, cetakan dibuka dan cetakan dibuang untuk mengurangi kemungkinan *hot tears*. Proses ini kemudian dimulai dari awal lagi, tetapi pemanasan awal tidak diperlukan karena panas dari pengecoran sebelumnya cukup dan lapisan tahan api harus berlangsung beberapa kali tuang. Karena proses ini biasanya dilakukan pada produksi besar yang dijalankan, peralatan otomatis

digunakan untuk melapisi cetakan, menuangkan logam, dan menghilangkan casting (Degarmo, Black and Kohser 2003).

Logam dituangkan pada suhu praktis terendah untuk meminimalkan retakan dan porositas. Temperatur penuangan dapat bervariasi tergantung pada bahan casting; misalnya paduan seng dituangkan pada suhu sekitar 370 ° C (698 ° F), sedangkan besi abu-abu dituangkan sekitar 1.370 ° C (2.500 ° F). (Todd, Allen and Alting 1994)

2.5.2 Cetakan *Permanent Mold*

Cetakan untuk proses pengecoran terdiri dari dua bagian. Cetakan pengecoran biasanya dibentuk dari besi cor kelabu karena memiliki ketahanan terhadap kelelahan termal terbaik, tetapi bahan lainnya termasuk baja, perunggu, dan grafit. Logam-logam ini dipilih karena ketahanannya terhadap erosi dan kelelahan termal. Mereka biasanya tidak terlalu kompleks karena cetakan tidak menawarkan kolapibilitas untuk mengkompensasi penyusutan. Sebaliknya cetakan dibuka segera setelah casting dipadatkan, yang mencegah *hot tears*. *Core* dapat digunakan dan biasanya terbuat dari pasir atau logam. (Degarmo, Black and Kohser 2003) (Kalpakjian and Schmid 2006)

Seperti yang dinyatakan di atas, cetakan dipanaskan sebelum siklus casting pertama dan kemudian digunakan secara terus menerus untuk mempertahankan suhu yang serata mungkin selama siklus. Ini mengurangi kelelahan termal, memperlancar aliran logam, dan membantu mengontrol laju pendinginan logam cor. (Degarmo, Black and Kohser 2003)

Ventilasi biasanya terjadi melalui sedikit celah antara dua bagian cetakan, tetapi jika ini tidak cukup maka lubang ventilasi sangat kecil digunakan. Mereka cukup kecil untuk membiarkan udara keluar tetapi bukan logam cair. *Riser* juga harus disertakan untuk mengkompensasi penyusutan. Ini biasanya membatasi hasil menjadi kurang dari 60%. Ejector mekanis dalam bentuk pin digunakan ketika pelapis tidak cukup untuk menghilangkan cetakan dari cetakan. Pin ini ditempatkan di seluruh cetakan dan

biasanya meninggalkan jejak bulat kecil pada casting. (Degarmo, Black and Kohser 2003)

2.5.3 Keuntungan dan Kerugian Cetakan *Permannet Mold*

Keuntungan utama adalah cetakan yang dapat digunakan kembali, permukaan akhir yang baik, akurasi dimensi yang baik, dan tingkat produksi yang tinggi. Keuntungan lain termasuk kemudahan menginduksi pemadatan arah dengan mengubah ketebalan dinding cetakan atau dengan memanaskan atau mendinginkan bagian cetakan. Laju pendinginan cepat yang dibuat dengan menggunakan cetakan logam menghasilkan struktur butiran yang lebih halus daripada pengecoran pasir. (Degarmo, Black and Kohser 2003)

Ada tiga kelemahan utama: biaya perkakas tinggi, terbatas pada logam dengan titik leleh rendah, dan masa pakai cetakan yang singkat. Biaya perkakas tinggi membuat proses ini tidak ekonomis untuk operasi produksi kecil. Ketika proses ini digunakan untuk mengecor baja atau besi, umur cetakan sangat singkat. Untuk logam dengan titik leleh yang lebih rendah, umur cetakan lebih lama tetapi kelelahan termal dan erosi biasanya membatasi masa pakai hingga 10.000 hingga 120.000 siklus. Daya tahan cetakan tergantung pada empat faktor: bahan cetakan, suhu penuangan, suhu cetakan, dan konfigurasi cetakan. Cetakan yang terbuat dari besi cor kelabu bisa lebih ekonomis untuk diproduksi tetapi memiliki masa pakai cetakan yang pendek. Di sisi lain, cetakan yang terbuat dari baja perkakas H13 mungkin memiliki masa pakai cetakan beberapa kali lebih besar. Temperatur tuang tergantung pada logam tuang, tetapi semakin tinggi suhu tuang semakin pendek umur cetakan. Suhu penuangan yang tinggi juga dapat menyebabkan masalah susut dan menciptakan waktu siklus yang lebih lama. Jika suhu cetakan terlalu rendah maka akan terjadi misrun, tetapi jika suhu cetakan terlalu tinggi maka waktu siklus diperpanjang dan erosi cetakan meningkat. Perbedaan besar dalam ketebalan bagian dalam cetakan atau pengecoran juga dapat

menurunkan masa pakai cetakan. (Degarmo, Black and Kohser 2003)

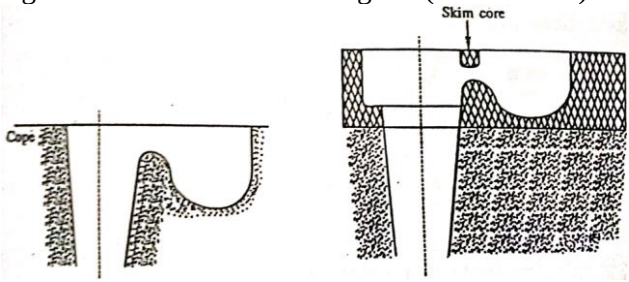
2.6 Sistem Saluran (*Gating System*)

Sistem saluran menurut (P. Rao 2013) adalah adalah semua bagian yang dilewati oleh logam cair dari *laddle* sampai rongga cetakan. Bagian-bagian ini di antaranya adalah cawan tuang (*pouring basin*), saluran turun (*sprue*), *spure base well*, saluran pengalir (*runner*), *ingate*, penambah (*riser*). Untuk meminimalisir terjadinya cacat pada produk pengecoran terdapat beberapa kriteria umum yang harus diperhatikan yaitu:

1. Cetakan harus terisi secara penuh dalam waktu cepat namun menghindari cairan logam tumpah (karena apabila terlalu cepat bisa jadi cairan logam luber).
2. Cairan harus mengalir secara halus untuk menghindari turbulensi.
3. Menghindari material pengotor seperti rontokan cetakan masuk ke dalam rongga cetakan.
4. Aliran logam cair harus diatur sedemikian rupa melalui desain *gating system* sehingga dapat menghindari masukknya gas-gas ke dalam logam cair yang dapat menyebabkan cacat porositas.
5. Temperatur dalam sistem pengecoran harus diperhatikan untuk mengatasi penyusutan dan tegangan logam ketika pendinginan.
6. Aliran logam cair harus diperhatikan sehingga tidak menyebabkan erosi pada cetakan maupun *gating system*.
7. *Gating system* harus memastikan logam cair bisa mencapai rongga cetakan.
8. *Gating system* harus dirancang secara ekonomis, mudah dibuat, dan mudah dilepaskan dari produk cor.
9. *Casting yield* (efisiensi pengecoran) harus dibuat semaksimal mungkin.

2.6.1 Cawan Tuang (*Laddle*)

Logam cair tidak dituangkan secara langsung ke dalam rongga cetakan karena dapat menyebabkan erosi pada dinding cetakan. Logam cair dituangkan melalui cawan tuang terlebih dahulu agar ketika logam cair masuk ke *sprue*, alirannya lebih halus. *Laddle* juga dapat menangkap *slag* (pengotor dalam logam cair) yang mengapung dengan adanya *skim core* seperti pada Gambar 2.4. *Laddle* harus selalu penuh selama proses penuangan logam cair sehingga dapat menghindari gejolak cairan yang dapat menimbulkan gas-gas dalam logam cair. Dinding *laddle* sebaiknya mempunyai kemiringan 45° terhadap horisontal yang lagi-lagi berguna untuk menghindari erosi dan gejolak pada cairan, mengingat kriteria umum pengecoran nomor tiga di atas yaitu aliran logam cair dibuat sehalus mungkin. (P. Rao 2013)

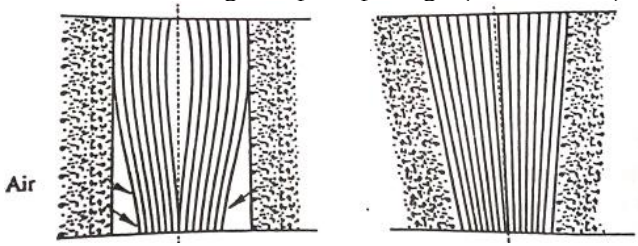


Gambar 2. 4 *Ladde* dan tanpa *slag*

2.6.2 Saluran Turun (*Sprue*)

Saluran turun sesuai namanya adalah saluran vertikal yang mengalirkan logam cair dari *pouring basin* ke *runner* atau langsung ke rongga cetakan. *Sprue* juga didesain untuk menghindari adanya gas yang masuk ke logam cair dan aliran turbulen. Apabila *sprue* dibuat silinder lurus seperti pada ‘Gambar 2.5 maka aliran logam cair tidak penuh mengisi bagian bawah. Pada daerah yang tidak terisi aliran menjadi bertekanan rendah. Karena cetakan pasir bersifat permeabel maka udara dari luar cetakan bisa masuk pada daerah ini. Untuk menghindari peristiwa ini maka dibuatlah *sprue* yang penampang melintangnya semakin mengecil ke bawah.

Bentuk potongan melintang *sprue* ada yang berbentuk lingkaran ada juga yang persegi. Tujuan bentuk persegi adalah menghindari aliran berputar (*vortex formation*). Namun untuk pengecoran produk kecil penggunaan *sprue* lingkaran sudah cukup karena lebih ekonomis dibandingkan *sprue* persegi. (P. Rao 2013)



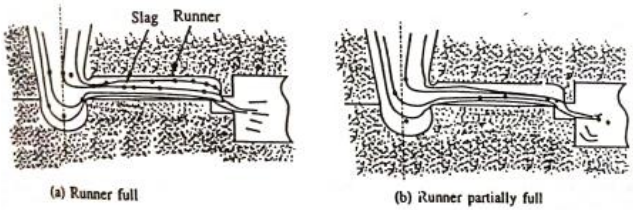
Gambar 2. 5 *Sprue* dengan bentuk lurus dan mempunyai sudut kemiringan (P. Rao 2013)

2.6.3 *Sprue Base Well*

Bagian ini terdapat di bawah *sprue* yang berguna untuk mengurangi kecepatan aliran logam cair dari *sprue*. *Sprue* yang mempunyai ketinggian besar menyebabkan cairan logam memiliki kecepatan yang besar pula pada saat di bawah *sprue*. *Sprue base well* berperan untuk mengatasi hal ini agar tidak terjadi gejolak cairan yang besar ketika masuk *runner*. (P. Rao 2013)

2.6.4 *Runner*

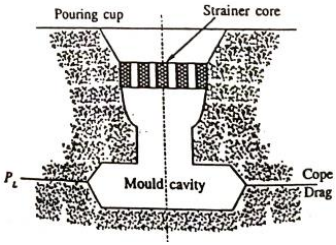
Runner secara umum terletak pada *parting line* yang berfungsi menghubungkan *sprue base well* menuju *ingate*. Secara umum potongan melintang *runner* berbentuk trapesium. Sebagian besar *runner* terletak pada *cope* dan *ingate* terletak pada *drag*. Hal ini dimaksudkan untuk menangkap *slag* (pengotor dalam logam cair) agar tidak masuk ke dalam rongga cetakan. Agar penangkapan *slag* bisa efektif, *runner* harus selalu terisi penuh cetakan. Hal ini bisa dilakukan dengan melakukan penuangan cepat agar *runner* selalu penuh terisi logam cair. Apabila *runner* tidak terisi penuh makan *slag* akan ikut terbawa masuk ke dalam rongga cetakan seperti pada Gambar 2.6. (P. Rao 2013)



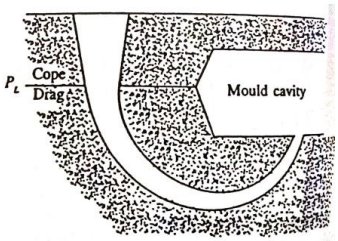
Gambar 2. 6 Perbedaan *runner* penuh dan hanya terisi sebagian (P. Rao 2013)

2.6.5 *Ingate*

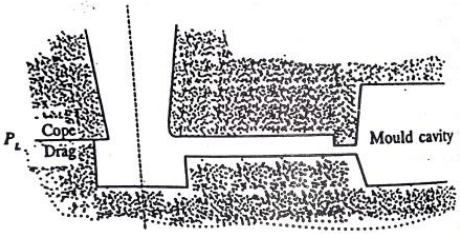
Ingate adalah tempat masuknya logam cair dari *runner* ke dalam rongga cetakan. Bentuk dari *ingate* harus bisa memudahkan pelepasan *gating system* dari produk cor. Jenis *ingate* yang paling banyak digunakan dalam pengecoran pasir adalah *parting gate*. Pada *ingate* jenis ini, logam cair masuk ke dalam rongga cetak melalui *parting line*. Sedangkan untu *top gate* dan *bottom gate* secara berturut-turut logam cair masuk melalui *cope* dan *drag*. Sebagai gambaran perbedaan ketiga jenis *ingate*, bisa dilihat pada Gambar 2.7. Dari ketiga jenis *ingate* tersebut, jenis *parting gate* adalah yang paling mudah dan ekonomis dalam pembuatannya. Namun untuk jenis ini, apabila rongga cetakan bagian *drag* terlalu dalam, aliran logam cair ketika melewati *ingate* bisa menyebabkan erosi cetakan dan timbul gas akibat gejolak dari aliran. Untuk mengatasi rongga cetakan bagian *drag* yang terlalu dalam, bisa dengan membuat *ingate* lebih besar sehingga logam cair dapat mengalir merambat melalui dinding cetakan. (P. Rao 2013)



Top gate



Bottom gate



Parting gate

Gambar 2. 7 Jenis-jenis *ingate* (P. Rao 2013)

2.7 Desain *Gating System*

Gating system memunyai banyak tujuan, yang paling penting adalah menyampaikan bahan cair ke cetakan, tetapi juga mengendalikan penyusutan, kecepatan cairan, dan turbulensi. *Gates* biasanya dilekatkan pada bagian paling tebal dari casting untuk membantu mengendalikan penyusutan. Dalam coran besar, banyak *Gate* atau *runner* mungkin diperlukan untuk memasukkan logam ke lebih dari satu titik di rongga cetakan. Kecepatan material itu penting karena jika material itu berjalan terlalu lambat dapat mendingin sebelum benar-benar mengisi, yang menyebabkan

misruns dan *cold shuts*. Jika bahan bergerak terlalu cepat maka bahan cair dapat mengikis cetakan dan mencemari cetakan akhir. Bentuk dan panjang *gating system* juga dapat mengontrol seberapa cepat material mendingin; saluran pendek atau persegi meminimalkan kehilangan panas. (Degarmo, Black and Kohser 2003)

2.7.1 Waktu Penuangan

Salah satu objektif yang disebutkan tad, *gating system* didesain untuk mengisi cetakan dalam waktu yang singkat. Waktu untuk mengisi cetakan secara menyeluruh disebut waktu penuangan, itu adalah kriteria yang sangat penting pada desain. Waktu penuangan terlalu lama membutuhkan temperature penuangan yang lebih besar dan terlalu sedikit waktu penuangan berarti aliran turbulen didalam cetakan membuat renta terkana cacat coran.

Waktu penuangan tergantung material coran, komplesitas, ketebalan bagian dan besarnya benda coran. Variasi dari hubungan tersebut tidak diperoleh dari teori tapi dari percobaan di beberapa *foundry* dan eksperiment. Untuk *non ferrous* material waktu penuangan yang lebih lama akan berguna karena kehilangan panas secara lambat dan juga cenderung terbentuk *dross* jika waktu penuangan yang terlalu cepat.

Sejak ketebalan dari benda coran sangat berpengaruh, dengan rasio dari permukaan area sampai volume benda coran, yang merupakan variable penting dalam menghitung waktu penuangan optimum selain massa benda coran itu sendiri. Umumnya ketika mempertimbangkan massa dari benda coran, mungkin tidk perlu mempertimbangkan massa *gating system* karena *gating system* terisi penuh sebelum *metal* masuk ke dalam rongga cetakan. Namun kalua *gating system* seukuran dengan benda coran sebenarnya mungkin diperlukan untuk memasukannya ke dalam perhitungan. waktu penuanga pad cetakan pasir bias dilihat pada Tabel 2.2 (P. Rao 2013)

Tabel 2.2 Waktu Penuangan Khusus untuk Pengecoran pasir (P. Rao 2013)

Metal	Waktu Penuangan dalam kg/s untuk massa benda pegecoran, kg			
	Sampai 10	10-50	50-100	100-500
Pig Iron	1.1	1.5-2.0	3.0-4.0	3.5-6.0
Steel	1.2-1.4	1.9-2.5	4.0-5.0	4.5-7.0
Paduan Alumunium	0.25-0.3	0.5-0.7	1.0-1.3	1.2-2.0

2.7.2 *Choke Area*

Setelah menghitung waktu optimum tempetaratur penuangan, sekarang menentukan control area utama yang menghitung aliran meal kedalam rongga jadi cetakan terisi sesuai waktu penuangan. Area control disebut choke area. Umumnya *choke area* terdapat di bawah sprue dan karenanya element pertama yang didesain dalam *gating system* adalah ukuran *sprue* dan proporsinya. Keuntungan utama dari memiliki *choke area* di bawah *sprue* adalah karakteristik aliran yang sesuai yang ditentukan sebelumnya di cetakan

Choke area dapat dihitung menggunakan persamaan Bernaoulli

$$A = \frac{W}{d\,t\,C\sqrt{2\,g\,H}} \quad \text{.....(2.6)}$$

Dimana A= *choke area*, mm^2
W= massa benda cor, kg
t = waktu penuangan
d = massa jenis logam cair, kg/mm^3
g = *gravitasi*, mm/s^2
H = tinggi efektif

Tinggi efektif *sprue* H, dari cetakan tergantung dimensi cetakan dan tipe *gating* yang digunakan. Tinggi efektif *sprue* dapat di hitung dengan persamaan berikut ini

Top Gate, $H=h$……(2.7)

Bottom Gate $H=h-\frac{c}{2}$……(2.8)

Parting Gate $H=h-\frac{p^2}{2c}$……...(2.9)

Dimana h = tinggi *sprue*
p = tinggi rongga cetakan di *cope*
c = tinggi total rongga cetakan

koefiesien efisiensi *gating system* tergantung pada berbagai bagian yang umumnya digunakan di *gating system*. Elemen dari *gating system* seharusnya umumnya melingkar di bagian melintang sejak mereka mempunyai rasio luas permukaan dengan volume yang lebih rendah yang akan mengurangi kehilangan panas dan gesekan yang lebih kecil, bahkan *streamlining* berbagai elemen *gating system* akan meningkatkan efisiensi volume *metrik* dari *gating system* dan menyediakan untuk *gates* yang ukurannya lebih kecil dan *runner* yang meningkatkan hasil pengecoran.

Ketika runner berubah arah atau bergabung dengan runner yang lain atau *gate*, disana ada beberapa yang hilang di dalam *metal head*, semua yang bila dipertimbangkan dengan tepat akan memberikan efisiensi keseluruhan dari *gating system*. Sehingga

$$C = \frac{1}{\sqrt{1+K_1\frac{A^2}{A_1^2}+K_2\frac{A^2}{A_2^2}}} \quad \text{……(2.10)}$$

Dimana K_1,K_2.. adalah koefisien yang hilang yang terjadi pada perubahan arah atau area seperti yang diberikan dalam Tabel 2.3

Tabel 2.3 Nilai koefisien yang hilang untuk berbagai element gate

Gate Element	*Sharp*	*Round*
Sprue entry from pouring cup	0.75	0.20
Bend of sprue into runner	2.00	1.00

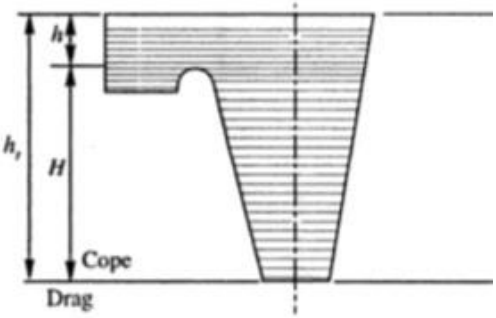
Right angle bend runner:		
Square cross section	2.00	1.50
Round cross section	1.50	1.00
Junction at right angle		
Runner	4.0 to 6.0	-
Junction with 25% or more area reduction from runner ingates	2.00	0.50
Runner choke when choke area approximately one third runner area, plus bend of sprue into runner	13.00	-
Loses from wall friction		
Round channel loss = 0.02 L/D		
Square channel loss = 0.06 L/D		
Rectangular channel loss = 0.07 $L\frac{A+B}{2AB}$		
Where L = length		
D = diameter of Round or side of square		
A = one side of rectangle		
B = other side of retangle		

Nilai rata-rata dari faktor efisiensi disediakan untuk *gating system* khusus pada Tabel 2.3 yang mungkin digunakan untuk mengukur *gating system*. Walaupun lebih baik meggunakan choke di sprue, choke disediakan di runner. Faktor efisiensi dalam hal seperti itu disediakan di Tabel 2.3. untuk pengecoran laju alumunium aliran baja dari 4.044 g/min untuk 1 sq mm dari sprue area dalam gating yang tidak bertekanan ditemukan cukup untuk proses pengecoran. (P. Rao 2013)

Setelah mendapatkan luas penampang *choke*, lalu bisa dihitung luas penampang *sprue* bagian atas atau *top area* menggunakan persamaan 2.11.

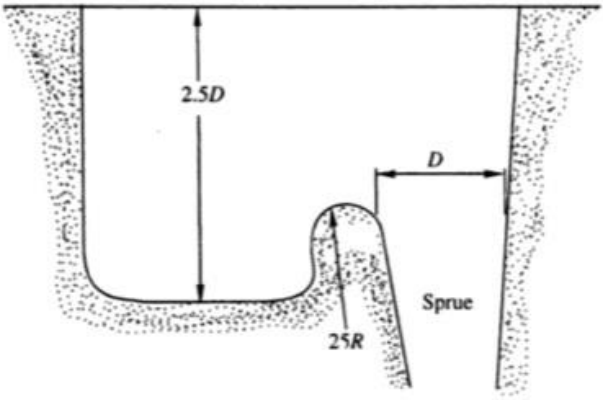
$$A_t = A_c\sqrt{\frac{h_t}{h}} \quad (2.11)$$

Dimana, dimensi h pada persamaan di atas seperti diilustrasikan pada Gambar 2.8. h_t adalah tinggi total yaitu H ditambah h.



Gambar 2. 8 Tinggi *sprue* (P. Rao 2013)

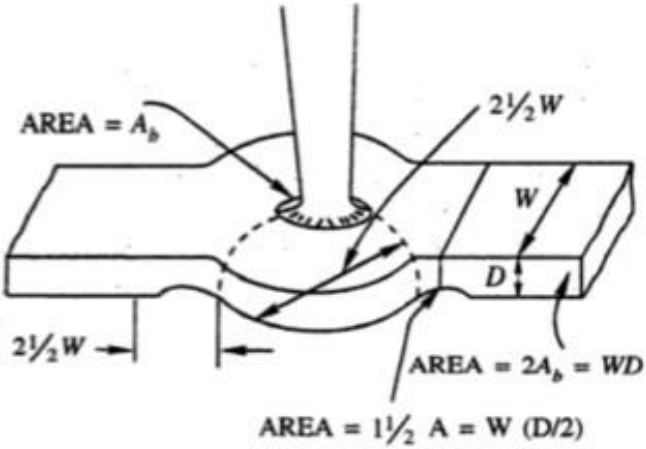
Kemudian dapat dicari dimensi *laddle* seperti pada Gambar 2.9



Gambar 2. 9 Dimensi *Laddle* (P. Rao 2013)

Di bawah *choke area* terdapat daerah yang dinamakan *sprue base well*. Daerah ini berguna untuk mengurangi kecepatan aliran sehingga menghindari turbulensi aliran. Luas dari *sprue base well*

adalah lima kali luas dari *choke area*. Diameter daerah ini adalah sebesar 1,5 kali lebar *runner*. Dimensi dari *sprue base well* diilustrasikan pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Dimensi *sprue base well* (P. Rao 2013)

Setelah mengetahui lebar *runner*, selanjutnya mencari rasio luas penampang melintang antara *choke*, *runner*, dan *ingate*. Rasio tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Rasio luas potongan melintang antara *choke*, *runner*, dan *ingate* (P. Rao 2013)

Material	**Perbandingan**
Aluminium	1:2:1
	1:1,2:1
	1:2:4
	1:3:3
	1:4:4

	1:6:6
Aluminium bronze	1:2,88:4,8
	1:1:1
	1:1:3
	1,6:1,3:1
Copper	2:8:1
	3:9:1
Ductile iron	1,15:1,1:1
	1,25:1,13:1
	1,33:2,67:1
Grey cast iron	1:1,3:1,1
	1:4:4
	1,4:1,2:1
	2:1,5:1
	2:1,8:1
	2:3:1
	4:3:1
Magnesium	1:2:2
	1:4:4
Malleable iron	1:2:9,5
	1,5:1:2,5
	2:1:4,9

Steels	1:1:7
	1:2:1
	1:2:1,5
	1:2:2
	1:3:3
	1,6:1,3:1

Setelah menentukan rasio antara ketiga komponen tersebut, maka diketahui tinggi dari *runner*. Untuk tinggi *ingate* digunakan lebih kecil agar memudahkan proses *fettling* yaitu *gating system* dari produk. Tinggi dari *ingate* adalah 5 mm lebih pendek daripada tinggi *sprue*. Untuk *riser* tidak perlu digunakan karena produk yang dicor kecil. Parameter kecil atau besar dilihat dari nilai *module*, yaitu perbandingan berat dengan luas area benda cor. Apabila lebih kecil dari 0,4 maka tidak diperlukan *riser*. (P. Rao 2013)

2.8 Toleransi Produk Cor

Dimensi cetakan tidak sama persis dengan produk cor karena selama proses pendinginan, logam akan mengalami penyusutan dan pada *finishing* seringkali produk harus dilakukan permesinan. Terdapat tiga jenis toleransi pada produk cor yaitu toleransi penyusutan, toleransi *draft*, dan toleransi permesinan.

2.8.1 *Shrinkage Allowance*

Shrinkage allowance digunakan untuk menghindari penyusutan saat padat (*solid shrinkage*). Untuk *liquid shrinkage* diatasi dengan cara pemberian *riser*. Toleransi ini bergantung pada material yang dicor. Diasumsikan penyusutan terjadi seragam pada semua dimensi apapu bentuk produk cornya. Nilai dari beberapa toleransi penyusutan ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 *Shrinkage allowance* untuk beberapa material (P. Rao 2013)

Material	Dimensi benda (mm)	Ketebalan bagian (mm)	*Shrinkage allowance* (mm/m)
Besi tuang kelabu	Sampai dengan 600	-	10,5
	600-1200	-	8,5
	Di atas 1200	-	7
Besi tuang putih	-	-	16-23
Ductile iron	-	-	8,3-10,4
Besi tuang mampu tempa	-	6	11,8
	-	9	10,5
	-	12	9,2
	-	15	7,9
	-	18	6,6
	-	22	4
	-	25	2,6
Baja karbon (*plain*)	Sampai dengan 600	-	21
	600-1800	-	16
	Di atas 1800	-	13
Baja krom	-	-	20
Baja mangan	-	-	25-38
Aluminium	-	-	13
Aluminium perunggu	-	-	20-23
Tembaga	-	-	16
Kuningan	-	-	15,5
Perunggu	-	-	15,5-22
Gunmetal	-	-	10-16

Mangan perunggu	-	-	15,6
Silikon perunggu	-	-	10,4
Timah perunggu	-	-	10,4
Krom tembaga	-	-	20,8
Timbal	-	-	26
Monel	-	-	20
Magnesium	-	-	13
Paduan magnesium	-	-	16
White metal	-	-	6
Seng	-	-	10-15

2.8.2 *Draft Allowance*

Dalam pelepasan pola cetakan bisa membuat kerusakan pada cetakan. Maka dari itu diperlukan bentuk kemiringan (*taper*) untuk memudahkan pelepasan pola. Kemiringan inilah yang dinamakan *draft allowance*. Secara umum, dimensi dalam memerlukan *draft allowance* lebih besar daripada dimensi permukaan. *Draft allowance* ini bergantung pada material pola yang digunakan seperti ditunjukkan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 *Draft allowance* untuk beberapa material pola

Material pola	Tinggi rongga cetakan (mm)	Sudut *draft* (º)	
		Bagian permukaan	Bagian dalam
Kayu	20	3	3
	21-50	1,5	2,5
	21-100	1	1,5
	101-200	0,75	1
	201-300	0,5	1
	301-800	0,5	0,75
	801-2000	0,35	0,5
	Di atas 2000		0,25

Logam dan plastik	20	1,5	3
	21-50	1	2
	51-100	0,75	1
	101-200	0,5	0,75
	201-300	0,5	0,75
	301-800	0,35	0,5

2.8.3 Finishing/Machining Allowance

Akurasi dimensi untuk pengecoran pasir kurang tinggi sehingga diperlukan proses *machining* untuk memperoleh *surface* dan dimensi yang tepat. Sehingga diperlukan dimensi tambahan untuk proses *finishing*. Secara umum nilai dari *machining allowance* adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 2.7.

Tabel 2. 7 *Machining allowance* untuk beberapa material

Dimensi (mm)	Allowance (mm)		
	Untuk bentuk diameter	Untuk permukaan	Untuk bagian atas dari *cope*
Besi tuang			
Sampai dengan 300	3	3	5,5
301-500	5	4	6
501-900	6	5	6
Cast steel			
Sampai dengan 150	3	3	6
151-500	6	5,5	7
501-900	7	6	9
Non ferrous			
Sampai dengan 200	2	1,5	2
201-300	2,5	1,5	3
301-900	3	2,5	3

2.9 Diskontinuitas pada pengecoran

Pada saat pengecoran sering kali dijumpai beberapa diskontuinuitas yang terjadi karena bermacam faktor seperti faktor pengisian logam cair, bentuk dan pemasangan cetakan, dan faktor termal. Berikut ini adalah diskontuitas atau cacat pada saat pengecoran karena faktor termal

2.9.1 *Cracks*

Cracks dapat muncul dalam cetakan dari sejumlah penyebab. Beberapa retakan sangat jelas dan dapat dengan mudah dilihat dengan mata telanjang. Retakan lain sangat sulit dilihat tanpa pembesaran.

Gambar 2. 11 Cacat retak

Cacat ini dapat dihindari dengan mengurangi temperature tuang, mengunakan *chill*, menyediakan *feeder* dan memberikan waktu pendinginan yang cukup (Sorte 2017)

2.9.2 Penyusutan

Penyusutan terjadi saat *feed metal* tidak tersedia untuk mengkompensasi penyusutan sebagai logam membeku. Cacat penyusutan dapat dipecah menjadi dua jenis: cacat penyusutan terbuka dan cacat penyusutan tertutup. Cacat penyesutan terbuka membuka ke atmosfer, oleh karena itu penyusutan rongga membentuk udara. Ada dua jenis cacat udara terbuka: pipa dan permukaan runtuh. Pipa terbentuk di permukaan casting dan

menggali ke dalam *casting*, sementara permukaan runtuh adalah rongga dangkal yang terbentuk di permukaan *casting*.

Cacat susut tertutup, juga dikenal sebagai penyusutan porositas, adalah cacat yang terbentuk di dalam pengecoran. Genangan terisolasi dari bentuk cair di dalamnya logam padat, yang disebut hot spot. Cacat penyusutan ini biasanya terbentuk di bagian atas yang hot spot. Mereka membutuhkan titik nukleasi, jadi pengotor dan gas terlarut dapat menyebabkan cacat penyusutan tertutup. Cacat dipecah menjadi *macroporositas* dan *mikroporositas* (atau *microshrinkage*), di mana *makroporositas* dapat dilihat dengan mata telanjang dan *mikroporositas* tidak bisa. (Sorte 2017)

2.10 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga (FEM) adalah metode yang paling banyak digunakan untuk memecahkan masalah teknik dan model matematika. Bidang masalah khusus yang diminati meliputi bidang analisis struktural, perpindahan panas, aliran fluida, transportasi massa, dan potensi elektromagnetik. FEM adalah metode numerik tertentu untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial dalam dua atau tiga variabel ruang (mis., Beberapa masalah nilai batas). Untuk memecahkan masalah, FEM membagi sistem besar menjadi bagian-bagian yang lebih kecil dan lebih sederhana yang disebut elemen hingga. Ini dicapai dengan diskritisasi ruang tertentu dalam dimensi ruang, yang diimplementasikan oleh konstruksi mesh objek: domain numerik untuk solusi, yang memiliki jumlah titik terbatas. Perumusan metode elemen hingga dari masalah nilai batas akhirnya menghasilkan sistem persamaan aljabar. Metode ini mendekati fungsi yang tidak diketahui pada domain. Persamaan sederhana yang memodelkan elemen hingga ini kemudian dirangkai menjadi sistem persamaan yang lebih besar yang memodelkan seluruh masalah. FEM kemudian menggunakan metode variasi dari kalkulus variasi untuk memperkirakan solusi

dengan meminimalkan fungsi kesalahan yang terkait. (Logan 2011)

2.11 Metode Elemen Hingga Menggunakan Ansys Workbench

Komputer telah merevolusi praktik rekayasa. Desain suatu produk yang digunakan harus dilakukan dengan gambar tangan yang membosankan telah digantikan oleh desain dengan bantuan komputer (CAD) menggunakan grafik komputer. Analisis desain dulu dilakukan dengan perhitungan tangan dan banyak pengujian telah digantikan oleh simulasi komputer menggunakan bantuan komputer perangkat lunak engineering (CAE). Bersama-sama, CAD, CAE, dan manufaktur berbasis komputer(CAM) telah secara dramatis mengubah lanskap teknik . Sebagai contoh,sebuah mobil, yang dulu membutuhkan waktu lima hingga enam tahun dari desain ke produk, sekarang dapat diproduksi mulai dari desain konsep hingga manufaktur dalam setahun menggunakan CAD / CAE /Teknologi CAM.Di antara semua alat komputasi untuk CAE, FEM adalah metode yang paling banyak diterapkan atau salah satu "kalkulator" modern paling kuat yang tersedia untuk mahasiswa teknik dan profesional. FEA menyediakan cara untuk secara virtual menguji desain produk. Ini membantu pengguna memahami desain mereka dan menerapkan perubahan desain yang sesuai di awal produk proses pengembangan. Adopsi FEA dalam siklus desain didorong oleh tekanan pasar karena memberikan banyak manfaat yang akan membantu perusahaan membuat produk yang lebih baik serta mengurangi biaya pengembangan dan waktu hingga distribusi ke pasar. (Liu 2019)

Selama beberapa dekade terakhir, banyak program komersial telah tersedia untuk melakukan FEA. Di antara berbagai solusi simulasi elemen hingga yang komprehensif yang disediakan oleh perusahaan CAE terkemuka, ANSYS® Workbench adalah platform yang ramah pengguna dirancang untuk mengintegrasikan rangkaian simulasi teknik canggih ANSYS, Inc. dengan hasil

memuaskan. teknologi Ini menawarkan koneksi dua arah ke sistem CAD utama. Lingkungan Workbench untuk meningkatkan produktivitas dan kemudahan penggunaan di antara tim teknik. Teknologi ini telah berkembang sebagai alat yang sangat diperlukan untuk pengembangan produk di banyak perusahaan, dapat aplikasikan di berbagai bidang teknik (Liu 2019)

Untuk melakukan FEA, prosedur berikut ini diperlukan secara umum:

1. Bagilah CAD / model geometris menjadi beberapa bagian untuk membuat "mesh" (kumpulan elemen kecil).
2. Jelaskan sifat kuantitas fisik pada setiap elemen.
3. Hubungkan (digabungkan) elemen-elemen di node untuk membentuk sistem perkiraan persamaan untuk seluruh model.
4. Menerapkan kondisi batas dan muatan (mis., Untuk mencegah model bergerak).
5. Memecahkan sistem persamaan yang melibatkan jumlah yang tidak diketahui di node (mis., The perpindahan).
6. Hitung jumlah yang diinginkan (mis., Regangan dan tegangan) pada elemen atau node.Dalam perangkat lunak FEA komersial, prosedur ini biasanya disusun ulang melalui fase:
7. Preprocessing (membangun model FEM, menententukan sifat elemen, dan terapkan beban dan batasan)
8. Pemecah FEA (merakit dan memecahkan sistem persamaan FEM, menghitung elemen hasil)
9. Pascaproses (mengurutkan dan menampilkan hasilnya) (Liu 2019)

2.12 Aplikasi Metode Elemen Hingga pada Teknik

Metode elemen hingga dapat diterapkan dalam menyelesaikan model matematika dari banyak masalah teknik, mulai dari analisis tegangan rangka dan struktur rangka atau mesin yang rumit, hingga respon dinamis dari mobil, kereta api, atau pesawat terbang di bawah mekanisme yang berbeda,

Pembebanan termal, atau elektromagnetik. Ada banyak aplikasi elemen hinggad alam industri, mulai dari otomotif, dirgantara, pertahanan, produk konsumen, dan peralatan industri untuk energi, transportasi dan konstruksi, seperti yang ditunjukkan oleh beberapa pada Tabel 2.8. Aplikasi FEA juga telah diperluas ke materi sains, teknik biomedis, geofisika, dan banyak bidang lain yang muncul baru-baru ini (Liu 2019)

Tabel 2. 8 Aplikasi Metode Elemen Hingga (Liu 2019)

Cabang Ilmu	Aplikasi
Struktur dan *Solid* mekanik	Analisis daya tahan struktur lepas pantai, simulasi kecelakaan kendaraan,Analisis integritas komponen reaktor nuklir, optimisasi desain bilah turbin angin
Perpindahan Panas	Pemodelan pendingin elektronik, pemodelan pengecoran, analisis perpindahan panas mesin pembakaran
Fluid Flow	Analisis aerodinamis dari desain mobil balap, pemodelan pola aliran udara dalam bangunan, analisis rembesan melalui media berpori
Electrostatics/electromagnetics	Perhitungan dalam sensor dan aktuator, prediksi kinerja desain antena, analisis gangguan elektromagnetik

2.13 Analisa Termal

Perpindahan panas dalam tiga cara melalui konduksi, konveksi, dan radiasi. Dalam FEM,konduksi dimodelkan dengan memecahkan persamaan keseimbangan panas yang dihasilkan untuk nodal suhu di bawah kondisi batas termal yang ditentukan.

Konveksi dimodelkan sebagai beban permukaan dengan koefisien perpindahan panas yang ditentukan pengguna dan suhu tinggi yang diberikan dari cairan di sekitarnya.

Efek radiasi, yang nonlinier, biasanya dimodelkan dengan menggunakan elemen penghubung radiasi atau pengaruh permukaan elemen dengan opsi radiasi.

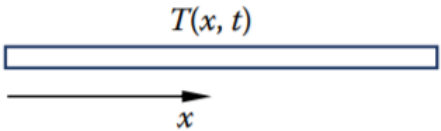
Diperlukan sifat material seperti kerapatan, konduktivitas termal, dan panas spesifik sebagai parameter input untuk analisis termal transien, sedangkan analisis termal steady-statenya membutuhkan konduktivitas termal sebagai bahan input. Untuk analisis tegangan termal, parameter input bahan mencakup modulus Young, rasio Poisson, dan ekspansi koefisien termal

Untuk mempelajari perpindahan panas dalam suatu objek atau antara objek, orang dapat melakukan analisis termal, dari mana jumlah termal seperti suhu, gradien termal, dan distribusi panas fluks dapat ditentukan. Ada dua jenis analisis termal: steady-statetermal dan termal sementara. Analisis termal steady-state bertujuan untuk menemukan suhu atau distribusi fluks panas dalam struktur ketika keseimbangan termal tercapai, dan sementara analisis termal sementara ditetapkan untuk menentukan riwayat waktu bagaimana profil suhu dan jumlah termal lainnya berubah seiring waktu. Selain itu, ekspansi atau kontraksi termal dari suatu material sering menyebabkan tegangan termal dalam struktur, yang dapat diperiksa dengan melakukan analisis tegangan termal. (Liu 2019)

2.13.1 Analisa Termal Dengan Metode Elemen Hingga

Untuk bidang suhu ruang 1-D(seperti gambar 2.12) , dapat digunakan berikut ini persamaan konduksi panas Fourier:

$$f_x = -k\frac{\partial T}{\partial X} \tag{2.12}$$



Gambar 2. 12 bidang suhu pada model batang 1 dimensi

Dimana
Fx = *Heat flux* per area unit
K = konduktifitas termal
T(x,t) = bidang suhu
Pada kasus 3 dimensi kita mempunyai

$$\begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{Bmatrix} = -K \begin{bmatrix} \partial T/\partial x \\ \partial T/\partial y \\ \partial T/\partial z \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Dimana f_x, f_y, f_z = *heat flux* pada arah x,y dan z. pada kasus isotropi material konduktiftas matrik adalah

$$K = \begin{bmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Persamaan *heat flow* sebagai berikut

$$-\left[\frac{\partial f_x}{\partial x} + \frac{\partial f_y}{\partial y} + \frac{\partial f_z}{\partial z}\right] + q_v = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.15)$$

Dimana
q_v = laju pertambahan panas tiap volume
c = panas spesifik
ρ = massa jenis

untuk *steady state* $(\partial T/\partial t) = 0$ dan isotropic material kita dapat menggunakan persamaan berikut

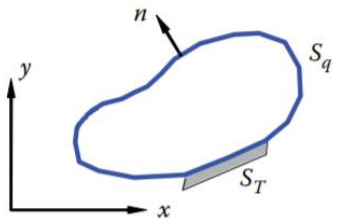
$$k\nabla^2 T = -q_v \quad (2.16)$$

Ini adalah persamaan Poisson, yang perlu dipecahkan di bawah kondisi batas yang diberikan.Kondisi batas untuk konduksi panas steady state adalah

$$T = \overline{T}\,, on\ S_T \quad (2.17)$$

$$Q = -k\frac{\partial T}{\partial n} = \bar{Q}, on\ S_q \qquad (2.18)$$

Perhatikan bahwa pada titik mana pun pada batas S S = T q ∪ S, hanya satu jenis kondisi batas yang dapat ditentukan (Liu 2019)



Gambar 2. 13 kondisi batas suatu kasus pada konduksi panas

2.13.2 Metode Elemen Hingga pada Konduksi Panas

Untuk konduksi panas kita dapat menggunkan rumus elemen hingga sebagai berikut

$$K_T T = q \qquad (2.19)$$

Dimana
K_T = konduktifitas matrik
T = tempetaur nodal vektor
q = beban termal vektor
elemen konduktifitas matrik

$$kt = \int_v B^T K B dV \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2.20)$$

Ini diperoleh dengan cara yang sama seperti untuk analisis struktural, yaitu, dengan memulai denganinterpolasi T = NTe untuk bidang suhu (dengan N menjadi matriks fungsi bentuk dan Te suhu nodal). Perhatikan bahwa hanya ada satu DOF di setiap node untuk masalah termal.

Untuk masalah konduksi panas transient (tidak stabil), kami memiliki:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \neq 0 \qquad (2.21)$$

Dalam hal ini, kita perlu menerapkan skema perbedaan yang terbatas (menggunakan time step dan mengintegrasikan waktu), seperti dalam analisis struktur transien, untuk memperoleh bidang suhu transien. (Liu 2019)

2.13.3 Analisa Tegangan Termal

Untuk menentukan tegangan termal akibat perubahan suhu pada struktur, kita dapat melanjutkan ke

Selesaikan Persamaan 2.23 terlebih dahulu untuk mendapatkan bidang suhu (perubahan).

Terapkan perubahan suhu ΔT sebagai regangan awal (atau tegangan awal) ke struktur untuk menghitung tegangan termal akibat perubahan suhu.

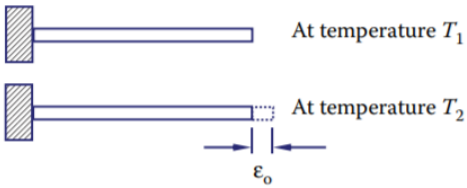
Hal yang perlu diperhatikan dalam menentukan α untuk struktur dan ΔT pada elemen terkait (yang mengalami perubahan suhu).

a) Perhatikan bahwa untuk termoelastisitas linier, perubahan suhu yang sama akan menghasilkan tegangan yang sama, bahkan jika strukturnya berada pada dua tingkat suhu yang berbeda.

b) Perbedaan suhu selama manufaktur dan lingkungan kerja adalah penyebab utama tekanan termal (residual).

1. Untuk kasus 1 D

Untuk memahami hubungan tegangan-regangan dalam kasus di mana padatan mengalami suhu
perubahan, adalah pertama-tama memeriksa kasus 1-D (Gambar 2.14). untuk regangan termal (atau tegangan awal)



Gambar 2. 14 pertambahan panas akibat ekpnasi temperature

$$\varepsilon_o = \alpha \Delta T \tag{2.22}$$

Dimana
α= koefisen ekspansi termal
ΔT= perubahan suhu
Total regangan dapat dicari dengan

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_o \tag{2.23}$$

Dimana ε_e adalahregangan elastic karena beban mekanik
Total regangan dapat ditulis sebgai berikut

$$\varepsilon = E^{-1}\sigma + \sigma \Delta T \tag{2.24}$$

Atau tegangan sebgai berikut

$$\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon_o) \tag{2.25}$$

2. Untuk kaus 2D
   Untuk tegangan pada bidang

$$\varepsilon_o = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}_o = \begin{Bmatrix} \alpha \Delta T \\ \alpha \Delta T \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{2.26}$$

Untuk regnagn pada bidang

$$\varepsilon_o = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}_o = \begin{Bmatrix} (1+v)\alpha \Delta T \\ (1+v)\alpha \Delta T \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{2.27}$$

v adalah nilai *poisson's ratio*

3. Untuk kasus 3D

$$\varepsilon_o = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha\Delta T \\ \alpha\Delta T \\ \alpha\Delta T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{2.28}$$

Pengamatan: Perubahan suhu tidak menghasilkan regangan geser. Dalam kedua kasus 2-D dan 3-D, total regangan dapat diberikan oleh persamaan vektor berikut:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_o \tag{2.29}$$

Dan hubungan tegangan regangan dijabarkan dalam persamaan sebagai berikut

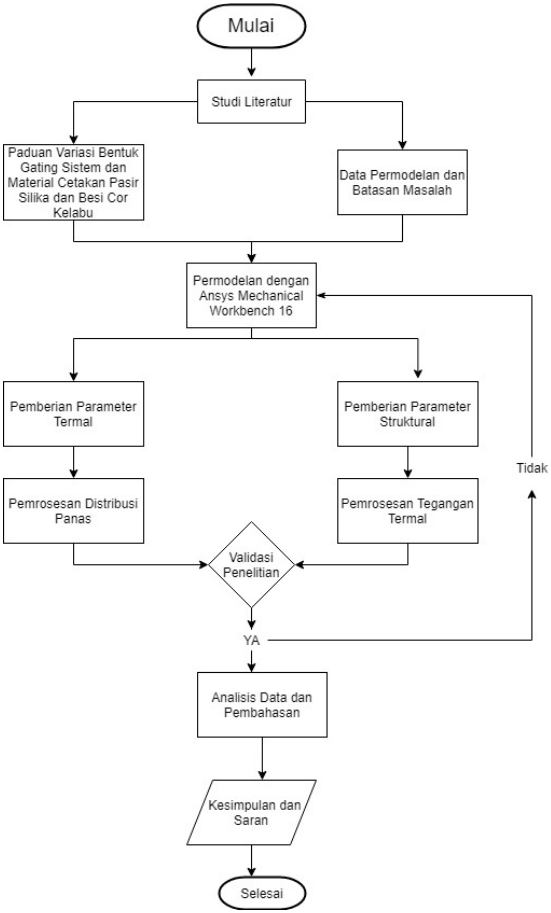
$$\sigma = E\varepsilon_e = E(\varepsilon - \varepsilon_o) \tag{2.30}$$

(Liu 2019)

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Adapun diagram alir pada penelitian sebagai berikut :



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Spesifikasi Material

Data-data spesifikasi sifat material diperoleh melalui aplikasi JMatPro sebagai berikut ini

3.2.1 Alumunium 7075

Tabel 3. 1 Komposisi Alumunium 7075 (ASM International 1990)

Component	***Wt%***
Al	*Balance*
Cr	0.18 - 0.28
Cu	1.2 - 2
Fe	Max 0.5
Mg	2.1 - 2.9
Mn	Max 0.3
Zn	5.1 - 6.1

Tabel 3. 2 Konduktifitas Thermal terhadap Temperatur (JMatPro)

Temperatur (C)	***Konduktifitas Thermal (W/mC)***
100	181
200	184
300	150
400	155
600	130

Tabel 3. 3 Young Modulus dan nilai *poisson ratio* Alumunium 7075 (JMatPro)

Temperatur (C)	***Young Modulus(Pa)***	***Poisson's Ratio***
25	7,17e+10	0,33
100	7e+10	0,345
200	6,5e+10	0,35

300	6,1e+10	0,354
400	5,5e+10	0,348

3.2.2 Pasir Silica

Pasir silica digunakan dalam cetakan pasir. Adapun sifat materialnya sebagai berikut :

Tabel 3. 4 Komposisi Pasir Silica

Komposisi	Nilai(%)
SiO_2	*Balance*
Al_2O_3	4.70
Fe_2O_3	0.94
CaO	0.14
MgO	0.30
Na_2O	0.19
LOI	5.15

Tabel 3. 5 Konduktifitas Thermal terhadap Temperatur (JMatPro)

Temperatur (C)	***Konduktifitas Thermal (W/mC)***
30	
100	181
200	184
300	150
400	155
500	130

Temperatur (C)	***Young Modulus(Pa)***	***Poisson's Ratio***
30	7,31e+10	0, 0,167

100	7,39e+10	0, 0,167
200	7,51e+10	0,170
300	7,61e+10	0,173
400	7,7e+10	0,176

3.2.3 Besi Cor Kelabu

Besi Cor adalah material yang digunakan dalam cetakan permanen. Adapun sepesifikasinya sebagai berikut :

Tabel 3. 6 Tabel sifat fisik dari besi cor kelabu (L. H. Van Vlack 1982)

No	Physical Properties	Unit
1	*Density*	7.15 g/cc

Tabel 3. 7 Tabel komposisi besi cor kelabu (L. H. Van Vlack 1982)

No	*Component*	Unit
1	*Carbon*, C	3.25 - 3.5 %
2	*Chromium*, Cr	0.050 - 0.45 %
3	*Copper*, Cu	0.15 - 0.40 %
4	*Iron*, Fe	*Balance*
5	*Manganese*, Mn	0.50 - 0.90 %
6	*Molybdenum*, Mo	0.050 - 0.10 %
7	*Nickel*, Ni	0.050 - 0.20 %
8	*Phosphorous*, P	<= 0.12 %
9	*Silicon*, Si	1.8 - 2.3 %
10	*Sulfur*, S	<= 0.15 %

Tabel 3. 8 Konduktifitas Thermal terhadap Temperatur (JMatPro)

Temperatur (C)	*Konduktifitas Thermal (W/mC)*
100	30,5
200	31,2
300	31,5
400	31,2
500	30,5
600	29

Temperatur (C)	*Young Modulus(Pa)*	*Poisson's Ratio*
30	1,64e+11	0,27
100	1,61e+11	0,28
200	1,58e+11	0,28
300	1,5e+11	0,28
400	1,4e+11	0,29
500	1,1e+11	0,28

3.3 Perhitungan Data Awal

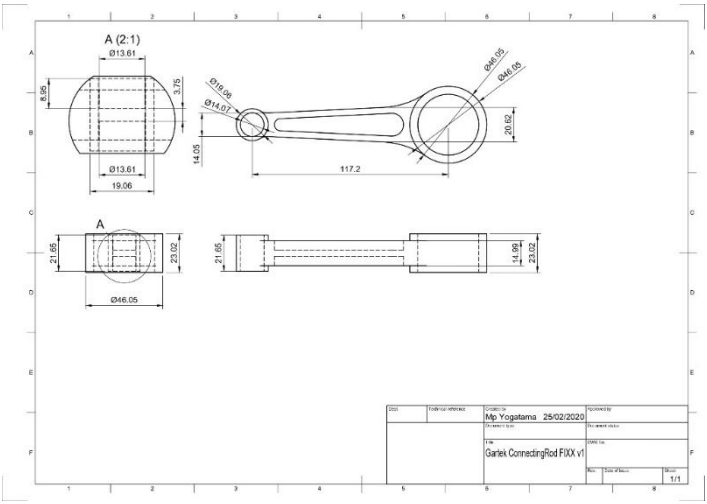
Pada bagian ini dilakukan perhtiungan dimensi *connecting rod* dan dimensi *gating system*

3.3.1 Dimensi *Connecting Rod*

Tabel 3. 9 Tabel dimensi connecting rod

No	Dimensi	Nilai
1	T	3.748 mm
2	*Length of connectng rod*	117.20 mm
3	*Inner diameter of small end*	14.073 mm
4	*Outer diameter of small end*	19.065 mm
5	*Length of small end*	21.653 mm
6	*Inner diameter of big end*	36.357 mm

7	*Outer diameter of big end*	46.049 mm
8	*Length of big end*	23.024 mm
9	*Height*	18.741 mm
10	*Width*	14.992 mm
11	*Height at the small end*	14.055 mm
12	*Height at the big end*	20.615 mm



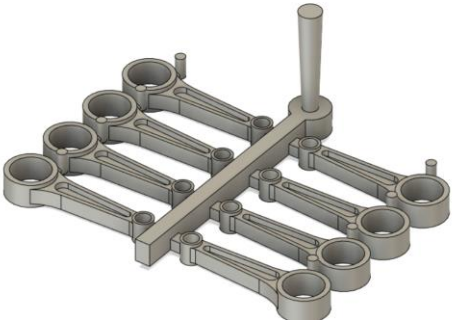
Gambar 3. 2 Gambar teknik *connecting rod*

3.3.2 Dimensi Pada *Gating System*

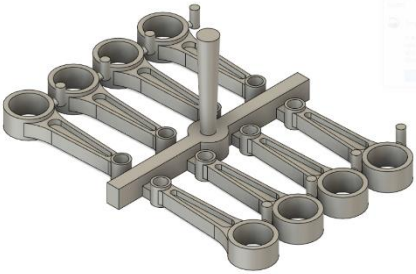
Tabel 3. 10 Tabel dimensi *gating system connecting rod*

No	Dimensi	Nilai
1	*Sprue height*	46.04 mm
2	*Choke area*	120 mm^2
3	*Top area*	426.127 mm^2
4	*Sprue base well area*	600 mm^2
5	*Diameter sprue base well*	27.646 mm
6	*Runner width*	11.058 mm

7	*Runner height*	43.407 mm
8	*Ingate width*	11.058 mm
9	*Ingate height*	38.407 mm



Gambar 3. 3 Model 1 *Gating System*



Gambar 3. 4 Model 2 *Gating System*

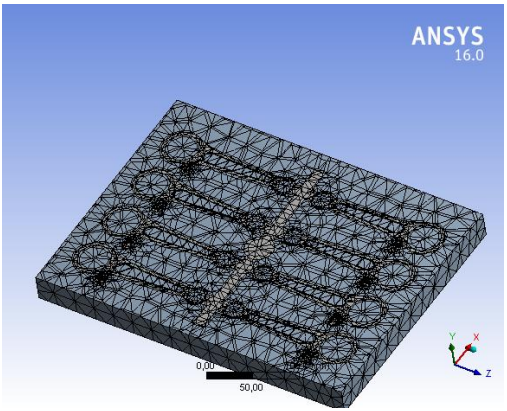
3.4 Proses Simulasi

Proses simulasi dilakukan dengan menggunakan software ANSYS WORKBENCH 16 dan menggunakan simulasi *transient thermal* serta *static structural* pada ANSYS WORKBENCH 16

3.4.1 *Meshing*

Meshing adalah membagi model 3 dimensi ke elemen elemen kecil sehingga biasa dilakukan analisis oleh sistem computer. Dua jenis cetakan gating system dan *connecting rod*

dibuat dengan Autodesk Fusion 360 dan proses *meshing* dilakukan ddidalam Ansys 1*6* dengan settingan *meshing* yang tingkat kekasaranya menengah



Gambar 3. 5 Contoh hasil *meshing salah satu cetakan* beserta *connecting rod*

3.4.2 Simulasi

Simulasi adalah proses *running* setelah parameter-parameter dimasukkan dan akan dianalisa dengan menggunkan computer pada proses simulasi dibagi menjadi dua tahap yaitu proses simulasi dengan menggunkan *transient thermal* untuk mencari distribusi panas, gradien temperature, total heatflux dan *static structural* untuk mencari tegangan termal

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Termal

Pada Analisa termal ini bertujuan untuk mencari distribusi temperature selama proses pembekuan logam cair.

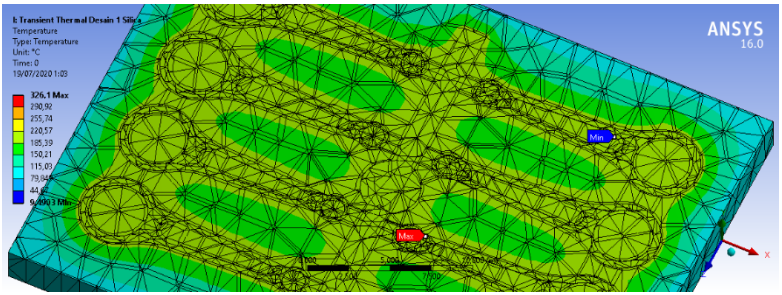
Beberapa sifat material yang dibutuhkan dalam analisa ini adalah konduktivitas termal, massa jenis dan kapasitas panas spesifik. Konduktivitas termal adalah kemampuan suatu material menghantarkan panas, massa jenis adalah massa benda per volume dan kapasitas panas spesifik adalah jumlah energi yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur benda tersebut

Pada Analisa termal ini menganalisa dua gating system yang berbeda dengan setiap gating system mempunyai material cetakan yang berbeda yaitu pasir silika dan satu lagi besi cor kelabu. Dan material coran adalah aluminum 7075 yang sudah memadat

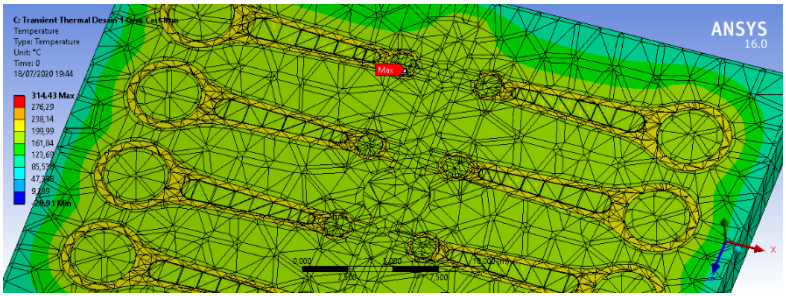
Temperature awalan yang digunakan dalam proses pengecoran kali ini 200°C pada benda cornya konveksi yang digunakan sebesar 11,45 W/m^{2}K berlaku untuk semua jenis pengecoran didapatkan dari jurnal pariona tahun 2005.dan disini memakai *number of step* sebesar 50, *maximum time step* 0,1 dan *minimum time step* 0,001. Seluruh model maupun jenis cetakan diberlakuka settingan yang sama untuk simulasi ini muali dari mesh sama, temperature awal, time step dan settingan lainya yang membedakan adalah input konduktifitas termal, massa jenis dan panas spesifik dari material cetakan

4.1.1 Disribusi Temperatur

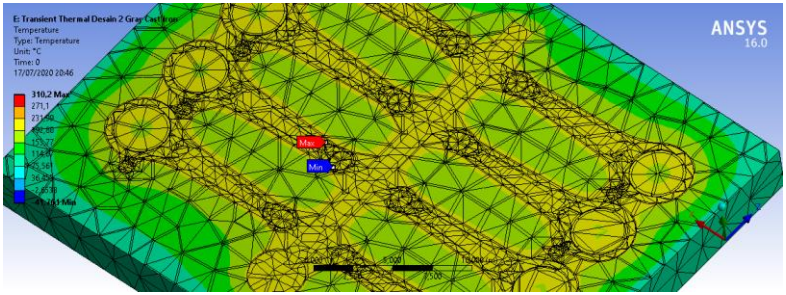
Distribusi temperatur pada cetakan model 1 dan 2 yang material cetakannya pasir silika dan besi cor kelabu



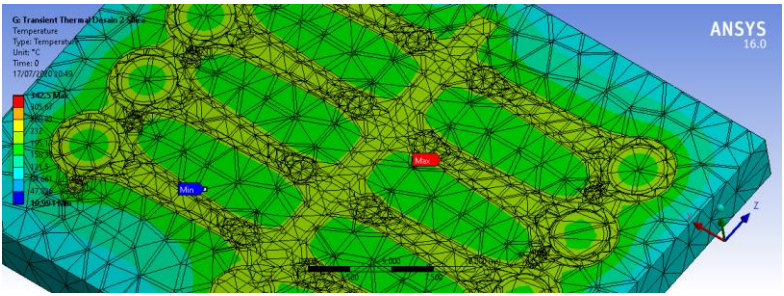
Gambar 4. 1 Distribusi temperature material pasir silika pada model 1 saat step pertama



Gambar 4. 2 Distribusi temperature material besi cor kelabu pada model 1 saat step pertama



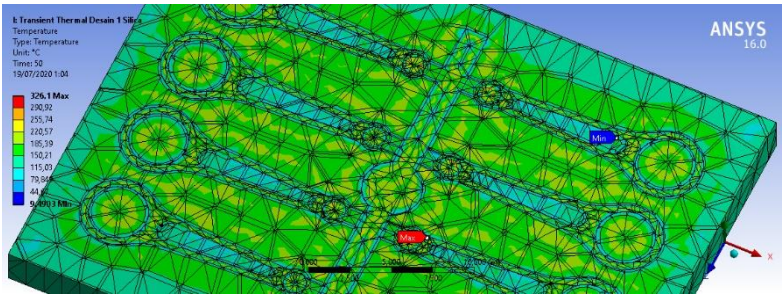
Gambar 4. 3 Distribusi temperature material pasir silika pada model 2 saat step pertama



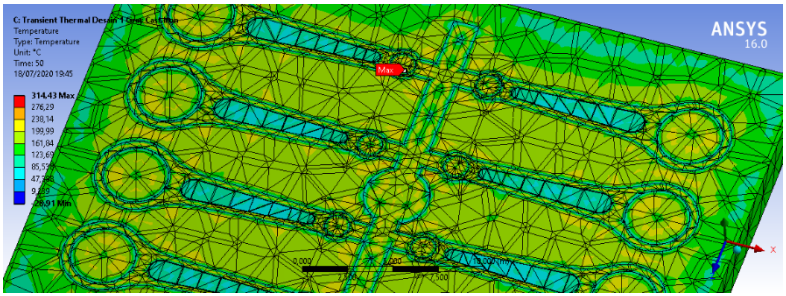
Gambar 4. 4 Distribusi temperature material besi cor kelabu pada model 2 saat step pertama

Tabel 4 1 Perbandingan temperatur pada awal simulasi

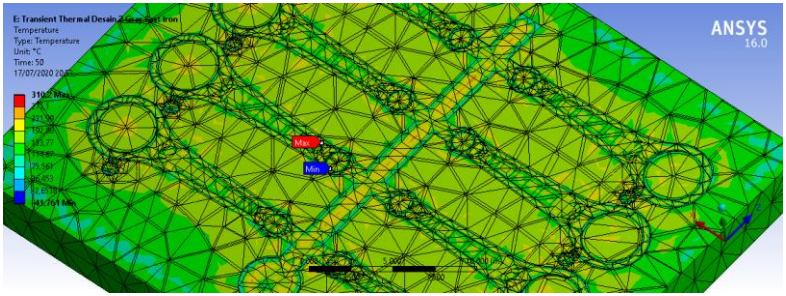
Jenis Cetakan	Temperatur maksimum (C)	Temperatur minimum (C)
Model 1 Pasir silika	254,87	100
Model 1 Besi cor Kelabu	314,43	100
Model 2 Pasir silika	275,6	100
Model 2 Besi cor kelabu	272,71	100



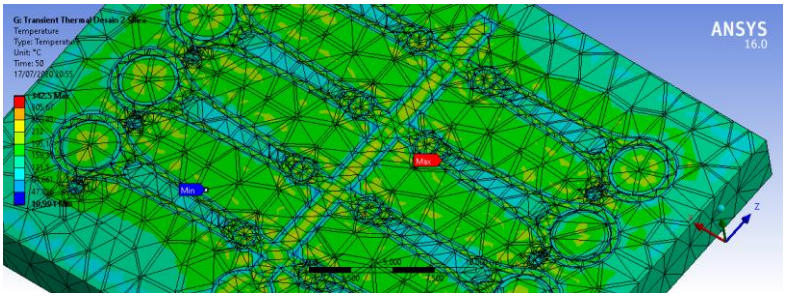
Gambar 4. 5 Distribusi temperature material pasir silika pada model 1 akhir simulasi



Gambar 4. 6 Distribusi temperature material besi cor kelabu pada model 1 saat akhir simulasi



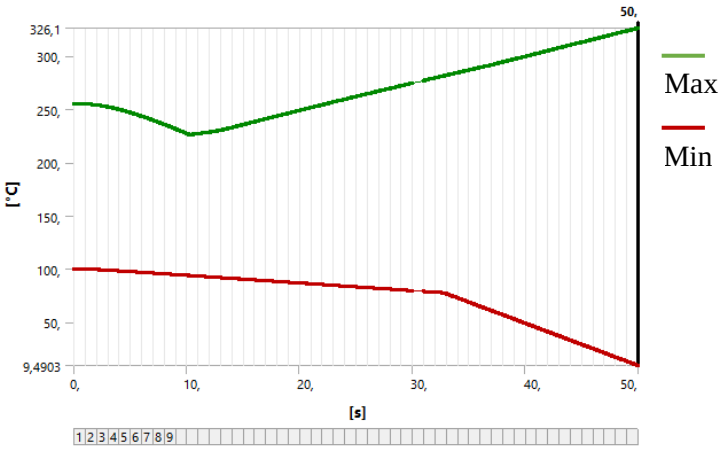
Gambar 4. 7 Distribusi temperatur material pasir silika pada model 2 saat akhir akhir simulasi



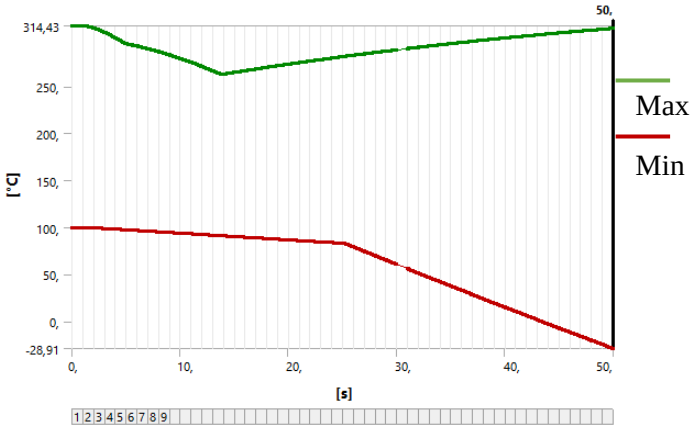
Gambar 4. 8 Distribusi temperature material besi cor kelabu pada model 2 saat akhir simulasi

Tabel 4 2 Perbandingan temperatur pada akhir simulasi

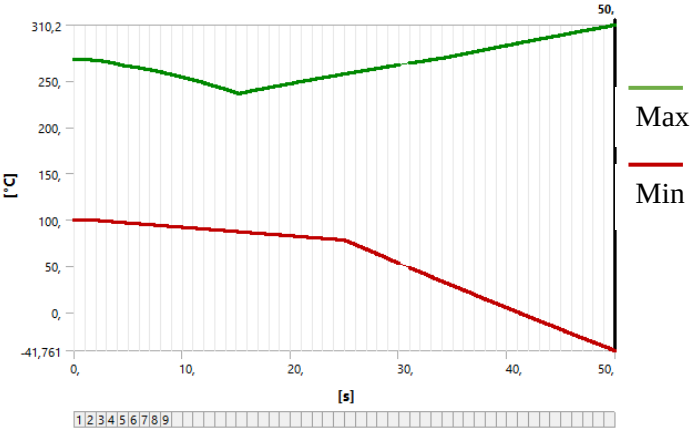
Jenis Cetakan	Temperatur maksimum (C)	Temperatur minimum (C)	Waktu (s)
Model 1 Pasir silika	312,26	30	44,766
Model 1 Besi cor Kelabu	297,6	30	36,64
Model 2 Pasir silika	328,15	30	45,334
Model 2 Besi cor kelabu	275,72	30	34,64



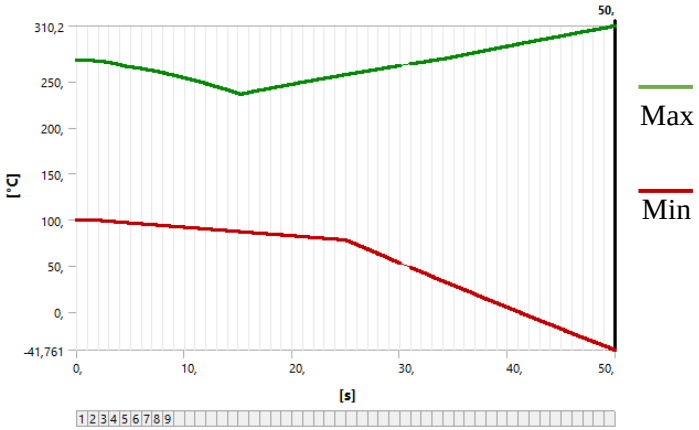
Gambar 4. 9 Kurva perubahan temperatur pada Model 1 pasir silika



Gambar 4. 10 Kurva perbandingan temperatur model 1 besir cor kelabu



Gambar 4. 11 Kurva perbandingan temperatur model 2 pasir silika



Gambar 4. 12 kurva perbandingan temperatur model 2 besi cor kelabu

Pada proses solidifikasi pembekuana dimulai pada bagian yang bersentuhan dengan cetakan, pada saat itu panas yang terjadi di bagian yang bersentuhan dengan cetakan akan diambil oleh cetakan sehingga cetakan akan memanas dan bagian coran akan mendingin bagian coran yang mendingin diawali di bagian yang bersentuhan dengan cetakan dan merambat ke tengah coran.

Terlihat seperti gambar 4.5 sampai 4.8 yang bagian yang bersinggungan dengan cetakan terlihat lebih dingin atau berwarna biru disbanding bagian tengah coran yang tidak berbatasan dengan cetakan dan seperti pada gambar 4.5 sampai 4.8 bagian yang cetakan yang bersingungan dengan coran tampak lebih panas (berwarna kuning) daripada bagian coran

Seperti pada pada 4.1 sampai 4.4 material coran pada simulasi lebih panas dibandingkan cetakan lalu perlahan akan menyebar panas ke cetakan sehingga material coran akan perlahan mendingin dimulai dari sisi bagian luar coran dan kedalam dan material coran akan memanaskarena menyerap panas dari material coran.

Pada model 1 cetakan silika temperature tertinggi saat awal simulasi sebesar 254,87^{o}C yaitu terletak cetakan pada cope yang

berdekatan dengan benda cor sedangkan pada bagian cetakan yang berada disekitar coran temperaturnya berkisar tertinggi 185,39ºC dan pada bagian akhir cetakan nilai temperature minimum adalah sekiat 30ºC yang terjadi di daerah penggiran benda cor dan dipenampang *connecting rod* yang terhimpit dengan cetakan sedangkan untuk pendingan tersebut dari simulasi awal hingga mencapai temperature minimum 30ºC membutuhkan waktu 44,766 detik baru tercapai temperatur tersebut, pada saat 44,766 detik tersebut temperatur cetakan tertinggi tercatat sebesar 312,26ºC dikarenakan menyerap panas dari benda coran.

Pada model 1 cetakan besi cor kelabu temperatur tertingi saat awal simulasi sebesar 314,43ºC terletak salah satu node cope sedangkan di daerah sekitar coran temperaturnya tertinggi berkisar 198,21ºC dan pada akhir cetakan temperatur minimum benda cor 46,798ºC yaitu terletak dibagian luar coran yang mulai mendingin. Proses dari temperatur 314,43ºC sampai terbentuk pendinginan hingga temperatur minimum 30ºC membutuhkan waktu sebanyak 36,64 detik dan pada saat itu temperatur cetakan tertingi sebesar 297,6ºC

Pada model 2 cetakan silika temperatur tertingi saat awal simulasi tercatat sebesar 275,6ºC terletak di bagian drag didekat benda cor sedangkan bagian yang didaerah sekitar coran temperaturnya tertinggi berkisar 232ºC dan pada akhir cetakan temperatur minimum sekitar 20,981ºC yaitu terletak dibagian coran yang berhimpit dengan cetakan yang mulai mendingin. Proses dari temperatur 275,6ºC sampai 30ºC membutuhkan waktu sebanyak 45,334 detik dan pada itu temperatur cetakan sebesar 328,15ºC.

Pada model 2 cetakan besi cor kelabu temperatur tertingi saat awal simulasi tercatat sebesar 272,71ºC terletak di bagian drag dibawah coran sedangkan bagian yang disekitar coran temperaturnya tertinggi berkisar 192,88ºC dan pada akhir cetakan temperatur minimum sekitar 36,453ºC yaitu terletak dibagian luar coran yang mulai mendingin. Proses dari temperatur 272,71ºC

sampai 30ºC membutuhkan waktu sebanyak 34,64 detik dan pada itu temperatur cetakan sebesar 275,72ºC.

Bisa dilihat pada model 1 antara kedua jenis cetakan perbedaan cukup signifikan proses pendinginan pada model 1 lebih cepat cetakan besi cor kelabu daripada cetakan pasir silika yaitu membutuhkan waktu 36,64 detik untuk temperatur minimum 30ºC terlihat dibagian sisi coran dibandingkan dengan pada cetakan besi pasir silika yang membutuhkan 44,766 detik untuk mencapai temperatur minimum 30ºC

Berbeda dengan model 2 antara kedua jenis cetakan perbedaan yang menonjol yaitu 45,334 detik waktu yang dibutuhkan agar 30ºC terlihat dilapisan luar coran untuk cetakan pasir silika dan 34,64 detik pada cetakan besi cor kelabu, pada model 2 bisa dilihat juga besir cor kelabu memiliki kecepatan pendinginan yang lebih cepat daripada pasir silika.

Perbedaan distribusi temperatur ini disebabkan oleh sifat material cetakan. Cetakan besi cor kelabu mempunyai konduktifitas termal yang lebih tinggi daripada cetakan pasir sehingga cetakan besi cor kelabu memiliki kemampuan menyebarkan panas lebih cepat sehingga panas yang ada di coran dapat lebih cepat berpindah kedalam cetakan sebelum semua keluar menuju lingkungan, dapat disimpulkan kecepatan pendinginan besi cor kelabu lebih cepat daripada cetakan pasir

Hal lain yang menjadi penyebab adalah perbedaan dstribusi temperatur adalah kapasitas panas spesifik dari cetakan, kapasitas panas spesifik dari cetakan pasir lebih besar dari kapasitas panas spesifik dari besi cor kelabu sehingga pada cetakan pasir peningkatan temperatur lebih lambat dan kurang bisa menyerap panas daripada cetakan besir cor kelabu

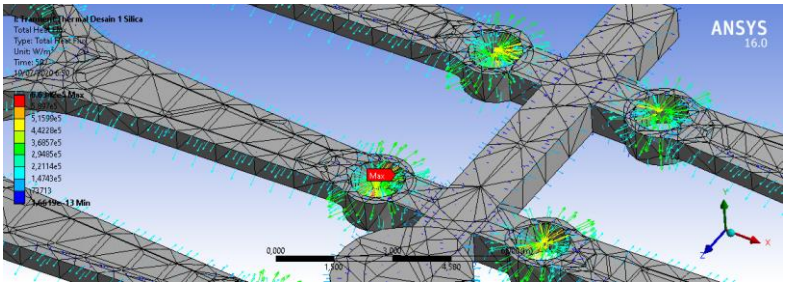
Bila ditinjau dari jenis *gating system* perbedaan laju pendinginan antara *gating system* model 1 dan model 2 tidak begitu terasa yaitu pada model 1 cetakan silika 44,766 detik agar temperatur 30ºC mulai terlihat di coran dan pada model 2 cetakan silika sebanyak 45,334 detik begitu juga dengan *gating system* model 1 besi cor kelabu mencapai temperatur minimum 30ºC

membutuhkan waktu sebanyak 36,64 detik dan pada model 2 besi cor kelabu membutuhkan waktu 34,64 detik.

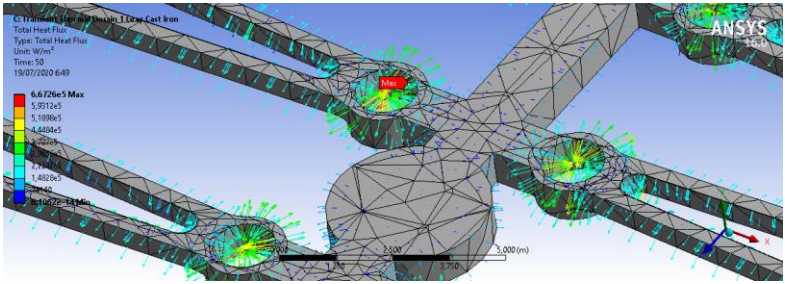
4.1.2 Gradien Temperatur

Gradien temperatur adalah rentang perubahan temperatur. Gradien temperatur menggambarkan arah mulainya pendinginan Pada simulasi kali ini

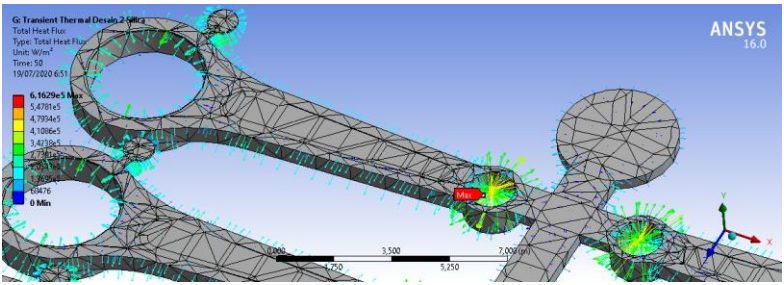
Untuk perbandingan temperatur dari model 1 dan 2 dan dari cetakan pasir dan besir cor dapat dilihat dibawah ini



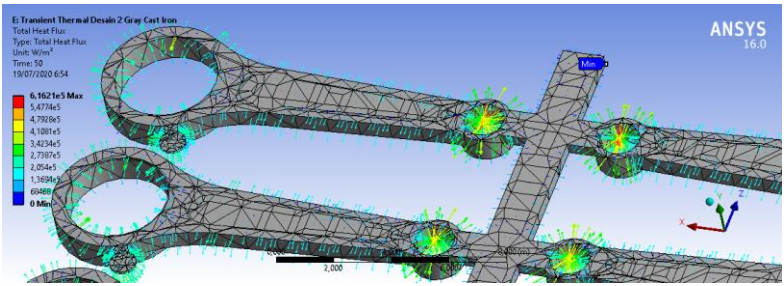
Gambar 4. 13 Gradien temperatur model 1 pasir silika



Gambar 4. 14 Gradien temperatur model 1 besir cor kelabu



Gambar 4. 15 Gradien temperatur model 2 pasir silika



Gambar 4. 16 Gradien temperatur model 2 besi cor kelabu

Dari keempat gambar gradien temperatur hampir semua menandakan arah yang sama, arah gradien temperatur mengarah menuju cetakan hal ini berarti karena temperatur coran lebih tinggi daripada temperatur cetakan sehingga panasnya berpindah dari coran menuju cetakan hal ini juga berarti sesuai pendinginan didalam coran berawal dari bagian yang terkena dinding cetakan

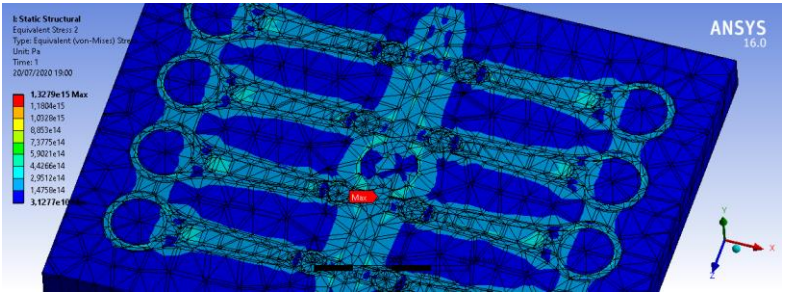
4.2 Analisa Struktural

Simulasi analisa struktural digunakan untuk menganalisa tegangan termal yang terjadi selama proses pengecoran berlangsung. Pada suatu proses pengecoran, distribusi dan perubahan temperatur akan berpengaruh pada berbagai aspek contohnya seperti tegangan termal. Tegangan termal ini akan menyebabkan beberapa masalah selama proses pengecoran seperti

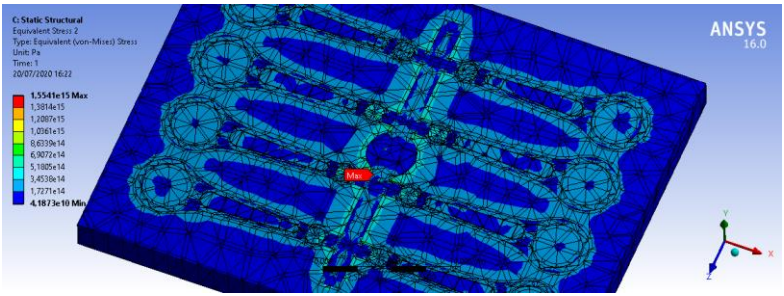
patahan ataupun deformasi. Sifat material yang mempengaruhi tegangan termal adalah sifat- sifat yang ada pada analisa termal yang kemudian ditambah sifat lain seperti modulus elastisitas dimana semakin besar modulus elastisitas maka suatu material akan semakin sulit terdeformasi. Kemudian sifat material yang berpengaruh lainnya adalah poisson ratio dari setiap material yang merupakan konstanta elastisitas suatu material. Dan yang terakhir adalah koefisien ekspansi termal material yang mempengaruhi pada perubahan panjang atau volume dari sebuah material pada satu unit temperatur.

4.2.1 Tegangan Termal

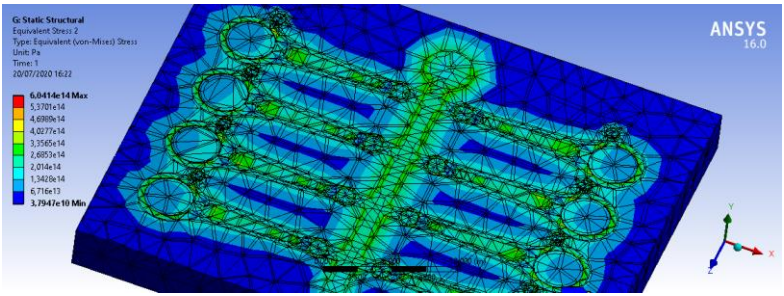
Tegangan Termal adalah tegangan induksi yang dihasilkan akibat perubahan suhu, tegangan termal dipengaruhi beberapa faktor yaitu modulus elastisitas,poisson ratio, koefisien ekspansi termal dan perbedaan temperatur dari suatu materialnya. Tegangan termal dalam simulasi ini dianalisa dengan tegangan Von Mises.



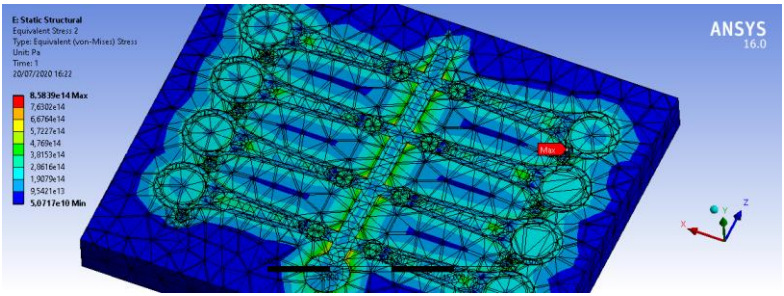
Gambar 4. 17 Tegangan termal model 1 pasir silika



Gambar 4. 18 Tegangan termal model 1 besi cor kelabu



Gambar 4. 19 Tegangan termal model 2 pasir silika



Gambar 4. 20 Tegangan termal model 2 besi cor kelabu

Tabel 4 3 Perbandingan tegangan termal

Jenis Cetakan	Nilai Minimum (Pa)	Nilai Maksimum (Pa)

Model 1 pasir silika	3,1277e+010	1,3279e+015
Model 1 besi cor kelabu	4,1873e+010	1,5541e+015
Model 2 pasir silika	3,7947e+010	6,0414e+014
Model 2 besi cor kelabu	5,0717e+010	8,5839e+014

Dapat dilihat dari tabel diatas nilai tegangan termal dari keempat model, nilai maksimum terbesar pada model 1 cetakan besi cor kelabu sebesar 1,5541e+015 Pa dan nilai maksimum terkecil pada model 1 cetakan pasir yaitu sebesar 6,0414e+014, sedangkan nilai minimum terbesar pada model 2 cetakan besi cor kelabu yaitu sebesar 5,0717e+010 dan nilai minimum terkecil pada model 1 cetakan pasir silika sebesar 3,1277e+010. Dapat disimpulkan cetakan dengan material besi cor kelabu memiliki tegangan termal lebih besar daripada cetakan material pasir silika karena cetakan besi cor kelabu memiliki nilai young modulus, poisson ratio serta koefisien termal yang lebih besar daripada pasir silika.

Efek dari tegangan termal yang tinggi dapat menyebabkan retak pada suatu benda cor karena kombinasi dari gradien suhu yang besar di samping perubahan cepat dari temperatur pada suatu bahan , Perubahan suhu menyebabkan tekanan pada tegangan pada permukaan yang mendorong pembentukan dan perambatan retak. (Callister 2009).

Hubungan dari perbedaan temperatur untuk memulai keretakan dijelas oleh William David Kingery dalam persamaan berikut ini

$$\Delta Tc = S\frac{k\sigma^*(1-\nu)}{E\alpha}\frac{1}{h} = \frac{S}{hR'} \quad (4.1)$$

Dimana S adalah *shape factor*, σ^* adalah tegangan patahan, k adalah konduktivitas termal , E adalah *young modulus*, α koefisien ekspansi termal dan R' adalah parameter ketahanan patahan. (Soboyejo 2003)

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil data yang dianalisa dapat diambil kesimpulan sebagai berikut

1. Dari kedua model *gating system*, penurunan temperatur dari kedua model saat proses pendinginan memiliki waktu yang hampir sama mencapai tempertur minimum 30ºC, sehingga variasi dari *gating system* tidak terlalu berpengaruh pada kecepatan pendinginan
2. Pada saat Solidifikasi bagian yang mengalami pembekuan terjadi di daerah *connecting rod* yang berhimpit dengan cetakan lalu menyebar ke dalam
3. Sifat -sifat termal pada material seperti konduktivitas termal dan kapasitas panas spesifik sangat berpengaruh pada proses pendinginan sehingga pada cetakan besi cor kelabu baik dari model 1 dan model temperatur lebih cepat menyebar lebih cepat daripada cetakan pasir, sehingga proses pendinginan cetakan besir cro kelabu berlangsung lebih cepat, pada cetakan besi cor kelabu dibutuhkan waktu sekitar 34-36 detik untuk mencapai temperatur 30ºC dan pada cetakan pasir silika membutuhkan waktu 44-45 detik pada simulasi
4. Pada pendinginan yang cepat berpegaruh dengan nilai tegangan termal suatu material, Tegangan termal pada cetakan besi cor kelabu pada setiap model lebih besar dari daripada tegangan termal cetakan pasir silika , dan tegangan termal terbesar pada model 1 cetakan besi cor kelabu sebesar 1,5541e+015 dan tegangan termal terkecil terjadi di cetakan model 2 pasir silika sebesar 6,0414e+014.

5.2 Untuk Saran

Dalam penelitian kali ini dapat dituliskan saran sebagai berikut

1. Memperluas refeensi cara meghitung *gating system*

2. Pengarturan parameter dan input variabel pada ANSYS diperdetail karena mempengaruhi hasil simulasi
3. Time step pada ANSYS seharusnya diperbesar lagi sehingga mencakup semua hasil pendinginan lebih akurat
4. Agar terhindar dari cacat retak maka disarankan memilih cetakan dengan tegangan termal yang rendah maka cetakan yang cocok adalah cetakan pasir model 2 karena memiliki tegangan termal yang lebih rendah daripada cetakan besi cor walaupun waktu pendinginannya lebih lama

DAFTAR PUSTAKA

Ashby, F. Michael. *Material Selection in Mechanical Design.* Burlington: Elsevier Ltd., 2011.

ASM International. *ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.* ASM International, 1990.

—. *Metals Handbook, Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.* ASM International, 1990.

Benara Connect Bearing 4312-Fits Renault Duster. 2019. https://www.motrparts.com/shop/benara-connect-bearing-4312-fits-renault-duster/.

Callister, William D., David G. Rethwisch. *Materials Science and Engineering an Introduction Eight Edition.* US: John Wiley & Sons, Inc. , 2009.

Campbell, John. *The New Metallurgy of Cast Metals Castings Second Edition.* UK: University of Birmingham, 2003.

Davis, J. R. *Gear Materials, Properties, and Manufacture.* Ohio: ASM International, 2005.

Dean, Paul, et al. "Gear Nomenclature, Definitions of Terms with Symbols." *ANSI/AGMA 1012-F90*, 1990: 17.

Degarmo, E. Paul, J T. Black, dan Ronald A. Kohser. *Materials and Processes in Manufacturing (9th ed.).* Wiley, 2003.

Firdaus, Muhammad Bahtiyar. "ANALISA PROSES PERPINDAHAN PANAS PADA PENGECORAN PADUAN AL-12%SI DENGAN METODE ELEMEN HINGGA." 2016.

Kalpakjian, Serope, dan Steven Schmid. *Manufacturing Engineering and Technology (5th ed.).* Pearson, 2006.

L. H. Van Vlack, Addison. *Materials for Engineering: Concepts and Applications.* Wesley Publishing Company, 1982.

Liu, Xialin Chen & Yijun. *Finite Element Modelling and Simulation with Ansys Workbench Second Edition.* Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2019.

Logan, Daryl L. *A first course in the finite element method.* Cengage Learning, 2011.

Plancak, Miroslav, et al. "A Review of the Possibilities to Fabricate Connecting Rods." *International Journal of Engineering, Tome XI-Fascicule 2(ISSN 1584-2665)*, 2013: 169.

PT. Astra Honda Motor. t.thn. https://www.astra-honda.com/product/vario-150-esp (diakses April 4, 2020).

Radzevich, Stephen P. *Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture.* Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2016.

Rao, P.N. *Manufacturing Technology, Volume 1*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education, 2013.

Rao, Srinivas M., A. Girish Kumar, dan D. Vijayaganapathy. "Design and Analysis of Al 7075 Connecting Rod." *International Journal of Pure and Applied Mathematics Volume 118 No. 24 ISSN:1314-3395*, 2018: 4-5.

Rao, T. V. (2003). *Metal Casting: Principles and Practice.* New Age International, 2003.

Sadino, Ir. *Teknologi Pengecoran.* Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2007.

Sidhpara, Ankit B., Vashim I. Kureshi, dan Pinank A. Patel. "Comparision of Manufacturing Methods and Analysis of Connecting Rod for Reducing Cost." *International Journal of Engineering Research and Technology Vol. 2 Issue 5 ISSN:2278-0181*, 2013: 1516-1523.

Singh, Ajeet. *Fundamentals of Machine Design.* Allahabad: Cambridge University Press, 2017.

Singh, Vikas, Sumit Kr. Verma, dan Harish Chandra Ray. "Design and Analysis of Connecting Rod for Different Material Using Ansys Workbench 16.2." *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*

(IJRASET) Volume 5 Issue V ISSN: 2321-9653, 2017: 1156-1158.

Soboyejo, Wole O. *Mechanical properties of engineered material.* Marcel Dekker, 2003.

Sorte, Vaibhav Ingle and Madhukar. "Defects, Root Causes in Casting Process and Their Remedies:." *Vaibhav Ingle. Int. Journal of Engineering Research and Application* , 2017.

Todd, Robert H., Dell K. Allen, dan Leo Alting. *Manufacturing Processes Reference Guide.* Industrial Press Inc, 1994.

Yang, L. *Numerical simulation and experimental verification of gravity and centrifugal investment casting low pressure turbine blades for high NbeTiAl alloy.* Intermetallics, 2015.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

LAMPIRAN

Perhitungan Dimensi *Connecting Rod*

Diketahui spesifikasi mesin 150 cc (PT. Astra Honda Motor n.d.)

Diameter x Langkah	:	57,3 x 57,9 mm
Daya Maksimum	:	9,7 kW (13,1 PS)/8500 rpm
Torsi Maksimum	:	13,4 Nm (1,37 kgf.m)/5000 rpm

Parameter yang didapat dari literatur (Singh, Verma and Ray 2017)

Massa jenis bensin (C_8H_{18})	:	737,22 kg/m^3
Massa molekul bensin	:	0,11423 kg/mol
Temperatur *auto ignition*	:	553 K
Bearing pressure	:	15 kgf/mm^2

Perhitungan kapasitas mesin

$$\frac{1}{4} \times \pi \times diameter^2 \times langkah = \frac{1}{4} \times \pi \times 57{,}3^2 \times 57{,}9$$

$$= 149{,}306 \text{ cc}$$

Perhitungan R spesifik bensin

$$R_{spesifik} = \frac{R}{massa\ molekul}$$

$$= \frac{8{,}314\ J/mol.K}{0{,}11423\ kg/mol}$$

$$= 72{,}783 \text{ J/kg.K}$$

Perhitungan tekanan akibat pembakaran bensin

$$P \times V = m \times R_{spesifik} \times T$$

$$P = \frac{m}{V} \times R_{spesifik} \times T$$

$$= 737{,}22\ kg/m^3 \times 72{,}783\ J/kg.K \times 533\ K$$

$$P = 28599225{,}378 \text{ N/m}^2$$

Perhitungan gaya dari piston:

$$F_p = \frac{\pi}{4} \times diameter^2 \times P$$

$$= \frac{\pi}{4} \times (0{,}0573\ m)^2 \times 28599225{,}378\ N/m^2$$

F_p = 73748,535 N = 7520,258 kgf

Perhitungan *crank radius*

$$r = \frac{langkah}{2}$$

$$= \frac{0{,}0579\ m}{2}$$

r = 0,02895 m

Perhitungan panjang *connecting rod*

$$l = 4{,}5 \times crank\ radius$$

$$= 4{,}5 \times 0{,}02895\ m$$

l = 0,130275 m

Perhitungan konstanta a untuk persamaan Rankine

$$a = \frac{\sigma_c}{\pi^2 \times E}$$

$$= \frac{505000000\ Pa}{\pi^2 \times 72000000000\ Pa}$$

$$a = 7{,}107 \times 10^{-4}$$

Perhitungan *I-section* menggunakan persamaan Rankine

$$F_p = \frac{\sigma_c \times A}{1 + a \times \left(\frac{l}{k_{xx}}\right)^2}$$

$$73748{,}535 = \frac{505000000 \times 11t^2}{1 + 7{,}107.10^{-4} \times \left(\frac{0{,}14475}{\sqrt{\frac{419t^2}{132}}}\right)^2}$$

$$= \frac{5555000000t^2}{1 + 7{,}107.10^{-4} \times 0{,}021 \times \frac{132}{419t^2}}$$

$$= \frac{5555000000t^2}{1 + \frac{0.002}{419t^2}}$$

$$= 5555000000t^2 \times \frac{419t^2}{419t^2 + 0{,}002}$$

$$73748{,}535 = \frac{2327545000000t^4}{419t^2 + 0{,}002}$$

$30900636{,}165t^2 + 147{,}49707 = 2327545000000t^4$

t = 0,004 m

W = 4t = 0,016 m

H = 5t = 0,02 m

H *small end* = 0,75H = 0,015 m

H *big end* = 1,1H = 0,022 m

Perhitungan diameter *piston pin* untuk mendapatkan dimensi *small end*

$$d_p = \sqrt{\frac{F_p}{2 \times P_b}}$$

$$= \sqrt{\frac{7520{,}258}{2 \times 15}}$$

d_p = 0,015 m

Perhitungan dimensi *small end*

Diameter dalam = $1{,}25 \times d_p$
= $1{,}25 \times 0{,}015\ m$
= 0,01875 m

Diameter luar = $1{,}65 \times d_p$
= $1{,}65 \times 0{,}015\ m$
= 0,02475 m

Panjang *piston pin* = $2 \times d_p$
= $2 \times 0{,}015\ m$
= 0,03 m

Perhitungan diameter *crank pin* untuk mendapatkan dimensi *big end*

d_c = $0{,}55 \times diameter$

= $0{,}55 \times 0{,}0573\ m$

d_c = 0,031515 m

Perhitungan dimensi *big end*

Diameter dalam = $1{,}175 \times d_c$

= $1{,}175 \times 0{,}042975\ m$

= 0,037030125 m

Diameter luar = $1{,}45 \times d_c$

= $1{,}45 \times 0{,}042975\ m$

= 0,04569675 m

Panjang *crank pin* = $1{,}5 \times d_c$

= $0{,}725 \times 0{,}042975\ m$

= 0,031156875 m

Perhitungan *Gating System* untuk material pasir silika

Perhitungan *riser* menggunakan metode modulus *riser*

Perhitungan modulus benda cor

Modulus cor = $\dfrac{Volume}{Luas\ permukaan}$

= $\dfrac{21928{,}676\ mm^3}{13977{,}481\ mm^2}$

Modulus cor = 1,569 mm

Perhitungan modulus riser

Modulus *riser* = $1{,}2 \times Modulus\ Benda\ Cor$

= $1{,}2 \times 1{,}569\ mm$

Modulus *riser* = 1,8828 mm

Perhitungan diameter *riser*

Diameter *riser* = $6 \times Modulus\ Benda\ Cor$

= $6 \times 1{,}569$

Diameter *riser* = 9,414 mm

Perhitungan tinggi *riser*

Tinggi riser = $\dfrac{Modulus\ Riser \times Diameter}{Diameter - 4\ Modulus\ Riser}$

= $\dfrac{1{,}8828\ mm \times 9{,}414\ mm}{9{,}414\ mm - 4 \times 1{,}8828\ mm}$

= $\dfrac{17{,}725}{9{,}414 - 7{,}5312}$

= $\dfrac{17{,}725}{1{,}8828}$

= 9,414 mm

Perhitungan volume *riser*

Volume *riser* = $\dfrac{\pi \times Diameter^3}{4}$

= $\dfrac{\pi \times 9{,}414^3}{4}$

Volume *riser* = 655,258 mm^3

Perhitungan leher/*neck riser*

Leher *riser* = $\dfrac{Diameter}{2}$

= $\dfrac{9{,}414}{2}$

Leher *riser* = 4,707 mm

Diameter leher = $1{,}2 \times Leher\ riser + 0{,}1 \times Diameter$

= $1{,}2 \times 4{,}707 + 0{,}1 \times 9{,}414$

= $5{,}6484 + 0{,}9414$

Diameter leher = 6,5898 mm

Perhitungan waktu tuang

Waktu tuang = $K_3\sqrt[3]{Berat\ Coran'}$

= $1{,}85\sqrt[3]{0{,}62}$

Waktu tuang = 1,57808 s

Perhitungan massa logam yang dibutuhkan

Massa logam = $\frac{massa\ benda\ cor}{casting\ yield}$

= $\frac{0{,}496}{0{,}6}$

Massa logam = 0,827 kg

Perhitungan kecepatan tuang

Kecepatan tuang = $\frac{Massa\ logam}{Waktu}$

= $\frac{0{,}827\ kg}{1{,}57808\ s}$

Kecepatan tuang = 0,524 kg/s

Perhitungan tinggi efektif *sprue*

Tinggi efektif sprue = $tinggi\ Sprue - \frac{tinggi\ p^2}{2.tinggi\ c}$

= $50 - \frac{15{,}5^2}{2 \times 31}$

= 50-3,875

Tinggi efektif sprue = 46,125 mm

Perhitungan luas penampang *choke*

luas penampang *choke*

$$= \frac{Massa\ logam}{massa\ jenis \times waktu\ tuang \times efisiensi \times \sqrt{2 \times g \times Tinggi\ efektif\ sprue}}$$

$$= \frac{0{,}827}{2{,}81 \times 10^{-6} \times 1{,}57808 \times 0{,}9 \times \sqrt{2 \times 9800 \times 46{,}125}}$$

$$= \frac{0{,}827}{3{,}991 \times 10^{-6} \times \sqrt{904050}}$$

$$= \frac{0{,}827}{3794{,}704 \times 10^{-6}}$$

$= 217{,}935\ mm^2$

Perhitungan diameter *choke*

Diameter *choke* $= \sqrt{\frac{4\ luas\ penampang\ choke}{\pi}}$

$= \sqrt{\frac{4 \times 217{,}935}{\pi}}$

$= \sqrt{277{,}483}$

$= 16{,}658$ mm

Perhitungan luas penampang *runner*

Luas *runner* $= 2 \times luas\ penampang\ choke$

$= 2 \times 217{,}935$

$= 435{,}87\ mm^2$

Perhitungan *sprue base well*

Luas $= 5 \times luas\ penampang\ choke$

$= 5 \times 217{,}935\ mm^2$

Luas $= 1089{,}675\ mm^2$

Diameter $= \sqrt{\frac{4 \times \text{luas}\ sprue\ base\ well}{\pi}}$

$$= \sqrt{\frac{4 \times 1089{,}675\ mm^2}{\pi}}$$

$$= \sqrt{1387{,}4173}$$

Diameter = 37,248 mm

Lebar $= \frac{Diameter}{2{,}5}$

$$= \frac{37{,}248\ mm}{2{,}5}$$

= 14,899 mm

Kedalaman $= \frac{Luas\ runner}{lebar}$

$$= \frac{435{,}87\ mm^2}{14{,}899\ mm}$$

Kedalaman = 29,255 mm

Perhitungan *laddle*

Luas *laddle* $= luas\ penampang\ choke \sqrt{\frac{tinggi\ top}{tinggi\ choke}}$

$$= 217{,}935\ mm^2 \sqrt{\frac{79{,}255\ mm}{29{,}255\ mm}}$$

$$= 217{,}935\ mm^2 \sqrt{2{,}709}$$

= 358,70009 mm^2

Diameter *laddle* $= \sqrt{\frac{4 \times\ luas\ laddle}{\pi}}$

$$= \sqrt{\frac{4 \times 358{,}70009}{\pi}}$$

$$= \sqrt{456{,}711}$$

= 21,371 mm

Kedalaman $= 2{,}5 \times Diameter\ laddle$

	=	$2{,}5 \times 21{,}371\ mm$
Kedalaman	=	53,4275 mm
Lengkungan	=	$2{,}5 \times jari - jari$
	=	$2{,}5 \times 10{,}6855\ mm$
Lengkungan	=	26,714 mm

Perhitungan *runner extension*

Panjang	=	$2 \times lebar$
	=	$2 \times 14{,}899\ mm$
Panjang	=	29,798 mm

Perhitungan *Gating System* untuk dimensi 100x10x10 mm material aluminium 7075

Perhitungan *riser* menggunakan metode modulus *riser*

Perhitungan modulus benda cor

$$\text{Modulus cor} = \frac{Volume}{Luas\ permukaan}$$

$$= \frac{10000\ cm^3}{4200\ cm^2}$$

Modulus cor = 2,380 cm

Perhitungan modulus riser

$$\text{Modulus } riser = 1{,}2 \times Modulus\ Benda\ Cor$$

$$= 1{,}2 \times 2{,}380\ cm$$

Modulus *riser* = 2,857 cm

Perhitungan diameter *riser*

$$\text{Diameter } riser = 6 \times Modulus\ Benda\ Cor$$

$$= 6 \times 2{,}857$$

Diameter *riser* = 17,14 cm

Perhitungan tinggi *riser*

Tinggi riser $= \dfrac{Modulus\ Riser \times Diameter}{Diameter - 4\ Modulus\ Riser}$

$= \dfrac{2{,}857\ cm \times 17{,}14\ cm}{17{,}14\ cm - 4 \times 2{,}857\ cm}$

$= \dfrac{48{,}968}{17{,}14 - 11{,}428}$

$= \dfrac{48{,}968}{5{,}712}$

= 8,572 cm

Perhitungan volume *riser*

Volume *riser* $= \dfrac{\pi \times Diameter^3}{4}$

$= \dfrac{\pi \times 17{,}14^3}{4}$

Volume *riser* = 1258,845 cm^3

Perhitungan leher/*neck riser*

Leher *riser* $= \dfrac{Diameter}{2}$

$= \dfrac{17{,}14}{2}$

Leher *riser* = 8,57 cm

Diameter leher $= 1{,}2 \times Leher\ riser + 0{,}1 \times Diameter$

$= 1{,}2 \times 8{,}57 + 0{,}1 \times 17{,}14$

$= 10{,}284 + 1{,}714$

Diameter leher = 11,998 cm

Perhitungan waktu tuang

Waktu tuang = $K_3 \sqrt[3]{Berat\ Coran'}$

= $1{,}85\sqrt[3]{30}$

Waktu tuang = 5,748 s

Perhitungan massa logam yang dibutuhkan

Massa logam = $\frac{massa\ benda\ cor}{casting\ yield}$

= $\frac{28{,}1}{0{,}6}$

Massa logam = 46,833 kg

Perhitungan kecepatan tuang

Kecepatan tuang = $\frac{Massa\ logam}{Waktu}$

= $\frac{46{,}833\ kg}{5{,}748\ s}$

Kecepatan tuang = 8,147 kg/s

Perhitungan tinggi efektif *sprue*

Tinggi efektif sprue = $tinggi\ Sprue - \frac{tinggi\ p^2}{2.tinggi\ c}$

= $100 - \frac{5^2}{2 \times 5}$

= 100-2,5

Tinggi efektif sprue = 97,5 cm

Perhitungan luas penampang *choke*

Luas penampang *choke*

$$= \frac{Massa\ logam}{massa\ jenis \times waktu\ tuang \times efisiensi \times \sqrt{2 \times g \times Tinggi\ efektif\ sprue}}$$

$$= \frac{46{,}833}{2{,}81 \times 10^{-5} \times 5{,}748 \times 0{,}9 \times \sqrt{2 \times 9800 \times 97{,}5}}$$

$$= \frac{46{,}833}{14{,}536 \times 10^{-5} \times \sqrt{1911000}}$$

$$= \frac{46{,}833}{19851{,}106 \times 10^{-5}}$$

$= 234{,}165\ cm^2$

Perhitungan diameter *choke*

Diameter *choke* $= \sqrt{\frac{4\ luas\ penampang\ choke}{\pi}}$

$= \sqrt{\frac{4 \times 234{,}165}{\pi}}$

$= \sqrt{298{,}3}$

$= 17{,}27\ cm$

Perhitungan luas penampang *runner*

Luas *runner* $= 2 \times luas\ penampang\ choke$

$= 2 \times 234{,}165$

$= 468{,}33\ cm^2$

Perhitungan *sprue base well*

Luas $= 5 \times luas\ penampang\ choke$

$= 5 \times 234{,}165\ cm^2$

Luas $= 1170{,}825\ cm^2$

Diameter $= \sqrt{\frac{4 \times \text{luas}\ sprue\ base\ well}{\pi}}$

$$= \sqrt{\frac{4 \times 1170.825\ cm^2}{\pi}}$$

$$= \sqrt{1387{,}4173}$$

Diameter = 38,61 cm

Lebar $= \frac{Diameter}{2{,}5}$

$$= \frac{38{,}61\ cm}{2{,}5}$$

= 15,44 cm

Kedalaman $= \frac{Luas\ runner}{lebar}$

$$= \frac{468{,}33\ cm^2}{15{,}44\ cm}$$

Kedalaman = 30,33 cm

Perhitungan *runner extension*

Panjang $= 2 \times lebar$

$= 2 \times 15{,}44\ cm$

Panjang = 30.88 cm

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam penulisan kali ini banyak mendapat bantuan moral maupun material dari berbagai pihak, peneliti juga mendapat petunjuk, dukungan dan dorongan hingga dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini maka dari itu pada kesempatan ini peneliti mengucapkan terimakasih sebesar besarnya kepada :

1. Allah SWT dengan segala rahmat dan karunia-Nya telah memberikan kekuatan bagi peneliti untuk menyelesaikan skripsi ini
2. Kepada bapak ibu saya tercinta yang selama ini membantu peneliti memberikan semangat,dorongan, perhatian, kasih saying serta doa-doa yang tak henti-hentinya mengalir demi kelancaran dan kesuksesan peneliti dalam penyelesaikan tugas akhir ini. Saya ucapkan juga kepada adik tercinta yang memberikan perhatian dan semangat kepada penulis.
3. Kepada Bapak Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbing peneliti yang selalu memberikan bimbingan, petunjuk dan arahan kepada peneliti sehingga dapat diselesaikan tugas akhir ini
4. Kepada Bapak Mavindra Ramadhani, S.T., M.T selaku dosen pembimbing peneliti yang selalu memberikan arahan, dukungan dan semangat kepada peneliti dari awal mahasiswa hingga saat ini
5. Seluruh dosen dan staff akademik yang membantu peneliti dalam memperoleh ilmu, fasilitas dan Pendidikan hingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini
6. Teman- teman yang pernah sekontrakan yang selalu memberikan masukan, cerita kepada peniliti. Naufal Firdaus,Farid,Iqbal B ,Bobby ,Tamam,Adhy, Ghozy, Dayyan, dan Mari, terima kasih telah berbagi cerita suka maupun duka bagi peniliti selama kuliah di Surabaya
7. Teman-teman seangkatan yang membantu dorongan, semangat dan memberikan cerita kepada penulis yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu, terima kasih

8. Serta banyak pihak yang berpengaruh dalam proses penyelesaian tugas akhir ini yang secara sengaja maupun tidak sengaja membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini

Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan dan bantuan yang telah diberikan, semoga penelitian ini bermanfaat bagi yang membacanya

BIODATA PENULIS

Muhammad Puri Yogatama, dilahirkan di Kabupaten Sukoharjo tepatnya didaerah kecamatan polokarto pada tanggal 16 April 1996. Anak pertama dari pasangan Henry Sekarantoro dan Pujandari Widatmojo. Peneliti mnyelesaikan Pendidikan Sekolah Dasar di SD Muhammadiyah Wonorejo pada tahun 2008 dan lanjut sekolah di SMP Mojolaban 2 dan tamat tahun 2011 setelah itu peneliti melanjutkan Sekolah Menengah Atas di SMA N 1 Surakarta selesai pada tahun 2014. Kemudian pada tahun 2016 peneliti melanjutkan ke perguruan tinggi Institut Teknologi Sepuluh Nopember Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Departemen Teknik Material dan Metalurgi. Peneliti menyelesaikan Starta satu (S1) pada tahun 2020.