TUGAS AKHIR – TL184834

SIMULASI ALIRAN PADA PROSES PENGECORAN CONNECTING ROD BERBAHAN ALUMINIUM 7075 UNTUK MESIN MOTOR 150 CC DENGAN VARIASI TINGGI SPRUE CETAKAN DAN TEMPERATUR PENUANGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

FARID MIFTAHUL ANWAR
NRP. 02511640000045

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 2020

TUGAS AKHIR – TL 184834

SIMULASI ALIRAN PADA PROSES PENGECORAN CONNECTING ROD BERBAHAN ALUMINIUM 7075 UNTUK MESIN MOTOR 150 CC DENGAN VARIASI TINGGI SPRUE CETAKAN DAN TEMPERATUR PENUANGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

FARID MIFTAHUL ANWAR
NRP. 02511640000045

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 2020

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

FINAL PROJECT – TL 184834

FLOW SIMULATION IN 7075 ALUMINIUM CONNECTING ROD CASTING PROCESS FOR 150 CC MOTORCYCLE ENGINE WITH VARIATIONS IN MOLD SPRUE HEIGHT AND POURING TEMPERATURE USING FINITE ELEMENT METHOD

FARID MIFTAHUL ANWAR
NRP. 02511640000045

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 2020

(*This page is intentionally left blank*)

SIMULASI ALIRAN PADA PROSES PENGECORAN CONNECTING ROD BERBAHAN ALUMINIUM 7075 UNTUK MESIN MOTOR 150 CC DENGAN VARIASI TINGGI SPRUE CETAKAN DAN TEMPERATUR PENUANGAN 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:
FARID MIFTAHUL ANWAR
NRP 02511640000045

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)

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI

SURABAYA
Agustus 2020

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

SIMULASI ALIRAN PADA PROSES PENGECORAN CONNECTING ROD BERBAHAN ALUMINIUM 7075 UNTUK MESIN MOTOR 150 CC DENGAN VARIASI TINGGI SPRUE CETAKAN DAN TEMPERATUR PENUANGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama : Farid Miftahul Anwar
NRP : 02511640000045
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

Pada era sekarang mesin otomotif telah menjadi kebutuhan utama khususnya sepeda motor. Mesin motor yang masih digunakan sampai sekarang disebut pembakaran dalam. Dalam mesin ini terdapat komponen pendukung utama yaitu piston, connecting rod, crankshaft, dan engine block. Connecting rod adalah komponen mesin yang berguna untuk menyalurkan gerakan dari piston menuju crankshaft. Connecting rod saat ini dimanufaktur melalui tiga metode yaitu forging, powder metallurgy, dan casting. Secara ekonomi, proses casting merupakan yang paling murah dibanding metode lain. Pada proses melakukan casting seringkali menggunakan trial and error untuk mendapatkan parameter casting yang dapat menghasilkan produk yang baik. Maka saat ini mulai digunakannlah simulasi numerik untuk menekan biaya produksi. Sudah banyak perangkat lunak yang diciptakan untuk mensimulasikan proses casting, namun banyak juga biaya yang dibutuhkan untuk membeli perangkat lunak tersebut. Maka dari itu perlu dilakukan penelitian mengenai simulasi numerik casting menggunakan perangkat lunak numerik umum yaitu ANSYS Workbench. ANSYS Workbench menyediakan berbagai fitur analisis sehingga sebuah perangkat hanya perlu menggunakan satu perangkat lunak untuk berbagai kebutuhan. Salah satu di dalamnya adalah ANSYS Fluent yang

bergunan menganlisis perilaku suatu fluida. Seperti diketahui proses pengisian cetakan harus menghindari aliran turbulen agar didapat produk cor yang baik. Parameter yang diamati pada penelitian ini adalah pouring temperatur dan tinggi sprue cetakan terhadap sifat logam cair di dalam cetakan pada pengecoran connecting rod. Variasi tinggi sprue yang digunakan adalah 50 mm, 100 mm, dan 150 mm. Sedangkan untuk variasi temperatur penuangan adalah 715 ^oC, 740 ^oC, dan 765 ^oC. Untuk material yang digunakan untuk connecting rod adalah aluminium 7075. Langkah-langkah penelitian ini dimulai dari desain model connecting rod dan gating system, kemudian melakukan simulasi dan analisis hasil. Berdasarkan simulasi ini, model yang memiliki intensitas turbulensi terkecil adalah tinggi sprue 20 mm dengan temperatur penuangan 740^oC dan 765^oC. Untuk fraksi volume udara terkecil yang masuk ke dalam rongga cetak terjadi pada model tinggi sprue 20 mm dengan temperatur penuangan 740^oC. Dengan mempertimbangkan dua variabel tersebut, maka model pengecoran connecting rod untuk mesin motor 150 cc yang paling baik adalah menggunakan tinggi sprue 20 mm dengan temperatur penuangan 740^oC.

Kata Kunci: ***Simulasi, pengecoran, ANSYS***

FLOW SIMULATION IN 7075 ALUMINIUM CONNECTING ROD CASTING PROCESS FOR 150 CC MOTORCYCLE ENGINE WITH VARIATIONS IN MOLD SPRUE HEIGHT AND POURING TEMPERATURE USING FINITE ELEMENT METHOD

Student Name : Farid Miftahul Anwar
NRP : 02511640000045
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

In this era of automotive engines has become a major need, especially motorcycles. The engine that is still used today is called internal combustion. In this engine there are main supporting components, namely piston, connecting rod, crankshaft, and engine block. Connecting rod is a machine component that is useful for channeling movement from the piston to the crankshaft. Connecting rods are currently manufactured through three methods namely forging, powder metallurgy, and casting. Economically, the casting process is the cheapest compared to other methods. In the process of casting often use trial and error to get the casting parameters that can produce good products. So now numerical simulations are starting to be used to reduce production costs. Much software has been created to simulate the casting process, but there are also many costs involved in purchasing the software. Therefore, it is necessary to do research on numerical casting simulations using general numerical software, namely ANSYS Workbench. ANSYS Workbench provides various analysis features so that a device only needs to use one software for various needs. One of them is ANSYS Fluent which is used to analyze the behavior of a fluid. As is known the process of filling the mold must avoid turbulent flow in order to get a good cast product. The parameters observed in

this study were pouring temperature and sprue height of the mold on the properties of the liquid metal. Sprue height variations used are 50 mm, 100 mm, and 150 mm. As for the pouring temperature variations are 715℃, 740℃ and 765℃. The material used for connecting rods is aluminum 7075. The steps of this research start from the design of the connecting rod model and the gating system, then do the simulation and analyze the results. Based on this simulation, the model that has the smallest turbulence intensity is a sprue height of 20 mm with a pouring temperature of 740°C and 765°C. For the smallest volume of air fraction entering the mold cavity occurs in the model sprue height 20 mm with a pouring temperature of 740°C. Considering these two variables, the connecting rod casting model for a 150 cc motorbike engine is best to use a 20 mm sprue height with a pouring temperature of 740°C.

Keywords: ***Simulation, casting, ANSYS***

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas tersusunnya laporan tugas akhir dengan judul :"Simulasi Aliran pada Proses Pengecoran Connecting Rod Berbahan Aluminium 7075 untuk Mesin Motor 150 cc dengan Variasi Tinggi Sprue dan Temperatur Penuangan Menggunakan Metode Elemen Hingga". Semoga laporan tugas akhir ini bisa bermanfaat.

Penulis mengucapkan terima kasih setulus-tulusnya kepada semua pihak yang terlibat dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Semoga semua bantuan, baik materiil maupun non materiil mendapatkan balasan yang baik di sisi Tuhan Yang Maha Esa.

Selain itu, penulis juga memohon maaf yang sebesar-besarnya atas semua kesalahan selama proses penulisan maupun setelah selesainya penulisan ini. Penulis sangat terbuka atas semua kritik dan saran guna menjadikan laporan tugas akhir ini lebih baik.

Surabaya, 20 April 2020
Penulis

Farid Miftahul Anwar

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL ..... **i**
LEMBAR PENGESAHAN ..... **v**
ABSTRAK ..... **vii**
ABSTRACT ..... **ix**
KATA PENGANTAR ..... **xi**
DAFTAR ISI ..... **xiii**
DAFTAR GAMBAR ..... **xv**
DAFTAR TABEL ..... **xviii**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 3
1.3 Batasan Masalah 3
1.4 Tujuan Penelitian 4
1.5 Manfaat Penelitian 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA **7**
2.1 Penelitian yang Relevan 7
2.2 Teori Dasar *Connecting Rod* 14
2.2.1 Pengaruh Gaya Piston pada *Connecting Rod* ... 15
2.2.2 Desain *Connecting Rod* 16
2.3 Aluminium 7075 18
2.4 Sistem Saluran (*Gating System*) 23
2.4.1 Cawan Tuang (*Pouring Basin*) 23
2.4.2 Saluran Turun (*Sprue*) 24
2.4.3 *Sprue Base Well* 25
2.4.4 *Runner* 25
2.4.5 *Ingate* 26
2.5 Desain Gating sistem 27
2.6 Cacat Pengecoran Akibat Aliran Logam 33
2.6.1 Cacat Gas 33
2.6.2 Cacat Akibat Penuangan 33
2.7 Konsep Dinamika Fluida Dalam Pengecoran 34
2.7.1 Tekanan 35
2.7.2 Viskositas 36
2.7.3 Temperatur dan Entalpi 39

2.7.4 Persamaan Aliran *Liquid* 40
2.7.5 Kondisi Batas 42
2.7.6 *Dimensionless Numbers* 45
2.7.7 Persamaan Bernoulli 48
2.8 Komputasi Dinamika Fluida 49
2.8.1 Komputasi *Mesh* 49
2.8.2 Pendekatan Numerik 51
2.8.3 Representasi Geometri 53
2.8.4 Pelacakan *Free Surface* 55
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 58
3.1 Diagram Alir Penelitian 58
3.2 Perhitungan Data Awal 59
3.2.1 Dimensi *Connecting Rod* 59
3.2.1 Dimensi *Gating System* 61
3.3 Proses Simulasi 63
3.3.1 *Meshing* 63
3.3.2 Simulasi 64
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 69
4.1 Pola Intensitas Turbulensi 69
4.1.1 Hasil Simulasi 69
4.1.2 Pembahasan 75
4.2 Pola Fraksi Volume 77
4.2.1 Hasil Simulasi 77
4.2.2 Pembahasan 84
4.3 Pola Distribusi Temperatur 86
4.3.1 Hasil Simulasi 87
4.3.2 Pembahasan 96
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 99
5.1 Kesimpulan 99
5.2 Saran 100
DAFTAR PUSTAKA 101
LAMPIRAN 105
UCAPAN TERIMA KASIH 111
BIODATA PENULIS 113

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 *Connecting rod* 14
Gambar 2.2 Konstruksi *connecting rod* 15
Gambar 2.3 Gaya yang bekerja pada sistem piston 16
Gambar 2.4 *Pouring basin* dengan dan tanpa *slag trap* 24
Gambar 2.5 *Sprue* dengan bentuk lurus dan mempunyai sudut kemiringan..... 25
Gambar 2.6 Perbedaan ketika *runner* penuh terisi dengan yang hanya sebagian terisi 26
Gambar 2.7 Jenis-jenis *ingate*..... 27
Gambar 2.8 Perbedaan *top gate, bottom gate,* dan *parting gate* 29
Gambar 2.9 Dimensi tinggi *sprue*..... 30
Gambar 2.10 Dimensi *pouring basin*..... 30
Gambar 2.11 Dimensi dari *sprue base well*..... 31
Gambar 2.12 Contoh cacat gas yaitu *air inclusions* dan *pin hole porosity*..... 33
Gambar 2.13 Contoh cacat akibat penuangan yaitu *mis-runs, cold shuts,* dan *slag inclusions* 34
Gambar 2.14 Ilustrasi dua aliran sejajar mengalir dengan kecepatan yang berbeda 37
Gambar 2.15 Vektor normal terhadap permukaan..... 44
Gambar 2.16 *Grid* dua dimensi 51
Gambar 2.17 Metode FAVOR..... 54
Gambar 2.18 Ilustrasi metode VOF 55
Gambar 2.19 Perhitungan aliran volume menggunakan metode geometri..... 56
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian..... 59
Gambar 3. 2 Model 3 dimensi *connecting rod* mesin motor 150 cc..... 60
Gambar 3.3 Gambar teknik *connecting rod* mesin motor 150 cc 61
Gambar 3.4 Model 3 dimensi benda cor dengan *gating system* 63
Gambar 3.5 Proses *meshing* 64

Gambar 4.1 Model 20 mm temperatur 715°C untuk intensitas turbulensi..... 69
Gambar 4.2 Model 60 mm temperatur 715°C untuk intensitas turbulensi..... 70
Gambar 4.3 Model 100 mm temperatur 715°C untuk intensitas turbulensi..... 70
Gambar 4.4 Model 20 mm 740°C untuk intensitas turbulensi 71
Gambar 4.5 Model 60 mm 740°C untuk intensitas turbulensi 72
Gambar 4.6 Model 100 mm 740°C untuk intensitas turbulensi 72
Gambar 4.7 Model 20 mm 765°C untuk intensitas turbulensi 73
Gambar 4.8 Model 60 mm 765°C untuk intensitas turbulensi 73
Gambar 4.9 Model 100 mm 765°C untuk intensitas turbulensi 74
Gambar 4.10 Grafik intensitas turbulensi 76
Gambar 4.11 Model 20 mm 715°C untuk fraksi volume 78
Gambar 4.12 Model 60 mm 715°C untuk fraksi volume 78
Gambar 4.13 Model 100 mm 715°C untuk fraksi volume 79
Gambar 4.14 Model 20 mm 740°C untuk fraksi volume 80
Gambar 4.15 Model 60 mm 740°C untuk fraksi volume 80
Gambar 4.16 Model 100 mm 740°C untuk fraksi volume 81
Gambar 4.17 Model 20 mm 765°C untuk fraksi volume 82
Gambar 4.18 Model 60 mm 765°C untuk fraksi volume 82
Gambar 4.19 Model 100 mm 765°C untuk fraksi volume 83
Gambar 4.21 Grafik fraksi volume..... 84
Gambar 4.22 Model 20 mm 715°C..... 87
Gambar 4.23 Model 60 mm 715°C..... 88
Gambar 4.24 Model 100 mm 715°C..... 89
Gambar 4.25 Model 20 mm 740°C..... 90
Gambar 4.26 Model 60 mm 740°C..... 91
Gambar 4.27 Model 100 mm 740°C..... 92
Gambar 4.28 Model 20 mm 765°C..... 93
Gambar 4.29 Model 60 mm 765°C..... 94
Gambar 4.30 Model 100 mm 765°C..... 95
Gambar 4.31 Grafik distribusi temperatur 97

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Beberapa penelitian yang relevan 7
Tabel 2.2 Komposisi alumunium 7075 22
Tabel 2.3 Sifat mekanik alumunium 7075..... 22
Tabel 2.4 Sifat fisik aluminium 7075..... 22
Tabel 2.5 Kecepatan tuang untuk pengecoran pasir..... 27
Tabel 2.6 Nilai faktor efisiensi dengan beberapa tipe *runner* 29
Tabel 2.7 Rasio luas potongan melintang antara *choke*, *runner*, dan *ingate*..... 31
Tabel 3.1 Dimensi model *connecting rod* mesin motor 150 cc 59
Tabel 3.2 Dimensi *gating system* untuk masing-masing tinggi *sprue* 61
Tabel 3.3 Parameter awal sebelum simulasi..... 64
Tabel 3.4 Sifat-sifat material cor dan cetakan 64
Tabel 3.5 Kombinasi variabel..... 67
Tabel 4.1 Intensitas turbulensi maksimum pada temperatur 715°C 71
Tabel 4.2 Intensitas turbulensi maksimum pada temperatur 740°C 72
Tabel 4.3 Intensitas turbulensi maksimum pada temperatur 765°C 74
Tabel 4.4 Intensitas turbulensi maksimum pada tinggi *sprue* 20 mm 74
Tabel 4.5 Intensitas turbulensi maksimum pada tinggi *sprue* 60 mm 75
Tabel 4.6 Intensitas turbulensi maksimum pada tinggi *sprue* 100 mm 75
Tabel 4.7 Fraksi volume maksimum pada temperatur 715°C 79
Tabel 4.8 Fraksi volume maksimum pada temperatur 740°C 81
Tabel 4.9 Fraksi volume maksimum pada temperatur 765°C 83

Tabel 4.10 Fraksi volume maksimum pada tinggi *sprue* 20 mm 83
Tabel 4.11 Fraksi volume maksimum pada tinggi *sprue* 60 mm 83
Tabel 4.12 Fraksi volume maksimum pada tinggi *sprue* 100 mm 84
Tabel 4.13 Nilai temperatur pada daerah fraksi volume aluminium terendah 95

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi semakin hari kian bertambah pesat. Termasuk juga dalam teknologi otomotif. Perkembangan ini tidak hanya dalam inovasi namun juga dalam hal peningkatan jumlah permintaan. Permintaan dalam pemenuhan teknologi otomotif sepeda motor misalnya. Di Indonesia penjualan sepeda motor terus mengalami peningkatan setiap tahun. Menurut AISI (Aosiasi Industri Sepeda Motor Indonesia) penjualan sepeda motor tahun 2019 sebesar 6.487.460 unit meningkat dari tahun 2018 yang berjumlah 6.383.108 unit. Begitu juga jumlah ekspor sepeda motor meningkat dari tahun 2018 yang berjumlah 627.421 menjadi 810.433 pada tahun 2019. Penjualan sepeda motor jenis skutik sangat laris disbanding jenis bebek dan sport. Pabrikan motor yang masih menguasai jumlah penjualan di Indonesia adalah Honda dengan motor varian NEW VARIO 150 eSP menempati posisi teratas. Maka dari itu, pengambilan objek penelitian berupa sepeda motor bermesin 150 cc bisa dilakukan guna mendukung produksi motor nasional. Salah satu komponen dalam mesin sepeda motor adalah *connecting rod* atau batang piston yang berfungsi meneruskan gaya piston kepada *crankshaft* yang nantinya diteruskan pada sistem gear sampai bisa menggerakkan roda. Dalam Metode pembuatan *connecting rod* yang banyak digunakan di industri adalah *forging* (penempaan) dan *casting* (pengecoran). Ada pertimbangan dalam memilih metode pembuatan *connecting rod*. Menurut (Plancak, et al. 2013), pertimbangan pemilihan proses manufaktur *connecting rod* berdasarkan sifat mekanik, berat, dan biaya. Untuk mesin performa tinggi *connecting rod* dibuat dengan cara penempaan. Di China, 90% connecting rod dibuat dengan cara tempa dan 10% dengan cara pengecoran. *Connecting rod* tempa memberikan sifat mekanik yang tinggi sehingga mampu menahan beban tinggi. Semua jenis mobil berkecepetan tinggi menggunakan *connecting rod* tempa. *Connecting rod* hasil 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. Sebagai pertimbangan lain digunakan juga masalah biaya proses manufaktur. Untuk melakukan proses pengecoran perlu direncanakan secara baik untuk menghindari kemungkinan terjadi kegagalan. Pada era digital seperti sekarang, sudah terdapat aplikasi komputer yang berfungsi mensimulasikan proses pengecoran. Pemilihan aplikasi komputer yang sudah tersedia disesuaikan dengan kebutuhan proses simulasi tersebut. Terdapat banyak nama aplikasi pengecoran seperti PROCAST, FLOW3D, MAGMA, FT-STAR, dan lainnya. Namun aplikasi tersebut hanya digunakan khusus simulasi pengecoran. Dalam sisi ekonomi, penggunaan aplikasi dengan fungsi yang lebih banyak lebih menguntungkan karena hanya diperlukan sebuah aplikasi untuk menjalankan berbagai simulasi. Contoh aplikasi yang mempunyai fungsi beragam adalah ANSYS yang saat ini telah membeli aplikasi FLUENT dan CFX sehingga bisa digunakan untuk mensimulasikan fenomena aliran (Xuan-xuan, Ling and Yi-jie 2012). (Sidhpara, Kureshi and Patel 2013) melakukan penelitian tentang perbandingan biaya pembuatan *connecting rod* antara proses penempaan dan pengecoran. Disimpulkan bahwa biaya proses pengecoran lebih sedikit daripada proses penempaan untuk *connecting rod*. Karena produksi motor nasional yang semakin meningkat tiap tahun maka dibutuhkan jenis pengecoran yang paling ekonomis. Menurut (Ashby 2011) jenis pengecoran untuk *connecting rod* yang berjumlah lebih dari 100 buah, paling murah digunakan proses casting cetakan permanen.

(Xuan-xuan, Ling and Yi-jie 2012) melakukan penelitian berupa simulasi pengisian logam cair ke dalam cetakan dengan material aluminium murni menggunakan aplikasi simulasi ANSYS Fluent. Hasil penelitian menunjukkan distribusi temperatur, turbulensi, energi, dan tegangan permukaan dapat terkontrol dengan baik. Sifat material cetak dan kondisi batasan awal juga dapat diterapkan. (Pratama and Soeharto 2012) mengungkapkan bahwa aliran turbulen adalah aliran yang sangat

tidak diharapkan dalam pengecoran. Aliran turbulen dapat menyebabkan terperangkapnya gas-gas dalam logam cair sehingga menyebabkan porositas dalam produk akhir. Tinggi jatuhnya logam cair sangat berpengaruh pada aliran turbulen, sehingga diharapkan desain cetakan yang dibuat bisa meminimalisir atau menghilangkan aliran turbulen yang terjadi. Menurut (Adianta 2018) kualitas hasil coran dipengaruhi oleh beberapa hal antara lain cetakan, aliran logam cair, desain sistem saluran, pola cetakan, dan temperatur penuangan. Aliran logam cair tergantung pada temperatur penuangan, dimana temperatur penuangan yang tinggi dapat menyebabkan turbulensi aliran. Turbulensi aliran inilah yang menjadi salah satu penyebab cacat coran. Cacat pada coran dapat diminimalisir dengan metode *trial and error*. Metode ini memakan biaya dan waktu sehingga digunakanlah metode numerik dengan aplikasi komputer berbasis CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

1.2 Perumusan Masalah

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

1. Bagaimana pengaruh tinggi *sprue* terhadap:
   a. Nilai maksimum intensitas turbulensi aluminium 7075 cair di dalam rongga cetakan *connecting rod?*
   b. Nilai minimum fraksi volume logam yang terdapat dalam aluminium 7075 cair?
2. Bagaimana pengaruh temperatur tuang terhadap:
   a. Nilai maksimum intensitas turbulensi aluminium 7075 cair di dalam rongga cetakan *connecting rod?*
   b. Nilai minimum fraksi volume logam yang terdapat dalam aluminium 7075 cair dan temperatur pada daerah tersebut?
3. Bagaimana model temperatur penuangan dan tinggi *sprue* optimum yang didapatkan?

1.3 Batasan Masalah

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

1. Logam cair diasumsikan sebagai fluida *incompressible*
2. Simulasi dimulai tepat setelah logam cair melewati *pouring basin*
3. *Riser* tidak perlu digunakan karena simulasi hanya terjadi ketika logam cair mengisi rongga cetak, sehingga fenomena penyusutan diabaikan
4. Massa *gating system* diasumsikan sebesar 0,54 kg sebagai perhitungan desain awal.
5. *Casting yield* diasumsikan sebesar 60%.
6. Diasumsikan tidak ada transfer massa dan aliran yang memutar.

1.4 Tujuan Penelitian

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

1. Menganalisis pengaruh tinggi *sprue* terhadap:
   a. Nilai maksimum intensitas turbulensi aluminium 7075 cair di dalam rongga cetakan *connecting rod.*
   b. Nilai minimum fraksi volume logam yang terdapat dalam aluminium 7075 cair.
2. Menganalisis pengaruh temperatur tuang terhadap:
   a. Nilai maksimum intensitas turbulensi aluminium 7075 cair di dalam rongga cetakan *connecting rod.*
   b. Nilai minimum fraksi volume logam yang terdapat dalam aluminium 7075 cair.dan temperatur pada daerah tersebut.
3. Mengetahui model temperatur penuangan dan tinggi *sprue* optimum.

1.5 Manfaat Penelitian

Setelah melakukan penelitian ini diharapkan membawa manfaat sebagai berikut:

1. Mampu memahami dan menjelaskan pola aliran logam cair yang dapat menimbulkan cacat dalam pengecoran dan memperoleh solusi untuk mendapat pola aliran yang baik.

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 yang Relevan

Sebagai dasar melakukan penelitian ini dilakukan studi terhadap penelitian sebelumnya yang relevan. Beberapa penelitian yang telah ditinjau ditampilkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Beberapa penelitian yang relevan

No.	Peneliti	Metode	Hasil
1	Miroslav Plancal, Dragisa Vilotic, Ognjan Luzanin, Igor Kacmarcik, Aljosa Ivanisevic, Dejan Movrin, Plavka Skakun, dan Mladomir Milutinovic (2013)	Studi lapangan di perusahaan-perusahaan China	Perbandingan proses *forging*, *powder metallurgy*, dan pengecoran dalam pembuatan *connecting rod*.
2	F. Michael Ashby (2011)	Perhitungan biaya produksi	Perbandingan biaya proses pengecoran *connecting rod* antara *sand casting* dan *permanent mold casting*.
3	S. Aishwarya dan E. V. V. Ramanamurthy (2015)	Optimalisasi desain *connecting rod*	Perbandingan perhitungan dimensi *connecting rod* teoritis dengan *connecting rod* yang sebenarnya

4	Srikanth Karumuri, Terefe Jima, Masresha Adasho, dan Veeranjaneyulu Itha (2017)	Penggunaan CNC (*Computer Numerical Control*)	Cetakan pengecoran *connecting rod* berisi 8 buah produk
5	Ankit B. Sidhpara, Vashim I. Kureshi, dan Prof. Pinank A. Patel (2013)	Perhitungan biaya material, tenaga kerja, peralatan, energi, dan upah.	Perbandingan biaya produksi *connecting rod* metode *forging* dan *casting*
6	Ramesh B. T., Vinayaka Koppad, dan Hemantha Raju T. (2017)	Simulasi sifat mekanik *connecting rod*	Perbandingan sifat mekanik *connecting rod* berbahan *forged steel* dan Aluminium 7075
7	Andri Willy Adianta, Suprianto, Arnius Daely, dan Mikael F. Bangun (2018)	Simulasi fluiditas paduan aluminium-silikon	Perbandingan fluiditas, kecepatan aliran, tekanan, dan cacat permukaan dengan variabel temperatur penuangan dan tebal rongga cetakan.
8	Rizal Mahendra Pratama dan Soeharto (2012)	Eksperimen pengecoran dengan variasi *top, bottom,*	Perbandingan porositas produk hasil penggunaan *top, bottom,* dan

		dan *parting gating system.*	*parting gating system*
9	M.Srinivas Rao, A. Girish Kumar, dan Dr. D. Vijayaganapathy (2018)	Simulasi sifat mekanik *connecting rod* berbahan aluminium 7075	Aluminium 7075 mampu digunakan sebagai bahan *connecting rod*
10	Yuwen Xuan-xuan,' Chen Ling, dan' Han Yi-jie (2012)	Simulasi pengisian cetakan coran menggunakan ANSYS Fluent	Pola pengisian dan persebaran temperatur selama pengisian.
11.	E. F. Ochulor, S. O. Adeosun, S. A. Balogun (2015)	Eksperimen pengaruh tinggi *sprue* terhadap kekuatan tarik dan kekerasan	Trend penurunan kekuatan tarik dan kekerasan seiring bertambahnya tinggi *sprue*
12.	Klemens A., Rahangmetan, Cipto, F. Sariman and M. Syahid (2019)	Eksperimen pengaruh temperatur penuangan terhadap kekuatan tarik	Kekuatan tarik semakin menurun seiring peningkatan temperatur penuangan

Connecting rod merupakan komponen mesin pembakaran dalam. Proses pembuatan connecting rod bermacam-macam. Menurut (Plancak, et al. 2013) proses pembuatan *connecting rod* yang ada meliputi *forging*, *powder metallurgy*, dan pengecoran. Metode *forging* menghasilkan sifat mekanik yang tinggi dan mampu menahan beban berat. Biasa digunakan untuk mobil dengan

kecepatan tinggi. 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 seperti sepeda motor.

Dalam pengecoran masih terdapat dua metode yaitu *sand casting* dan *permanent mold* casting. Menurut (Ashby 2011) untuk produk dengan jumlah lebih dari 100 unit, biaya yang paling rendah adalah menggunakan *permanent mold casting.* Dimensi *connecting rod* perlu untuk diperhitungkan secara teoritis agar dalam pengaplikasiannya sesuai dengan kondisi yang terdapat dalam mesin pembakaran dalam. (Aishwarya and Ramanamurthy 2015) melakukan perbandingan antara perhitungan teoritis dengan *connecting rod* yang sebenarnya. Didapatkan hasil perhitungan teoritis mampu mendekati dimensi benda sebenarnya. Kemudian peneliti juga melakukan perbandingan desain *truss* dengan desain yang sudah ada yaitu *i-section.* Didapatkan hasil bahwa desain lama yaitu *i-section* memiliki sifat mekanik yang baik dibanding *truss design* namun memiliki massa yang lebih besar.

Untuk pembuatan cetakan *connecting rod*, bentuk yang biasanya dipakai adalah dalam satu cetakan berisi 8 *connecting rod* (Karumuri, et al. 2017). Perbandingan proses manufaktur *connecting rod* dari segi biaya telah dilakukan penelitian oleh (Sidhpara, Kureshi and Patel 2013). Biaya yang dibandingkan antara kedua proses tersebut meliputi material, peralatan, energi, tenaga kerja, dan upah. Didapatkan hasil bahwa proses produksi pengecoran *connecting rod* membutuhkan biaya lebih rendah dibandingkan proses *forging*. Bahan yang digunakan untuk *connecting rod* pada umumnya adalah *forged steel* dan aluminiu 7075. (Ramesh, Koppad and T. 2017) melakukan simulasi sifat mekanik dari kedua bahan tersebut. Hasil yang didapatkan adalah bahwa sifat mekanik *connecting rod* berbahan *forged steel* lebih baik dibanding aluminium 7075. Keuntungan yang didapat dari penggunaan bahan aluminium 7075 untuk *connecting rod* adalah

beratnya menjadi 3 kali lebih rendah dibanding *forged steel*. Berat yang lebih rendah ini berguna untuk meningkatkan kecepatan rotasi per menit (rpm).

Dalam proses pengisian cetakan pengecoran, hal yang perlu dipelajari adalah fluiditas. Fluiditas adalah kemampuan logam cair mengalir mencapai jarak tertentu. (Adianta 2018) melakukan penelitian mengenai fluiditas ini menggunakan simulasi komputer. Bahan yang digunakan adalah paduan aluminium-silikon. Variabel yang digunakan adalah temperatur penuangan dan tebal rongga cetakan. Untuk variabel pengamatan yaitu fluiditas, kecepatan aliran, tekanan, dan cacat permukaan. Hasil yang didapat adalah temperatur penuangan tinggi dapat meningkatkan fluiditas dan kecepatan aliran, namun temperatur penuangan tinggi menyebabkan kemungkinan terjadi cacat permukaan semakin besar. Bertambahnya tekanan logam cair menyebabkan menurunnya temperatur solidus. Sehingga sebisa mungkin tekanan dijaga konstan agar mengalami pembekuan merata. Untuk tebal rongga cetakan, semakin kecil tebalnya maka semakin kecil pula fluiditas dan kecepatan alirnya.

Dalam pengecoran yang perlu diperhatikan lagi adalah *gating system*. *Gating system* adalah saluran logam cair sebelum masuk ke cetakan produk. Secara umum terdapat tiga jenis *gating system* yaitu *top, bottom,* dan *parting gating system*. Sesuai namanya *top gating system* adalah saluran yang memasukkan logam cair dari atas cetakan, *bottom gating system* dari bawah, dan *parting gating system* adalah dari *parting line* produk cor. (Pratama and Soeharto 2012) telah melakukan eksperimen pengecoran untuk membandingkan ketiga jenis *gating system* tersebut. Variabel yang diamati adalah porositas yang terjadi pada produk cor. Hasil yang didapat adalah persentase porositas terkecil adalah dengan model *parting line gating system*. *Top gating system* memiliki ketinggian jatuh logam cair paling besar sehingga menyebabkan aliran turbulensi. Aliran turbulensi menyebabkan terperangkapnya udara di dalam rongga cetakan. Selain itu ketinggian yang besar menyebabkan erosi pada cetakan. *Bottom gating system* tidak menyebabkan aliran turbulen karena aliran

masuk melalui bawah rongga cetakan, namun menyebabkan erosi pada bagian bawah cetakan.

Bahan lain yang sering digunakan juga untuk *connecting rod* adalah aluminium A360. (Rao, Kumar and Vijayaganapathy 2018) telah mensimulasikan sifat mekanik dari *connecting rod* berbahan aluminium 7075. Dari analisis sifat mekanik yaitu *elastic strain, principal stress, principal strain,* dan *deformation*, disimpulkan bahwa aluminium 7075 mampu digunakan untuk material *connecting rod* kendaraan roda dua sebagai alternatif material selain yang sudah ada yaitu A360. Proses simulasi pengecoran dapat menggunakan berbagai perangkat lunak yang sudah ada. Simulasi ini digunakan sebagai sarana percobaan sebelum dilakukan pengecoran sebenarnya. Dari simulasi ini dapat diperkirakan desain produk, *gating system*, maupun parameter-parameter yang akan digunakan dalam pengecoran. (Xuan-xuan, Ling and Yi-jie 2012) telah melakukan simulasi pengecoran menggunakan perangkat lunak umum yaitu ANSYS Fluent. Hasil yang didapatan adalah simulasi untuk aliran logam cair dapat dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent. Perubahan temperatur dipengaruhi oleh *flow field* (aliran). Dapat memperlihatkan pola aliran sehingga dapat diperkirakan adanya cacat pengecoran.

Dalam ANSYS Fluent model yang digunakan untuk simulasi pengecoran adalah model multifasa, model energi, dan model turbulensi. Model yang digunakan untuk turbulensi dalam pengecoran adalah RNG k-epsilon, karena aliran di *runner* sering mengalami turbulensi (Dai, et al. 2003). Kemudian untuk bahan cetakan pengecoran yang paling baik digunakan untuk cetakan permanen aluminium adalah baja perkakas H13 (Technologies 2000).

Berdasarkan teori, tinggi *sprue* merupakan dimensi yang pertama kali ditentukan dalam pembuatan *gating system* (P. Rao 2013). Dalam penentuan tinggi *sprue* tidak ada persamaan khusus, namun menggunakan pengalaman pelaku pengecoran. Dengan kata lain, tinggi *sprue* didapat dengan cara *trial and error*. Maka dari itu, dalam simulasi ini digunakanlah tinggi *sprue* sebagai

variabel. (Ochulor, Adeosun and Balogun 2015) melakukan penelitian yang berjudul pengaruh tinggi *sprue* terhadap sifat mekanik besi cor berdinding tipis (*thin wall ductile iron*). Penelitian ini berkaitan dengan adanya fenomena cacat pengecoran akibat proses pengisian cetakan. Cacat yang bisa terjadi antara lain *cold shut, mis-run, blow holes,* dan *sand inclusion.* Komponen penting untuk mengatasi fenomena ini adalah adanya *gating system* yang baik. Cacat pengecoran tersebut akan berpengaruh terhadap sifat mekanik benda cor. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan adanya trend penurunan kekerasan dan kekuatan tarik seiring bertambahnya tinggi *sprue*. Hal ini menunjukkan dua hal yaitu pertama adalah semakin besar tinggi *sprue* maka terdapat aliran turbulen yang besar pula sehingga menyebabkan terdapat udara yang terperangkap dalam logam cair. Hal yang kedua adalah, banyaknya transfer panas yang terjadi selama aliran menempuh tinggi *sprue* yang besar. Hal ini bisa menyebabkan penurunan kekerasan dan kekuatan tarik akibat banyak energi panas yang ditransfer pada dinding *sprue*. Aliran yang jatuh dari jarak besar akan memiliki energi kinetik yang lebih besar dibanding yang jatuh dari jarak yang lebih kecil. Energi kinetik besar dapat menimbulkan aliran turbulen. Energi turbulen besar bisa menyebabkan erosi cetakan dan terperangkapnya udara di dalam benda cor. Namun disamping itu, kecepatan aliran yang kecil dapat menyebabkan cacat *cold shut*.

Temperatur penuangan tidak bisa didapatkan secara pasti, yang tentunya semua temperatur di atas titik leleh menjadikan aluminium berfasa cair. Temperatur penuangan yang terlalu mendekati titik beku akan menyebabkan pendinginan, sedangkan temperatur yang terlalu tinggi menyebabkan kerusakan pada cetakan cor. Menurut (Klemens, et al. 2019), temperatur penuangan penting dipelajari karena apabila temperatur penuangan terlalu rendah, cetakan tidak terisi penuh disebabkan logam akan membeku terlebih dahulu pada *ingate*. Dan apabila temperatur penuangan terlalu tinggi menyebabkan penyusutan dan akurasi dimensi yang rendah. Temperatur penuangan paduan aluminium biasanya berkisar antara 675-790°C. Dalam penelitian

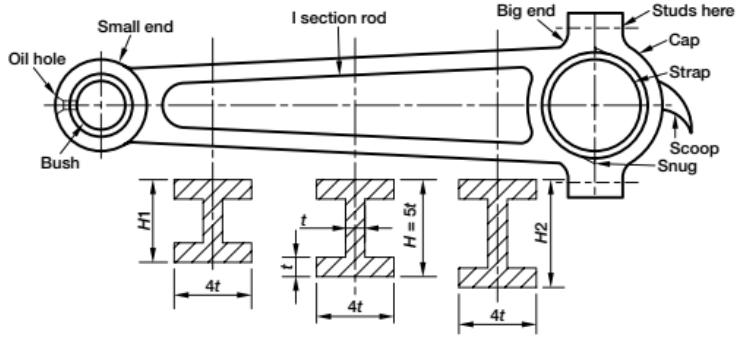
tersebut didapat kekuatan tarik semakin menurun seiring peningkatan temperatur penuangan. Hal ini disebabkan adanya peningkatan udara yang terjebak di dalam coran, sehingga menimbulkan porositas. Menurut (Li and Zhou 2020) peningkatan temperatur penuangan dapat meningkatkan jumlah udara yang terperangkap di dalam logam cair. Udara yang tidak bisa keluar dari logam cair akan terperangkap ketika logam membeku sehingga menyebabkan porositas. Porositas ini dapat menyebabkan menurunya sifat-sifat mekanik produk cor.

2.2 Teori Dasar *Connecting Rod*

Connecting rod adalah salah satu komponen pada mesin pembakaran dalam (*internal Combustion Engine)*, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1. 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* (Benara Connect Bearing 4312-Fits Renault Duster 2019)

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 Konstruksi *connecting rod* (A. Singh 2017)

2.2.1 Pengaruh Gaya Piston pada *Connecting Rod*

Hasil pemampatan campuran gas dan bahan bakar menghasilkan gaya dorong pada menurut Persamaan 2.1.

$F = \frac{\pi}{4} D^2 \mathrm{P}$ .....(2.1)

Dimana, $\frac{\pi}{4} D^2$ adalah luas permukaan bagian atas piston dan P adalah tekanan yang dihasilkan bahan bakar. Tekanan yang dihasilkan bahan bakar bisa dicari menggunakan persamaan gas umum (Persamaan 2.2) yaitu

$PV = mR_{specific}T$ .....(2.2)

Dimana, V adalah volume ruang bakar (biasanya disebut cc mesin), m adalah massa bahan bakar, $R_{specific}$ adalah konstanta

gas umum dibagi dengan massa jenis bahan bakar pada temperatur (satuan internasional dalam mengetahui mass jenis bahan bakar minyak), dan T adalah *ignition temperature*

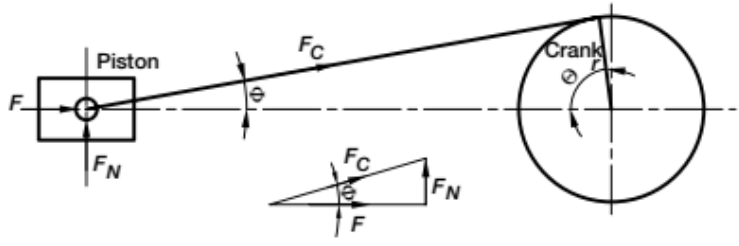
Gaya piston dipengaruhi oleh dua gaya yaitu gaya inersia dari *crankshaft* dan gaya dorong hasil pembakaran. Gaya inersia bisa bernilai positif dan negatif. Ketika searah dengan gaya dorong maka nilainya positif begitu juga sebaliknya. Putaran *crankshaft* menghasilkan percepatan inersia yang menghasilkan gaya inersia. Percepatan sudut diperoleh dengan Persamaan 2.3

$$\alpha = \omega^2 r \left(\cos\theta + \frac{\cos 2\theta}{n}\right) \quad (2.3)$$

Dimana ω adalah kecepatan sudut, θ adalah sudut yang dibentuk antara lengan connecting rod dengan jarak pusat *crankshaft* ke piston pin seperti pada Gambar 2.3. r adalah jari-jari dari *crankshaft* dan n adalah rasio panjang *connecting rod* dengan jari-jari *crankshaft*. Maka gaya inersia adalah perkalian massa dengan percepatan sudut ditulis seperti Persamaan 2.4.

$$F_i = m \times \alpha \quad (2.4)$$

Dengan m adalah massa bahan bakar di atas piston. Massa bahan bakar sama dengan massa pada perhitungan persamaan gas umum di atas. Sehingga gaya yang bekerja pada piston adalah resultan antara gaya dorong hasil pembakaran dengan gaya inersia. (A. Singh 2017)



Gambar 2.3 Gaya yang bekerja pada sistem piston (A. Singh 2017)

2.2.2 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 2.5

$F = d_p l_p p_{bp}$ .....(2.5)

Dimana d_p adalah diameter *gudgeon pin*, F adalah gaya hasil pembakaran dalam satuan kgf, 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* dikali dengan konstanta yang bernilai 1,1 sampai 1,25, sedangkan diameter luar *small end* adalah diameter *gudgeon pin* dikali dengan konstanta yang bernilai 1,25 sampai 1,65. Untuk tinggi dari small end yaitu diameter *bore* dikali dengan konstanta yang bernilai 0,3 sampai 0,45. Kemudian untuk menghitung dimensi *big end*, terlebih dahulu mengetahui diameter *crank pin* dengan cara mengalikan diameter *bore* dengan konstanta yang bernilai 0,55 sampai 0,75. Hasil dari diameter *crank pin* dapat digunakan untuk mencari diameter dalam *big end* dengan cara mengalikan dengan konstanta yang bernilai 1,1 sampai 1,25. Sedangkan untuk diameter luar *big end* dikalikan dengan konstanta yang bernilai 1,25 sampai 1,65. Untuk tinggi dari *big end* dapat dicari dari perkalian diameter *crank pin* dengan konstanta yang bernilai 0,45 sampai 1.

Untuk *I section* yang diperlukan adalah mencari nilai t. Mula-mula adalah mencari momen inersia dari *I section* menggunakan Persamaan 2.6.

$I = \frac{1}{12}[\{4t \times (5t)^3\} - \{3t \times (3t)^3\}]$ .....(2.6)

Dari momen inersia dapat diketahui radius girasi yaitu ukuran distribusi massa yang disimbolkan huruf k sesuai Persamaan 2.7.

$k = \sqrt{\frac{I}{A}}$ .....(2.7)

Radius girasi ini dimasukkan dalam Persamaan rankine 2.8 untuk mendapatkan nilai t.

$F_p = \frac{\sigma_c A}{1 + a\left(\frac{1}{k}\right)^2}$ .....(2.8)

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 2.9.

$$\frac{\sigma_c}{\pi^2 E} \quad (2.9)$$

Dimana E adalah modulus elastisitas material. (A. Singh 2017)

2.3 Aluminium

Secara mudah aluminium dibagi menjadi dua katogori utama, yaitu komposisi pengecoran dan penempaan. Perbedaan lebih lanjut untuk setiap kategori berdasarkan mekanisme primer dalam perkembangan sifat. Banyak paduan menanggapi perlakuan panas berdasarkan kelarutan fasa. Perlakuan tersebut termasuk perlakuan panas larutan, pendinginan cepat, dan presipitasi, atau *age hardening*. Untuk paduan pengecoran ataupun penempaan, beberapa paduan dicirikan sebagai mampu laku panas. Kebanyakan komposisi penempaan lainnya tidak mengandalkan pengerasan kerja melalui pengurangan mekanik, namun biasanya adalah gabungan dengan berbagai prosedur pendinginan lambat untuk perkembangan sifat. Paduan-paduan tersebut mengacu sebagai pengerasan kerja. Beberapa paduan pengecoran pada dasarnya tidak mampu laku panas dan digunakan hanya sebagai pengecoran atau perubahan kondisi panas yang tidak berhubungan dengan efek larutan atau presipitasi.

Tata nama paduan pengecoran dan penempaan telah dikembangkan. Sistem asosiasi aluminium adalah yang paling banyak diakui di Amerika. Sistem identifikasi paduan menggunakan tata nama yang berbeda antara paduan penempaan dan pengecoran. Untuk paduan penempaan digunakan sistem empat digit untuk mendaftar keluarga komposisi penempaan sebagai berikut:

1. 1xxx, dibatasi komposisi bukan paduan (murni)

2. 2xxx, paduan dengan tembaga adalah unsur paduan utama, meskipun unsur lain bisa jadi dispsifikkan, terutama magnesium.
3. 3xxx, paduan dengan mangan adalah unsur paduan utama
4. 4xxx, paduan dengan silikon adalah unsur paduan utama
5. 5xxx, paduan dengan magnesium adalah unsur paduan utama
6. 6xxx, paduan dengan magnesium dan silikon adalah unsur paduan utama
7. 7xxx, paduan dengan seng adalah unsur paduan utama, tetapi elemen lain seperti tembaga, magnesium, kromium, dan zirkonium bisa jadi dispesifikasikan.
8. 8xxx, paduan yang terdapat komposisi timah dan litium sebagai komposisi lain-lain.
9. 9xxx, paduan untuk penggunaan di masa depan.

Komposisi pengecoran dideskripsikan dengan sistem tiga digit diikuti oleh nilai desimal. Desimal .0 dalam semua kasus berkaitan untuk batas paduan pengecoran. Desimal .1, dan .2 mengenai komposisi ingot, dimana setelah meleleh dan diproses harus menghasilkan kondisi kimia yang sesuai dengan permintaan spesifikasi pengecoran. Keluarga paduan untuk komposisi pengecoran adalah:

1. 1xx.x ditempati komposisi bukan paduan (murni), terutama untuk manufaktur rotor
2. 2xx.x paduan dimana tembaga adalah unsur paduan utama, tetapi unsur paduan lain bisa jadi dispesifikkan
3. 3xx.x paduan dimana silikon adalah unsur paduan utama, tetapi unsur paduan lain seperti tembaga dan magnesium bisa jadi dispesifikkan
4. 4xx.x paduan dimana silikon adalah unsur paduan utama
5. 5xx.x paduan dimana magnesium adalah unsur paduan utama
6. 6xx.x tidak digunakan
7. 7xx.x paduan dimana seng adalah unsur paduan utama, tetapi unsur paduan lain seperti tembaga dan magnesium bisa jadi dispesifikkan
8. 8xx.x paduan dimana timah adalah unsur paduan utama
9. 9xx.x tidak digunakan

2.3.1 Diagram Fasa Al-Zn

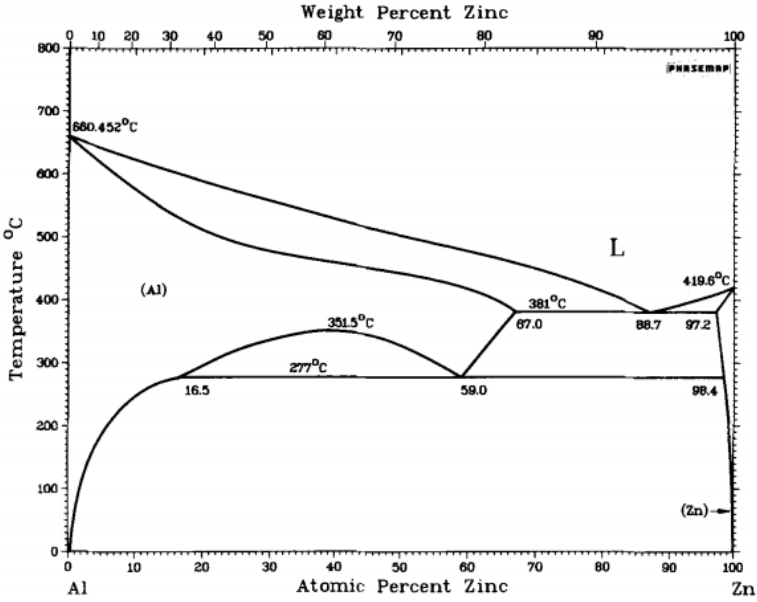
Fasa tunggal larutan padat FCC (Al) mempunyai rentang komposisi yang panjang. Larutan padat (Al) bisa dinyatakan α atau α' untuk membedakan antara komposisi yang kaya Al dan Zn secara berurutan. Garis likuidus dan solidus (Al) turun ke ekuilibrium eutektik dengan komposisi fasa (Zn) pada 381°C, dan pada 277°C sebuah ekuilibrium eutektoid (monotektoid) dari α, α', dan (Zn) terjadi. Ekuilibrium tiga fasa dan perubahan logam murni yang mendefinisikan topologi diagram dirangkum dalam Tabel 2.2. (Murray 1983)

Tabel 2.2 Titik tertentu pada diagram fasa Al-Zn (Murray 1983)

Fasa	Komposisi Zn (%)	Temp. (°C)	Jenis
$L \rightleftarrows (\alpha' Al) + (Zn)$	67, 88.7, 97.2	381	Eutektik
$(\alpha' Al) \rightleftarrows (\alpha Al) + (Zn)$	16.5, 59, 98.4	277	Eutektoid
$(Al) \rightleftarrows (\alpha Al) + (Zn)$	39.5	351.5	Kritis
$L \rightleftarrows (Al)$	0	660.452	Kritis
$L \rightleftarrows (Zn)$	100	419.58	Kongruen

Kurva likuidus, solidus, dan solvus telah ditentukan dengan baik pada Gambar 2.4. Aluminium meleleh pada 660,45°C dan Zn pada 419,6°C. Diagram fasa dari jenis eutektik, temperatur eutektik dan komposisi adalah $381 \pm 1°C$ dan $88{,}7 \pm 0{,}2\%$ Zn. Rentang temperatur eutektik yang diberikan dari 380,5°C sampai 382°C; rentang komposisi eutektik yang ditentukan dari 88,5 sampai 89,5% Zn. Solidus (Al) memotong horisontal eutektik pada 381°C $67 \pm 1\%$ Zn. Perubahan komposisi pada sekitar 35% Zn terjadi pada rentang temperatur kecil selama solidifikasi (pembekuan). Paduan pada rentang komposisi 30 sampai 50% (terutama pada 38,2% Zn) sulit untuk dilakukan homogenisasi. Kelarutan Zn di dalam Al meningkat dari 2,2% pada 110°C ke 16,5% pada temperatur eutektoid. Di atas 277°C kelarutan meningkat dari $59 \pm 1\%$ Zn pada 277°C ke $67 \pm 1\%$ Zn pada temperatur eutektik. Kelarutan maksimum Al di dalam (Zn) adalah

2,8 ± 0,2% (97,2% Zn) pada temperatur eutektik, menurun ke 1,6% (98,4% Zn) pada 277°C dan 0,07 (99,93 Zn) pada 20°C. (Murray 1983)



Gambar 2.4 Diagram fasa Al-Zn (Murray 1983)

2.3.2 Aluminium 7075

Aluminium 7075 termasuk ke dalam paduan aluminium seri 7xxx dimana paduan utamanya adalah seng. Unsur lain yang bisa saja ditambahkan pada paduan seri ini adalah tembaga, magnesium, krom, dan zirkonium. Aluminium seri 7xxx biasanya digunakan pada struktur pesawat terbang, komponen mesin-mesin bergerak, dan komponen lain yang membutuhkan kekuatan tinggi. Namun semakin tinggi kekuatan aluminium seri 7xxx akan menurunkan ketahanan terhadap korosi tegangan. (ASM International 1990). Sifat Aluminium 7075 ditunjukkan pada Tabel 2.3, 2.4, dan 2.5

Tabel 2.3 Komposisi alumunium 7075 (ASM International 1990)

Unsur	***% berat***
Si	Maksimum 0,4
Fe	Maksimum 0,5
Cu	1,2-2
Mn	Maksimum 0,3
Mg	2,1-2,9
Cr	0,18-0,28
Zn	5,1-6,1
Ti	Maksimum 0,2
Unsur lain	Maksimum 0,15 dengan masing-masing 0,5

Tabel 2.4 Sifat mekanik alumunium 7075 (ASM International 1990)

Sifat mekanik	***Nilai***
Ultimate tensile strength	570 MPa
Tensile yield strength	505 MPa
Elongation (panjang awal 50 mm)	11%
Kekerasan, brinnel	150 HB
Ultimate shearing strength	330 MPa
Fatigue endurance limit	160 MPa
Modulus elastisitas	72 GPa

Tabel 2.5 Sifat fisik aluminium 7075 (ASM International 1990)

Sifat fisik	***Nilai***
Koefisien muai termal	23.6 μm/m℃
Melting range	475℃-635℃
Konduktivitas termal (pada 25℃)	130 W/m℃
Tahanan listrik (pada 20℃)	0,0515 $\Omega.mm^2$/m
Massa jenis (pada 20℃)	2,81 g/cm^3
Specific heat (pada 100℃)	960 J/kg.K

2.4 Sistem Saluran (*Gating System*)

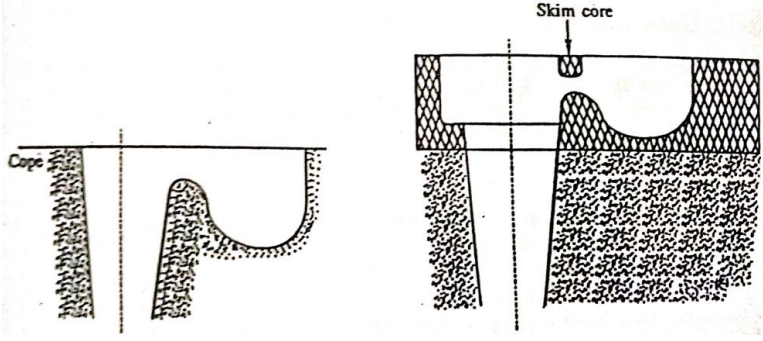
Sistem saluran adalah adalah semua bagian yang dilewati oleh logam cair dari *laddle* sampai rongga cetakan. Bagian-bagian ini di antaranya adalah cawan tuang (*pouring basin*), saluran turun (*sprue*), *spure base well*, saluran pengalir (*runner*), *ingate*, penambah (*riser*). Untuk meminimalisir 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. (P. Rao 2013)

2.4.1 Cawan Tuang (*Pouring Basin*)

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. *Pouring basin* juga dapat menangkap *slag* (pengotor dalam

logam cair) yang mengapung dengan adanya *skim core* seperti pada Gambar 2.5. *Pouring basin* harus selalu penuh selama proses penuangan logam cair sehingga dapat menghindari gejolak cairan yang dapat menimbulkan gas-gas dalam logam cair. Dinding *pouring basin* 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)

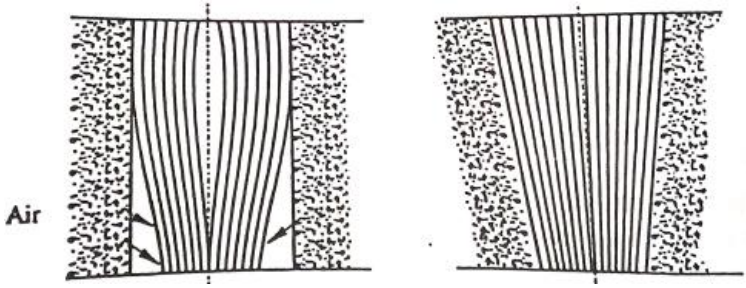


Gambar 2.5 *Pouring basin* dengan dan tanpa *slag trap* (P. Rao 2013)

2.4.2 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 2.6 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)



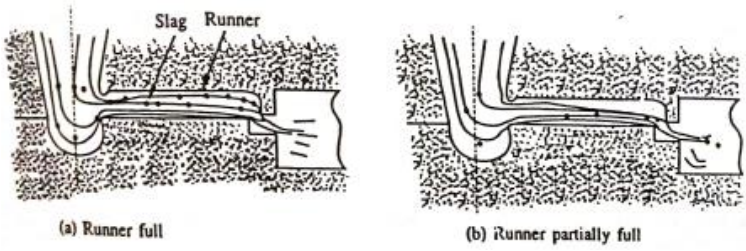
Gambar 2.6 *Sprue* dengan bentuk lurus dan mempunyai sudut kemiringan (P. Rao 2013)

2.4.3 *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)

2.4.4 *Runner*

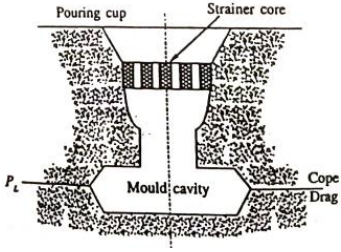
Runner secara umum terletak pada *parting line* yang berfungsi menghubungkan *sprue base well* menuju *ingate*. Secara umum potongan melintang *runner* berbentuk trapesium. Sebagian besar *runner* terletak pada *cope* dan *ingate* terletak pada *drag*. Hal ini dimaksudkan untuk menangkap *slag* (pengotor 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 2.7. (P. Rao 2013)



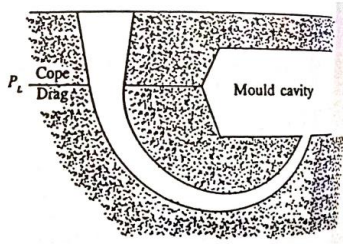
Gambar 2.7 Perbedaan ketika *runner* penuh terisi dengan yang hanya sebagian terisi (P. Rao 2013)

2.4.5 *Ingate*

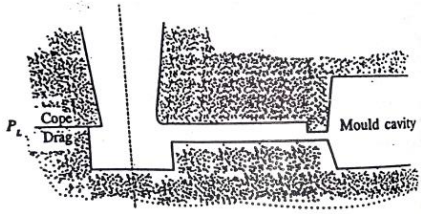
Ingate adalah tempat masuknya logam cair dari *runner* ke dalam rongga cetakan. Bentuk dari *ingate* harus bisa memudahkan pelepasan *gating system* dari produk cor. Jenis *ingate* yang paling banyak digunakan dalam pengecoran pasir adalah *parting gate*. Pada *ingate* jenis ini, logam cair masuk ke 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 2.8. 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 2.8 Jenis-jenis *ingate* (P. Rao 2013)

2.5 Desain Gating sistem

Gating sistem pengecoran secara umum terdiri dari *sprue* (saluran turun), *pouring basin* (cawan tuang), *runner*, *ingate*, dan *riser* (penambah). Dalam menentukan dimensi gating sistem tersebut perlu dihitung dahulu adalah waktu tuang. Waktu penuangan tergantung material coran, ketebalan benda coran. Variasi dari hubungan tersebut tidak diperoleh dari teori tapi dari percobaan di beberapa industri dan percobaan. Untuk pengecoran pasir kecepatan penuangan beberapa material dituliskan dalam Tabel 2.6 (P. Rao 2013)

Tabel 2.6 Kecepatan tuang untuk pengecoran pasir (P. Rao 2013)

Material	***Kecepatan tuang kg/s untuk massa coran, 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

Setelah menghitung waktu optimum tempetaratur penuangan, selanjutnya menghitung *choke area*. *Choke area* terdapat di bawah *sprue* dan sebagai elemen pertama yang didesain dalam gating sistem. *Choke area* dapat dihitung menggunakan Persamaan Bernoulli 2.9.

$$A = \frac{W}{d\ t\ C\ \sqrt{2\ g\ H}} \quad (2.9)$$

Dimana, A adalah *choke area*, W adalah massa benda cor, t adalah waktu tuang yang diperoleh dari massa benda cor dibagi dengan kecepatan tuang, d adalah massa jenis logam, g adalah percepatan gravitasi, H adalah tinggi efektif sprue yang dapat dilihat pada Gambar 2.8, dan C adalah faktor efisiensi sesuai dengan geometri *runner*.

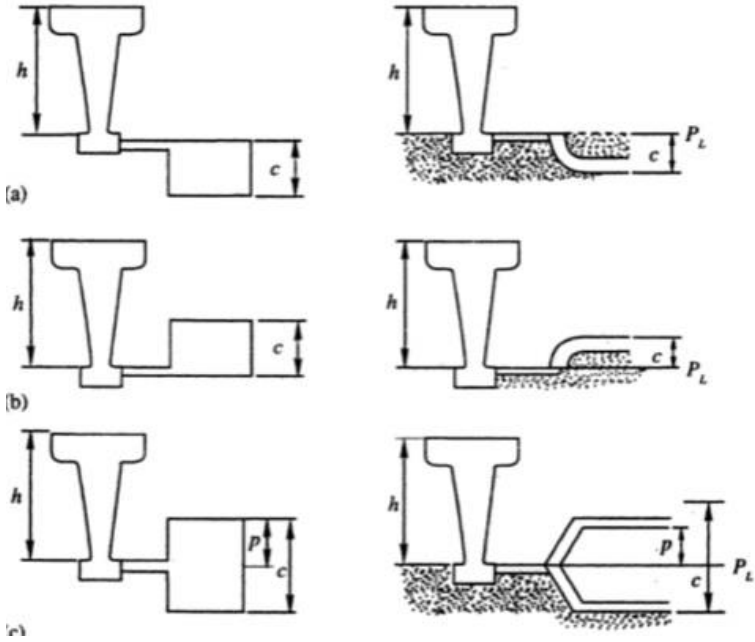
Tinggi efektif *sprue* H, dari cetakan tergantung dimensi cetakan dan tipe *parting line* yang digunakan sesuai dengan Persamaan 2.10, 2.11, 2.12. Untuk tipe masing-masing *parting line* ditunjukkan pada Gambar 2.4

Top Gate, $H = h$ ..... (2.10)

Bottom Gate, $H = h - \frac{c}{2}$ ..... (2.11)

Parting Gate, $H = h - \frac{p^2}{2c}$ ..... (2.12)

Dimana, h adalah tinggi *sprue* yang dapat dilihat pada Gambar 2.9, p adalah tinggi rongga cetakan di atas *parting line* (cope), dan c adalah tinggi total rongga dari bawah *parting line* sampai di atas *parting line*.



Gambar 2.9 Perbedaan *top gate, bottom gate,* dan *parting gate* (P. Rao 2013)

Faktor efisiensi adalah faktor yang bergantung pada bentuk *runner* yang digunakan. Nilai faktor efisiensi dapa dilihat pada Tabel 2.7.

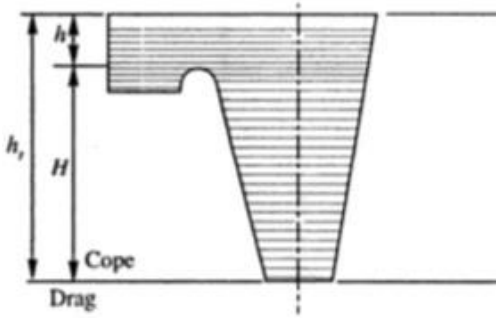
Tabel 2.7 Nilai faktor efisiensi dengan beberapa tipe *runner* (P. Rao 2013)

Tipe runner	***Sprue dengan kemiringan***	***Sprue lurus***
Runner tunggal	0,9	0,73
Dua runner dengan banyak ingate (tanpa belokan)	0,9	0,73
Dua runner dengan banyak ingate (belokan 90º)	0,85	0,7

Setelah mendapatkan luas penampang *choke*, lalu bisa dihitung luas penampang *sprue* bagian atas atau *top area* menggunakan Persamaan 2.13.

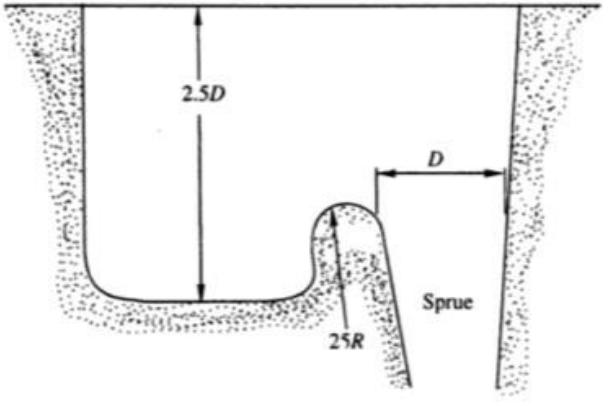
$$A_t = A_c\sqrt{\frac{h_t}{h}} \tag{2.13}$$

Dimana, dimensi h pada persamaan di atas seperti diilustrasikan pada Gambar 2.10. h_t adalah tinggi total yaitu H ditambah h.



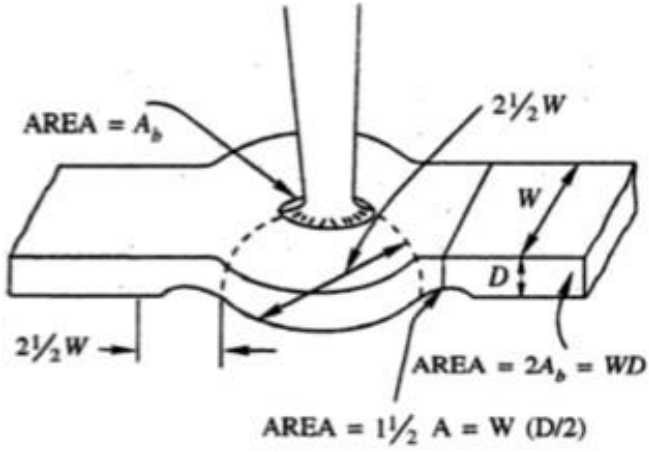
Gambar 2.10 Dimensi tinggi *sprue* (P. Rao 2013)

Kemudian dapat dicari dimensi *pouring basin* seperti pada gambar 2.11



Gambar 2.11 Dimensi *pouring basin* (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 2.12.



Gambar 2.12 Dimensi dari *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 2.8.

Tabel 2.8 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

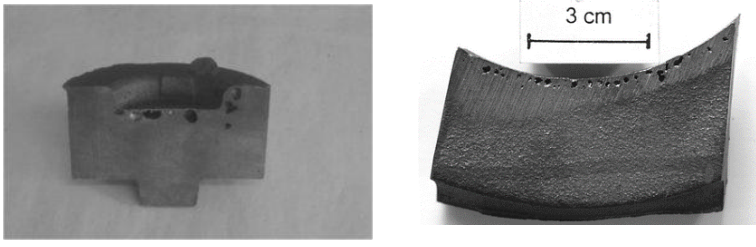
Setelah menentukan rasio antara ketiga komponen tersebut, maka diketahui luas penampang *runner*. Penampang *ingate* secara umum mempunyai lebar lebih besar daripada tinggi denga rasio maksimum adalah 4.

2.6 Cacat Pengecoran Akibat Aliran Logam

Terdapat dua jenis cacat pengecoran akibat aliran logam yaitu cacat gas dan cacat akibat penuangan. Cacat gas dibedakan lagi menjadi dua yaitu *air inclusions* dan *pin hole porosity*. Sedangkan cacat akibat penuangan terdapat tiga jenis yaitu *mis-runs*, *cold shuts*, dan *slag inclusions*. (P. Rao 2013)

2.6.1 Cacat Gas

Air inclusions terbentuk akibat udara atmosfer dan gas lainnya ikut terbawa pada saat proses penuangan logam cair ke dalam cetakan. Tingginya temperatur penuangan dapat meningkatkan kemampuan aliran logam dalam mengabsorbsi udara, sedangkan bentuk *sprue* lurus, dan banyaknya lekukan tajam pada sistem saluran *unpressurised casting* memudahkan udara terikat ke dalam logam cair. *Pin hole porosity* terbentuk akibat adanya hidrogen terlarut di dalam logam cair. Pendinginan pada logam dapat menurunkan kelarutan terhadap hidrogen sehingga hidrogen akan keluar seiring logam membeku. Untuk contoh cacat gas dapat dilihat pada Gambar 2.13. (P. Rao 2013)

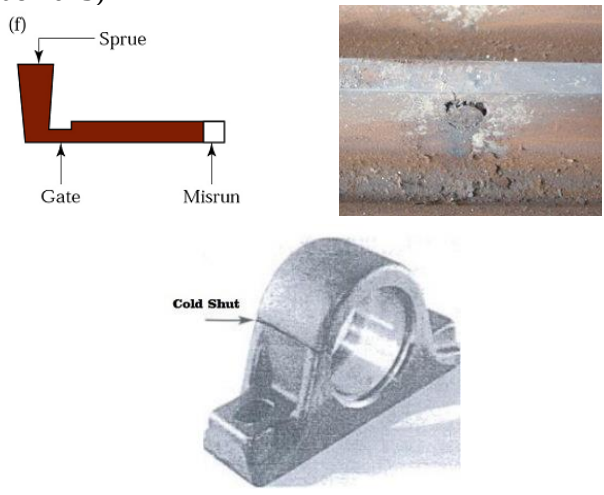


Gambar 2.13 Contoh cacat gas yaitu *air inclusions* dan *pin hole porosity* (Murthi 2018)

2.6.2 Cacat Akibat Penuangan

Mis-runs terbentuk akibat dari aliran logam tidak mampu memenuhi seluruh rongga cetakan. Hal ini dapat disebabkan oleh fluiditas, temperatur penuangan, laju aliran rendah, dan ketebalan coran yang kecil akibat dari benda cor dan sistem saluran yang kompleks. Untuk mengatasi jenis cacat ini dilakukan dengan

meningkatkan fluiditas. Peningkatan fluiditas dapat dicapai dengan menyesuaikan komposisi dan meningkatkan termperatur penuangan. *Cold shuts* terbentuk ketika ada dua aliran yang bertemu dan tidak bisa menyatu sehingga menyebabkan diskontinuitas. Pada daerah diskontinuitas ini akan memiliki kekuatan yang rendah sehingga berpotensi sebagai awal timbulnya retakan. Dua aliran bisa bertemu ketika terdapat lekukan tajam, sehingga aliran bisa terguncang pada daerah ini. *Slag inclusions* terbentuk akibat dari terperangkapnya slag yang ikut masuk ke dalam aliran logam. Jenis cacat ini bisa dihindari dengan cara sistem penangkapan slag pada *pouring basin* dan *runner*. Untuk contoh cacat akibat penuangan ini dapat dilihat pada Gambar 2.14 (P. Rao 2013)



Gambar 2.14 Contoh cacat akibat penuangan yaitu *mis-runs*, *cold shuts*, dan *slag inclusions* (Murthi 2018)

2.7 Konsep Dinamika Fluida Dalam Pengecoran

Perilaku logam cair selama pengisian cetakan dapat dideskripsikan dengan menerapkan hukum dinamika fluida. Yang termasuk dalam fluida adalah material cair (*liquid*) dan material

gas. Pada keadaan cair, logam berperilaku seperti air. Molekul di dalam *liquid* tidak membentuk struktur kristal, sehingga dapat berpindah-pindah secara mudah. Perilaku ini membedakan fluida dengan material padat. Di sisi lain, molekul-molekul *liquid* berada saling berdekatan dan menimbulkan gaya tarik menarik sehingga cukup sulit untuk dipisahkan. Hal ini juga menyebabkan *liquid* sulit untuk dikenai tekanan agar volumenya lebih kecil. Oleh karena itu, *liquid* tergolong sebagai material *incompressible*. Sedangkan yang termasuk material *compressible* adalah gas. Sifat *incompresiible* ini membuat persamaan menjadi lebih sederhana.

Perilaku aliran *liquid* dikarakterisasi dari tekanan, massa jenis, temperatur, dan kecepatan. Massa jenis, U, adalah sejumlah massa yang didefinisikan oleh banyaknya molekul per satuan volume *liquid*. Sifat *incompressibility* menunjukkan bahwa massa jenis memiliki nilai konstan. Dengan kata lain, tidak peduli apakah *liquid* mengalami peregangan, pergeseran, atau penekanan, jumlah molekul per volume memiliki konstan, walaupun ada beberapa molekul yang keluar dan masuk pada volume tersebut. (Reikher and Barkhudarov 2007)

2.7.1 Tekanan

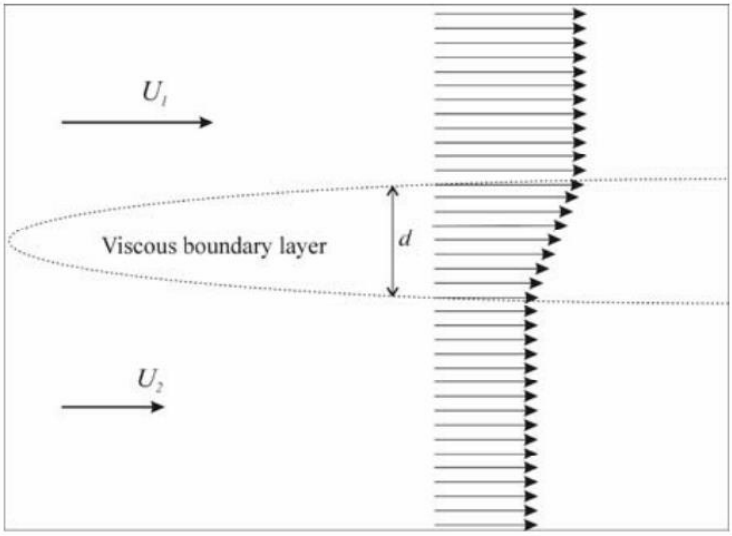
Ketahanan *liquid* terhadap gaya tekan dicirikan dengan tekanan. Dibutuhkan tekanan yang besar untuk menekan fluida sebesar 1% dari volume awalnya. Dalam banyak keadaan, seperti pengecoran metode *high pressure die casting*, tekanannya belum cukup untuk mengubah volume *liquid* dengan jelas. Tekanan adalah salah satu parameter yang mengendalikan aliran *liquid*. Hal tersebut berhubungan dengan kemampuan molekul menyalurkan momentum dari gerakan acak kepada molekul lain yang berdekatan melalui tumbukan. Karena gerakan acak ini terjadi pada segala arah, maka tekanan pada *liquid* juga terjadi di segala arah. Tetapi ketika molekul pada satu bagian *liquid* menyalurkan momentum lebih besar daripada bagian lain yang berdekatan, maka muncul gaya makro pada daerah tersebut. Gaya ini disebut sebagai gradien tekanan, yaitu selisih tekanan antara dua lokasi pada *liquid* dibagi dengan jarak antara lokasi tersebut. Ketika

tekanan adalah fungsi tiga deimensi koordinat x, y, dan z, maka gradien tekanan pada setiap titik *liquid* adalah vektor yang didefinisikan sebagai Persamaan 2.14. (Reikher and Barkhudarov 2007)

$$\nabla P = \left(\frac{\partial P}{\partial x}, \frac{\partial P}{\partial y}, \frac{\partial P}{\partial z}\right) \quad (2.14)$$

2.7.2 Viskositas

Sebagai obyek bergerak, *liquid* mengalami gaya tambahan yang disebabkan oleh adanya gesekan. Gaya gesek juga muncul dari tumbukan antar molekul *liquid* yang bergerak dengan kecepatan berbeda. Tumbukan tersebut menyalurkan momentum dari daerah dengan aliran cepat ke daerah yang lebih lambat, sehingga memberikan gaya gesek. Gaya ini mempunyai arah berlawanan dengan arah aliran, sehingga menyerap energi dari aliran dan menghasilkan panas. Sebagai contoh, ketika dua aliran *liquid* sejajar bergerak pada kecepatan yang berbeda dan saling bersinggungan, aliran yang lebih cepat akan melambat dan aliran yang lambat akan bertambah cepat. Sebagai hasilnya, batas antara dua aliran tersebut melebar seiring berjalannya waktu sehingga terbentuk *viscous boundary layer* atau daerah transisi kecepatan aliran. Daerah transisi aliran ini diilustrasikan pada Gambar 2.15. Ini menunjukkan bahwa ketika dua lapisan *liquid* saling menyalurkan momentum, maka energi kinetik aliran menurun.



Gambar 2.15 Ilustrasi dua aliran sejajar mengalir dengan kecepatan yang berbeda (Reikher and Barkhudarov 2007)

Sifat gesekan *liquid* dideskripsikan dengan sebuah variabel yang dinamakan koefisien viskositas dinamis, μ, dan gaya tersebut dinamakan *viscous force* atau *viscous stress*. *Liquid* dengan koefisien viskositas dinamis besar menghasilkan gaya *viscous* lebih besar, begitu juga sebaliknya. Selain itu, perbedaan percepatan yang besar menghasilkan kecepatan *tranfer* momentum tinggi karenanya lebih banyak *viscous friction*. Jarak antara dua daerah *liquid* memberikan pengaruh, yaitu semakin dekat jaraknya, semakin cepat *transfer* momentum yang terjadi. Berdasarkan observasi tersebut, gaya gesek *viscous*, F_{fr} terjadi antara dua aliran *liquid* dapat diestimasi melalui Persamaan 2.15.

$$F_{fr} = A\mu \frac{U_1 - U_2}{d} \quad (2.15)$$

Dimana A adalah area kontak antara aliran, U_1 dan U_2 adalah kecepatan rata-rata dari dua aliran, dan d adalah jarak di antara dua aliran tersebut. Pada bentuk ini, F_{fr} adalah gaya yang terjadi pada *liquid* U_2. Untuk aliran *liquid* U_1 tanda gaya adalah sebaliknya.

Pada bentuk diferensial, ruas kanan persamaan 2.15 dapat dituliskan per satuan area kontak sebagai Persamaan 2.16.

$$\frac{F_{fr}}{A} = \mu \frac{\partial U}{\partial z} \quad (2.16)$$

Dimana z adalah koordinat sumbu normal terhadap arah aliran. Persamaan pada ruas kanan disebut tegangan geser.

Sebagai catatan, bahwa tegangan *viscous* menjadi nol dalam aliran seragam karena ruas kanan persamaan 2.16 hilang ketika tidak ada variasi kecepatan. Akan tetapi sulit untuk mendapatkan aliran seragam dalam situasi sebenarnya dimana *liquid* selalu dibatasi oleh sebuah dinding sebagai mediumnya. Molekul *liquid* bertabrakan dengan dindingnya dan memantul kembali. Permukaan material memiliki kekasaran yang jauh melebihi ukuran dari molekul *liquid*. Bahkan permukaan logam dengan *finishing* yang tinggi hanya mampu memiliki kekasaran lebih dari 10 nm. Nilai ini masih 100 kali lebih besar daripada molekul *liquid*. Teknik *finishing* yang biasa menghasilkan kekasaran senilai 100 sampai 50.000 nm (0,1 μm sampai 50 μm). Setelah beberapa tumbukan, molekul *liquid* seperti kehilangan semua informasi yang datang sebelum menabrak dinding. Ketika molekul tersebut kembali ke dalam aliran, komponen momentum normal terhadap dinding masih dipertahankan, tetapi arah dari komponen tangensial menjadi sangat acak. Pada istilah makro, perilaku ini dinyatakan dengan dalam bentuk kondisi batas *no-slip*. Artinya bahwa komponen kecepatan *liquid* tangensial terhadap permukaan dinding batas menjadi sama dengan nol.

Kondisi batas *no-slip* berarti bahwa gesekan, atau tegangan geser *viscous*, selalu ada pada aliran dekat dinding. Dalam hubungannya dengan gradien tekanan, kondisi batas ini adalah salah satu faktor utama yang mengendalikan aliran. Oleh karena itu terdapat *viscous boundary layer* pada daerah dekat dinding. Lapisan adalah tempat terjadinya transisi aliran dari kecepatan nol pada permukaan menjadi aliran yang memiliki nilai pada bagian tengah. Bahkan kekasaran permukaan yang besar dapat lebih banyak meniadakan kecepatan aliran *liquid*. Molekul *liquid* dapat dibelokkan, diarahkan, atau ditangkap oleh kontur kekasaran

dinding. Hal ini dapat menghasilkan turubulensi dalam aliran. Turbulensi didefinisikan sebagai bentuk aliran tidak stabil, yaitu ketika gerakan terjadi bolak-balik, secara acak, dan tidak teratur. Gerakan acak berskala lebih besar daripada gerakan molekul. Pada gerakan ini terjadi *transfer* momentum yang lebih banyak antara bagian yang berbeda dari fluida sehingga menghasilkan gesekan lebih banyak. (Reikher and Barkhudarov 2007)

2.7.3 Temperatur dan Entalpi

Keadaan termal dari *liquid* selalu dipresentasikan dengan temperatur, T, yaitu ukuran energi kinetik yang dihasilkan oleh gerakan semrawut molekul. Energi panas jenis, I, bernilai sebanding dengan temperatur pada Persamaan 2.17.

$I = C_v T$ .....(2.17)

Dengan koefisien kesebandingan C_v, disebut kapasitas panas pada volume konstan. Besaran ini berarti sejumlah panas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur dari sebuah massa sebesar 1°. Tanda 'v' kecil menunjukkan volume fluida dijaga konstan selama kenaikan temperatur tersebut. Klarifikasi ini diperlukan untuk gas yang *compressible*, yaitu ketika gas mengalami ekspansi selama pemanasan, maka dibutuhkan energi lebih untuk menaikkan termperaturnya. Untuk *liquid* yang *incompressible*, notasi 'v' tidak begitu penting. Yang artinya nilai dari panas jenis pada volume konstan hampir sama dengan nilai panas jenis pada tekanan konstan, C_p. Dalam penerapannya, pada *liquid* lebih mudah mengukur C_p dengan menjaga specimen pada tekanan atmosfer selama pengukuran, sedangkan untuk gas ditempatkan pada volume yang tetap sehingga memudahkan mengukur C_v.

C_p digunakan untuk menghitung satuan penting lainnya yaitu entalpi, E, sesuai Persamaan 2.18.

$E = C_p T + L(1 - f_s)$ .....(2.18)

Bagian kedua dari ruas kanan menunjukkan pelepasan energi panas selama solidifikasi. Molekul *liquid* memiliki kebebasan untuk berpindah daripada fase padat. Seiring logam mendingin dan

melewati fase cair ke padat, kelebihan energi dilepaskan dalam bentuk panas laten. Fraksi padat, f_s, adalah fraksi massa dari fasa yang membeku dalam jumlah logam tertentu. Selama pendinginan, nilainya berubah dari 0 ketika berwujud cair sepenuhnya dan menjadi 1 ketika memadat sepenuhnya. Salah satu mekanisme pertukaran energi panas di dalam *liquid* adalah konduksi panas. Karena molekul saling menumbuk dengan lainnya, mereka menyalurkan momentum, yang sebanding dengan tekanan dan gaya *viscous*, dan juga energi kinetik dari gerakan semrawutan mereka. Akibatnya, perbedaan temperatur dalam suatu volume *liquid* menghilang seiring waktu, menghasilkan temperatur distribusi merata. Kecepatan pertukaran panas oleh konduksi dideskripsikan oleh koefisien konduksi panas, k. *Heat flux*, q di antara dua daerah *liquid* bertemperatur T_1 dan T_2 dipisahkan oleh jarak d kemudian dihitung sebagai Persamaan 2.19.

$$q = k\frac{T_2 - T_1}{d} \quad \text{.....} (2.19)$$

Bentuk diferensial persamaan 2.19 yaitu pada Persamaan 2.20

$$q = k\frac{\partial t}{\partial x} \quad \text{.....} (2.20)$$

Persamaan 2.20 adalah hukum *Fourier* yang menyatakan bahwa *heat flux* oleh konduksi panas adalah sebanding dengan gradien temperatur. Sebagai catatan, bahwa persamaan 2.20 sama dengan persamaan 2.16 untuk *viscous dissipation of momentum*. (Reikher and Barkhudarov 2007)

2.7.4 Persamaan Aliran *Liquid*

Gradien tekanan dan gaya *viscous* adalah gaya internal utama yang ada pada fluida. Gaya eksternal dapat termasuk gravitasi, gaya listrik, gaya magnet, dan lain-lain. Sesuai hukum kedua Newton, penjumlahan dari semua gaya menghasilkan percepatan *liquid*, yang berbanding terbalik terhadap massa atau massa jenis. Hal ini dapat ditunjukkan dalam bentuk persamaan Navier-Stokes, yang digunakan untuk *liquid* sebagai material *incompressible* dapat ditulis pada Persamaan 2.21.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) + G_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) + G_y$$
$$\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) + G_z$$
.....(2.21)

Pada Persamaan 2.21, u, v , dan w adalah tiga komponen vektor kecepatan U pada titik di dalam *liquid*. G adalah gaya eksternal, yang diasumsikan hanya berupa gaya gravitasi. Ruas kiri persamaan 2.21 mempresentasikan komponen percepatan *liquid*. Komponen gradien tekanan, tegangan *viscous* dan gravitasi di ruas kanan. Gaya ini dibagi oleh massa jenis *liquid* U. Karena itu, gaya yang sama akan menciptakan percepatan lebih tinggi untuk *liquid* yang lebih ringan. Rasio koefisien viskositas dinamis dan massa jenis disebut dengan koefisien viskositas *kinematic*, $v = {}^{\mu}/_{\rho}$.

Konservasi massa adalah hukum penting yang lain dalam mekanika fluida. Hukum ini menyebutkan bahwa massa tidak dapat diciptakan atau hilang dan dinyatakan melalui persamaan kontinuitas. Untuk *liquid* (material *incompressible*), persamaan ini menjadi nol divergen dari vektor kecepatan yang dinyatakan dalam Persamaan 2.22.

$$divU = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$ .....(2.22)

Sederhananya, berarti bahwa jumlah fluida yang masuk ke volume tertentu dari satu sisi, jumlahnya harus tepat sama dengan yang keluar pada sisi lain. Ketika panas disalurkan dan pembekuan terjadi, maka dibutuhkan persamaan untuk melacak evolusi temperatur dan fraksi padat. Hal ini bisa diamati melalui persamaan konservasi energi, yaitu seperti pada konservasi massa yang mengatakan energi tidak dapat hilang dan diciptakan. Sebagai persamaan untuk *liquid*, persamaan energi disederhanakan dengan asumsi *incompressibility*. Ditulis berupa entalpi pada Persamaan 2.23.

$$\frac{\partial E}{\partial t} + u\frac{\partial E}{\partial x} + v\frac{\partial E}{\partial y} + w\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{k}{\rho}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)$$ .....(2.23)

Ruas kiri persamaan 2.23 merupakan kecepatan perubahan entalpi dan ruas kanan menyatakan konduksi panas. Persamaan 2.21

sampai 2,23 merupakan persamaan dasar untuk mendeskripsikan perubahan dari *liquid* (material *incompressible*) seperti logam. Persamaan ini dapat dipakai dalam masalah aliran yang luas, dari model aliran eksternal sampai internal, *steady state* atau *transient*, dan lain-lain. Pengecoran logam tentunya salah satu fenomena yang bisa menggunakan fluida dinamis.

Ruas kiri Persamaan 2.21 dan 2.23 mempunyai bentuk yang sama dan mendeskripsikan kuantitas *transport* ditunjukkan dalam penurunan parsial (u, v, w di Persamaan 2.21 dan E di Persamaan 2.23. Untuk evaluasi dapat memasukkan *thermocouple* ke dalam aliran dan membandingkan dengan Persamaan 2.18. Difusi adalah istilah lain dalam fluida. Difusi energi panas dideskripsikan dengan istilah konduksi panas pada ruas kanan Persamaan 2.23. Difusi momentum direpresentasikan oleh bagian di dalam kurung pada ruas kanan Persamaan 2.21. (Reikher and Barkhudarov 2007)

2.7.5 Kondisi Batas

Deskripi kondisi batas yang sesuai, dibutuhkan untuk menyelesaikan persamaan aliran. Kondisi batas ini bisa membedakan apakah pengecoran menggunakan *low pressure* atau *high pressure die casting, lost foam casting* atau *gravity casting*, dan lain-lain. Terdapat dua kondisi batas pada dinding cetakan. Karena *liquid* tidak bisa menembus dinding cetakan, maka komponen kecepatan normal terhadap dinding harus sama dengan nol. Kondisi batas yang kedua adalah fenomena *no slip*, yaitu komponen kecepatan tangensial terhadap dinding harus sama dengan nol. Secara sederhana kedua kondisi batas ini mendefinisikan aliran *liquid* pada dinding adalah sama dengan nol.

Kondisi batas pada dinding juga dibutuhkan untuk persamaan entalpi. Kondisi batas ini dapat didefinisikan dengan *heat flux*, q, pada *interface* antara *liquid* dengan dinding. Persamaan *heat flux* tersebut ditulis pada Persamaan 2.24.

$$q = h\left(T_{liquid} - T_{wall}\right) \quad (2.24)$$

Dengan koefisien transfer panas, h, merepresentasikan sifat panas dari *interface* tersebut. Kondisi cetakan seperti kekasaran, lapisan, atau proses pembuatan mempengaruhi nilai h.

Free surface adalah jenis kondisi batas yang spesial karena ikut bergerak dengan *liquid*. Pengaruh udara pada aliran biasanya diabaikan karena udara jauh lebih ringan daripada logam cair. *Free surface* adalah batas antara *liquid* dengan udara sekitar dinyatakan dengan kondisi batas kinematik. Kondisi batas ini menyebutkan kecepatan *free surface*, U_b, sama dengan kecepatan *liquid*, seperti pada Persamaan 2.25 berikut.

$$U_b = U(t, x, y, z) \quad (2.25)$$

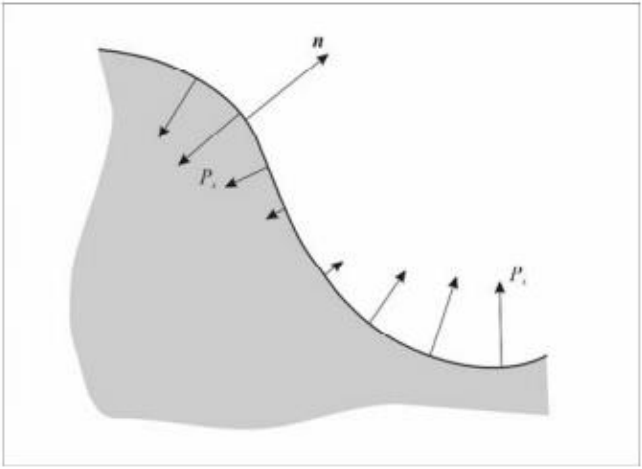
Persamaan 2.25 dibutuhkan untuk memasukkan *free surface* ke dalam permodelan aliran. Persamaan ini memastikan bahwa *liquid* dan *free surface* tidak dapat dipisahkan. Ringannya udara sekitar dibandingkan dengan *liquid* memberikan kondisi batas dinamis pada *free surface.* Kondisi batas ini menyebutkan bahwa tekanan *liquid* pada *free surface*, P_0, sama dengan tekanan udara, P_a, seperti pada Persamaan 2.26.

$$P_0 = P_a \quad (2.26)$$

Bahkan jika kita mengabaikan variasi tekanan udara karena gravitasi, maka P_a bernilai konstan sepanjang *free surface*. Tetapi hal ini tidak berarti bahwa nilainya konstan terhadap waktu. Sebagai contoh, selama pengisian cetakan, udara mungkin tidak bisa keluar cukup cepat menyebabkan peningkatan tekanan udara di dalam cetakan. Molekul *liquid* yang berada di *free surface* berinteraksi dengan molekul *liquid* pada satu sisi dan udara pada sisi lain. Perbedaan gaya antar molekul ini menimbulkan adanya gaya makro, yang proporsional dengan kontur antar muka. Gaya ini dinyatakan dengan tegangan permukaan, P_s, sesuai pada Persamaan 2.27.

$$P_s = \sigma\kappa = \sigma(\nabla n) \quad (2.27)$$

Dimana σ adalah koefisien tegangan permukaan, κ adalah lengkungan antar muka, dan ∇n adalah vektor normal terhadap permukaan seperti pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Vektor normal terhadap permukaan (Reikher and Barkhudarov 2007)

Logam cair mempunyai koefisien tegangan permukaan paling tinggi dan air raksa yang paling tinggi di antara jenis logam. Hal ini disebabkan terbentuknya lapisan tipis pada permukaan logam cair ketika terjadi oksidasi dengan udara.

Tegangan permukaan menjadi gaya yang penting ketika lengkungan permukaan cukup besar, sebagai contoh, adanya butiran kecil udara dalam aliran *high pressure die casting.* Sehingga persamaan tekanan *liquid* pada *free surface* perlu ditambahkan tegangan permukaan menjadi Persamaan 2.28

$$P_0 = P_a + P_s \quad (2.28)$$

Kondisi batas yang kedua pada *free surface* diturunkan dari pernyataan bahwa gesekan *viscous* antara *liquid* dan udara diabaikan karena terlalu kecil, sehingga didapatkan Persamaan 2.29

$$\frac{\partial U}{\partial n} = 0 \quad (2.29)$$

Dimana turunan kecepatan *liquid* pada *free surface* mengambil arah normal terhadap permukaan.

Kondisi batas panas pada *free surface* selama pengecoran diasumsikan sebagai adiabatis. Hal ini karena untuk

menyederhanakan persamaan *heat loss* dimana kehilangan panas pada *free surface* jauh lebih kecil daripada di dinding cetakan. Namun, kehilangan panas secara radiasi dapat juga digunakan untuk pengecoran bertemperatur tinggi sesuai pada Persamaan 2.30

$$q_R = \varepsilon\zeta\left({T_{liquid}}^4 - {T_{udara}}^4\right) \quad (2.30)$$

Dimana ε adalah emisivitas permukaan $(\varepsilon < 1)$, $\zeta = 5{,}5604.10^{-8}$ kg.s^{-3}.K^{-4} disebut konstanta Stefan-Boltzman, dan temperatur dinyatakan dalam satuan absolut, K. Pangkat 4 dalam Persamaan 2.30 menunjukkan panas radiasi meningkat cepat seiring peningkatan temperatur permukaan. Sebagai contoh, temperatur penuangan baja adalah 1700-1800 K. Nilai ini lebih besar sekitar dua kali daripada pengecoran paduan aluminium menggunakan *die casting*. Kemudian dengan koefisien emisivitas yang sama, panas radiasi yang dilepaskan di permukaan baja lebih besar sekitar 60 kali daripada aluminium. (Reikher and Barkhudarov 2007)

2.7.6 *Dimensionless Numbers*

Pada sub bab persamaan aliran *liquid* dengan kondisi batas yang sesuai, sudah bisa mendeskripsikan berbagai jenis aliran. *Dimensionless number* ini berguna untuk mendefinisikan jenis aliran. Sesuai namanya, angka ini memberikan sebuah nilai pada aliran terlepas dari satuan yang digunakan. Berikut beberapa *dimensionless numbers* yang biasa digunakan mulai dari Persamaan 2.31 sampai 2.34.

Reynolds number : $Re = \frac{\rho U d}{\mu} = \frac{inersia\ liquid}{gaya\ viscous}$ .....(2.31)

Weber number : $We = \frac{\rho U^2 l}{\sigma} = \frac{inersia\ liquid}{tegangan\ permukaan}$ .....(2.32)

Bond number : $Bo = \frac{\rho G l^2}{\sigma} = \frac{gravitasi}{tegangan\ permukaan}$ .....(2.33)

Froude number : $Fr = \frac{U}{\sqrt{Gh}} = \frac{inersia\ liquid}{gravitasi}$ .....(2.34)

Dimana U adalah komponen kecepatan, G adalah gravitasi, d, l, dan h adalah panjang karakteristik.

Dalam *reynold number*, U adalah rata-rata variasi kecepatan aliran, dan d adalah jarak antara variasi tersebut. Berdasarkan kondisi batas pada pembahasan sebelumnya, disebutkan bahwa kecepatan di dinding sama dengan nol. Maka U dapat didefinisikan dengan perbedaan kecepatan antara aliran di dinding dan aliran di tengah. Kemudian d bisa dihitung berupa setengah dari lebar saluran aliran tersebut. *Reynold number* adalah salah satu parameter penting untuk mencirikan aliran *liquid*. Ketika nilainya kecil, Re<1, maka aliran didominasi dengan gaya *viscous*. *Reynold number* dalam pengecoran selalu lebih besar dari satu, mengindikasikan bahwa selama pengisian, viskositas bukan satu-satunya yang mempengaruhi aliran. Perubahan karakteristik aliran dimulai pada Re≈2000 dan berubah menjadi aliran turbulen sepenuhnya ketika Re melebihi 10000. Aliran yang dikontrol dengan sangat hati-hati dapat meningkatkan daerah laminer sampai Re=20000. Aliran turbulen sepenuhnya mengakibatkan disipasi momentum antar molekul. *Reynold number* besar menunjukkan gaya *viscous* tidak berpengaruh dalam aliran.

Pada persamaan *weber number*, U menunjukkan rata-rata veriasi kecepatan *liquid* pada *free surface*. Untuk lebih jelas, U pada *weber number* adalah komponen kecepatan normal terhadap *free surface*. Karena kondisi batas *no slip* pada dinding, dapat dikatakan U adalah rata-rata kecepatan dari *free surface*. Seperti pada *reynold number*, jarak l adalah lebar minimum dari saluran. Selama pengisian, gaya *liquid* internal dapat menyebabkan distorsi pada permukaan logam, yang disebut turbulensi permukaan. Turbulensi permukaan merupakan salah satu penyebab adanya lapisan tipis pada permukaan, adanya oksidasi, dan efek yang tidak diharapkan lainnya. Proses distorsi dapat digambarkan ketika *liquid* dipancarkan ke daerah *free surface* maka pada awal pancaran, *liquid* berbentuk menonjol. *Weber number* dapat digunakan untuk menentukan apakah tegangan permukaan dapat menahan permukaan dari kerusakan dan mengembalikan bentuknya. Kecepatan U dan jarak l pada kasus ini adalah kecepatan pancaran dan ukuran dari benjolan. Jika We<1 maka diharapkan energi aliran akan dikandung di dalam *free surface*.

Jika We>1, seperti pada banyak kasus pengisian *liquid*, maka oksida permukaan tidak dapat dihindari. Secara eksperimen, *free surface* pecah menjadi droplet kecil ketika *weber number* melebihi nilai kritis yaitu sekitar 60.

Bond number adalah ukuran lain ysng penting untuk tegangan permukaan. Persamaan ini dibandingkan dengan gravitasi, sehingga bisa mendapatkan apakah *free surface* tetap datar atau menonjol. Kecenderungan tegangan permukaan adalah melengkung dari keadaan horizontal menjadi lengkungan konstan pada setiap titik. Gravitasi pada kasus ini membuat arah yang berlawanan dan berusaha membuat horizontal. Ketika gravitasinya besar dan panjang horizontal, l, besar (Bo>1) maka *free surface* berbentuk mendatar dan tidak terganggu oleh tegangan permukaan seperti pada gelas air dan *pouring basin*. Jika ukuran wadah dikurangi, maka *bond number* di beberapa titik berkurang di bawah 1. Sehingga bentuk *free surface* lebih dipengaruhi oleh tegangan permukaan daripada gravitasi. Hal ini dapat diamati di dalam sedotan transparan yang terisi setengahnya atau ketika menempatkan droplet air kecil pada permukaan kering.

Froude number sering digunakan untuk memperkirakan pentingnya gelombang permukaan pada aliran saluran terbuka, seperti sungai dan kanal. Hal ini juga berguna untuk melihat gelombang pada *runner* horizontal pada *gravity pour casting* dan *shot sleeves* pada *high pressure die casting*. Pada kasus tersebut, gelombang dipengaruhi oleh gravitasi. Variabel h pada persamaan *froude number* adalah rata-rata kedalaman *liquid*. Ketika Fr lebih kecil dari 1, Fr<1, gelombang permukaan lebih cepat daripada aliran utama, U. Aliran semacam itu disebut sub kritis. Ketika *liquid* berpindah sepanjang medium, gelombang akan melewati kedua arah berkali-kali, mendisipasi energi mereka dan kemudian dianggap tidak berpengaruh pada aliran. Ketika *froude number* besar, Fr>1, aliran lebih cepat daripada gelombang permukaan, atau super kritis. Gelombang-gelombang tersebut secara cepat tersapu oleh aliran menuju batas aliran. Fakta bahwa gelombang tersebut hanya dapat berpindah dalama satu arah menyebabkan pengaruh mereka terhadap dinding. Hal ini menghasilkan

penumpukan *liquid* di dekat dinding dan menjadikan lompatan hidrolis. Lompatan hidrolis adalah sebuah daerah dimana *liquid*nya mengalami lonjakan perubahan kecepatan. Perubahan ini dicirikan dengan perubahan tekanan, kedalaman, dan turbulensi secara mendadak. Lebih lanjut, perubahan ini menyebabkan banyaknya udara yang masuk ke dalam *liquid*. Hal ini tentu sangat tidak diharapkan pada saat pengisian cetakan. (Reikher and Barkhudarov 2007)

2.7.7 Persamaan Bernoulli

Salah satu persamaan yang paling banyak digunakan untuk *liquid* adalah persamaan Bernoulli. Persamaan Bernoulli ditulis dalam Persamaan 2.35 sebagai berikut.

$$P + \frac{1}{2}\rho U^2 + \rho g h = C \quad (2.35)$$

Dimana g adalah total vektor gravitasi, h adalah tinggi dari titik referensi, C adalah nilai konstan sepanjang aliran. Persamaan ini dapat dihitung menggunakan tekanan dan kecepatan pada setiap titik dalam aliran, sehingga dapat dituliskan menjadi Persamaan 2.36.

$$P + \frac{1}{2}\rho U^2 + \rho g h = P_1 + \frac{1}{2}\rho {U_1}^2 + \rho g h_1 \quad (2.36)$$

Apabila variasi *liquid* h terlalu kecil atau gaya gravitasi diabaikan dibandingkan dengan tekanan dan inersia, seperti pada *high pressure die casting*, maka Persamaan 2.36 dapat disederhanakn menjadi Persamaan 2.37.

$$P + \frac{1}{2}\rho U^2 = P_1 + \frac{1}{2}\rho {U_1}^2 \quad (2.37)$$

Karena aliran *liquid* bertambah cepat dan tekanan semakin berkurang, maka total penjumlahan pada ruas kiri bernilai konstan. Nilai maksimum tekanan terjadi pada titik dimana kecepatan bernilai nol, atau disebut pada titik stagnasi. Tekanan pada titik ini disebut tekanan stagnasi. Pernyataan $1/2\,\rho U^2$ adalah tekanan dinamis sedangkan tekanan statis digambarkan oleh P. Penjumlahan tekanan statis dan dinamis disebut tekanan total. Persamaan Bernoulli 2.37 membantu perkembangan dari teori *airfoil*. Perbedaan antara tekanan statis di atas dan di bawah

permukaan sayap pesawat menciptakan gaya angkat agar pesawat tetap berada di udara. (Reikher and Barkhudarov 2007)

2.8 Komputasi Dinamika Fluida

Pada komputasi dinamika fluida disajikan persamaan lengkap dan susunan pendekatan untuk menyeleseaikan model. Pendekatan tersebut mempunyai keuntungan menawarkan ketergantungan analitis untuk berbagai jenis parameter aliran dalam keadaan sederhana dan peralatan yang digunakan selama proses desain. Pada saat bersamaan, mereka menyediakan informasi yang terbatas dan seringkali tidak bisa diterapkan pada persamaan umum, aliran tiga dimensi, perpindahan panas, dan perubahan fasa. Pada kasus ini, metode numerik harus digunakan untuk menyelesaikan persamaan aliran *liquid*. Ilmu atau seni pengembangan pendekatan numerik berdasarkan persamaan turunan dan integral dari gerakan fluida disebut komputasi dinamika fluida.

Gerakan *liquid* dideskripsikan dengan *non linear*, *transient*, *coupled*, dan persamaan turunan *second order*. Penyelesaian numerik persamaan meliputi pendekatan berbagai macam pernyataan dalam bentuk aljabar. Persamaan kemudian diselesaikan untuk menghasilkan pendekatan penyelesaian dari permasalahan. Proses ini disebut simulasi. (Reikher and Barkhudarov 2007)

2.8.1 Komputasi *Mesh*

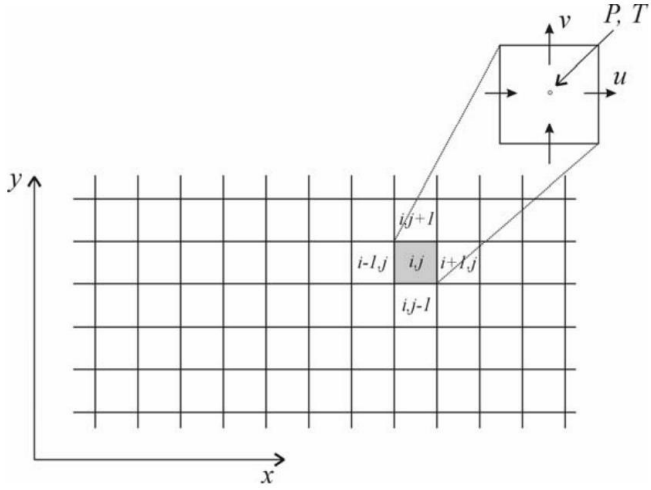
Model numerik dimulai dengan komputasi *mesh*, atau *grid*. Hal ini terdiri dari sejumlah elemen yang bersambung dengan berbagai macam bentuk, sebagai contoh tetrahedral atau balok. Ruangan dalam elemen-elemen tersebut dibagi lagi oleh volume kecil dimana minimal terdapat satu *node* dalam volume tersebut. *Node* digunakan untuk menyimpan nilai model, seperti tekanan, temperatur, dan kecepatan. *Mesh* adalah ruang numerik yang menggantikan ruang asli secara efektif. Hal tersebut menyediakan pengertian untuk parameter aliran pada setiap titik, mengatur

kondisi batas, dan tentunya mengembangkan pendekatan numerik persamaan gerakan fluida.

Mesh membagi volume asli. Setiap parameter fluida direpresentasikan dalam sebuah *mesh* oleh susunan nilai pada setia titik. Karena parameter fisik sebenarnya selalu bervariasi dalam volumenya, *mesh* dengan jarak antara *node* halus lebih baik daripada yang kasar. Pada sifat dasar pendekatan numerik adalah semua pendekatan numerik semakin valid mendekati persamaan sebenarnya seiring berkurangnya jarak antara *node* (*grid*) menuju nilai nol. Jika pendekatan tidak menemui keadaan ini, maka dapat dikatakan terdapat kesalahan dalam pendekatan tersebur.

Mengurangi ruang *grid*, atau menghaluskan *mesh*, pada ruang fisik yang sama menghasilkan lebih banyak elemen dan *node*, kemudian meningkatkan ukuran model numerik. Tetapi selain dari kenyataan fisik aliran fluida dan perpindahan panas, ada juga kenyataan siklus desin, perangkat keras komputer, dan waktu. Hal-hal tersebut digabungkan oleh *simulation engineer* untuk memilih ukuran *mesh* yang masuk akal. Pencapaian antara *constraint* yang memuaskan dan penemuan penyelesaian yang akurat adalah kondisi yang tidak kalah penting selain dari pengembangan model permasalahan itu sendiri.

Grid dua dimensi yang sederhana ditunjukkan pada Gambar 2.17. *Grid* tersebut disebut *staggered*. Semua besaran skalar, seperti tekanan dan temperatur, dihitung dan disimpan pada pusat setiap sel berbentuk kotak tersebut. Vektor kecepatan ditempatkan pada sisi masing-masing sel untuk stabilitas algoritma numerik. Vektor kecepatan secara penuh dapat dibangun pada pusat sel dengan merata-ratakan komponen dari keempat sisi. Setiap elemen *grid* mempunyai lima *node* dengan satu untuk besaran skalar dan empat unruk komponen kecepatan. Setiap sel membagi *node* kecepatan dengan sel lain yang berdekatan.



Gambar 2.17 *Grid* dua dimensi (Reikher and Barkhudarov 2007)

Grid pada gambar diatas sangat mudah untuk dibuat dan disimpan karena bentuknya yang umum. *Grid* yang tidak seragam digunakan untuk *meshing* aliran yang kompleks. Sel diberi notasi secara berurutan menggunakan tiga indikator, yaitu i pada arah x, j pada arah y, dan k pada arah z. Oleh karena itu, setiap sel dapat diidentifikasi dengan indikator unik (i, j, k), sama seperti koordinat titik.

Grid persegi terstruktur menguntungkan karena mempermudah pengembangan metode numerik, transparansi hubungan masalah fisik dengan numerik, keakuratan dan stabilitas penyelesaian numerik. Algoritma numerik yang tertua berdasarkan turunan berhingga dan pendekatan volume berhingga. Algoritma ini telah dikembangkan pada *mesh* dan masih sangat banyak digunakan. (Reikher and Barkhudarov 2007)

2.8.2 Pendekatan Numerik

Metode turunan berhingga adalah berdasarkan sifat ekspansi Taylor dan kemudahan pengaplikasian definisi turunan. Metode ini adalah metode tertua yang digunakan untuk mendapatkan

penyelesaian numerik, menurunkan persamaan, dan pengaplikasian pertama telah dikembangkan oleh Euler pada 1768.

Ide metode turunan berhingga sangat sederhana. Untuk fungsi u(x), turunan pada titik x dapat diperkirakan sebagai Persamaan 2.38.

$$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{u(x+\Delta x)-u(x)}{\Delta x} \quad \text{.....} (2.38)$$

Peningkatan sebagian Δx dapat dipilih sebagai jarak antara dua *node* yang berdekatan, $u(x+\Delta x)$ dan u(x) adalah nilai fungsi pada *node* tersebut. Kemudian persamaan di atas dapat ditulis lebih umum dalam komputasi mekanika fluida yaitu Persamaan 2.39.

$$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{u(x_i)-u(x_{i-1})}{x_i-x_{i-1}} = \frac{u_i-u_{i-1}}{x_i-x_{i-1}} \quad (2.39)$$

Di sini digunakan notasi i untuk mengindikasikan lokasi sumbu x dimana nilai u dan x diambil. Jadi diambillah sebuah pendekatan turunan fungsi u(x) pada komputasi *grid* terstruktur. Dari definisi turunan, keakuratan pendekatan akan meningkat dengan *grid* yang halus.

Pendekatan yang sama diambil untuk memperkirakan semua turunan sebagian pertama dan kedua dalam persamaan gerakan fluida. Perkiraan turunan kedua, yang terdapat pada persamaan gerakan *liquid*, membutuhkan minimal 3 *node*. Selisih waktu (*time steps*), Δt, digunakan untuk mendeskritka waktu sehingga turunan sementara dapat diperkirakan sebagai Persamaan 2.40.

$$\frac{\partial u}{\partial t} \approx \frac{u(t+\Delta t)-u(t)}{\Delta t} = \frac{{u_i}^{n+1}-{u_i}^{n}}{t^{n+1}-t^{n}} \quad \text{.....} (2.40)$$

Dimana notasi n merujuk pada urutan titik waktu dari nilai yang diambil.

Sesudah semua turunan digantikan dengan masing-masing perkiraan turunan berhingga, persamaan turunan digantikan dengan persamaan aljabar. Dengan persamaan gerakan *liquid*, kondisi batas yang sesuai harus didefinisikan untuk persamaan turunan berhingga. Sebagai contoh, termasuk kondisi *no slip* dan perpindahan panas pada antar muka antara *liquid* dan dinding sekitar.

Yang tidak diketahui pada persamaan sistem aljabar adalah nilai parameter kecepatan, tekanan, dan temperatur pada *node*. Untuk menyelesaikan sistem ini, jumlah persamaan aljabar harus sama dengan jumlah *node*. Sehingga ukuran model numerik meningkat dengan meningkatnya penyelesaian *mesh*. Sebagai contoh, untuk *mesh* tiga dimensi dengan seratus *node* pada setiap arah koordinat, satu juta persamaan harus diselesaikan. Selanjutnya, penyelesaian harus ditemukan pada setiap peningkatan titik waktu t^n, dimulai dari t=0, dan diakhiri pada t^N=T.

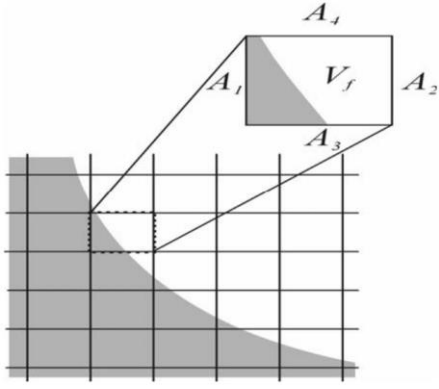
Prosedur sebenarnya untuk menyelesaikan setiap persamaan pada model numerik biasanya cukup sederhana. Hal ini karena jumlah besar operasi elemen tidak mampu diselesaikan dengan otak manusia sehingga digunakan kekuatan otak elektronik. Komutasi dinamika fluida menggunakan kombinasi turunan berhingga dan pendekatan volume berhingga aliran *liquid* seperti pada *grid* gambar 2.18. Tidak seperti metode turunan berhingga, metode volume berhingga (*finite volume*) menggunakan bentuk itegral hukum koservasi. Untuk setiap elemen dengan volume terkontrol, sejumlah aliran konservasi (sebagai contoh massa) dihitung pada batasnya. Aliran kemudian diterjemahkan menjadi perubahan kuantitas di dalam volume tersebut. Salah satu kelebihan metode volume berhingga adalah sifat konservasi mengikuti hukum fisik konservasi. Untuk *mesh* persegi terstruktur, pendekatan volume terkontrol tidak bisa dibedakan dari metode turunan berhingga. (Reikher and Barkhudarov 2007)

2.8.3 Representasi Geometri

Seperti disebutkan di atas, metodologi turunan berhingga telah digunakan sejak dulu. Pada saat sekarang, metode ini sulit untuk mengakuratkan geometri kompleks. Sebuah sel persegi terbuka sepenuhnya atau tertututp sepenuhnya oleh cetakan menyebabkan representasi yang sama dengan permukaan berkurva. Kekurangan tersebut membuat masalah dalam akurasi kondisi batas. Sebagai contoh, bentuk *zigzag* antar muka menyebabkan kehilangan energi aliran karena gesekan. Selain itu

luas permukaan dari bentuk *zigzag* ini lebih besar daripada permukaan halus, dan perbedaan ini tidak menyebabkan perubahan dengan penghalusan *mesh*.

Sebuah teknik inovatif yang disebut *Fractional Area Volume Obstacle Representation* (FAVOR™) telah dikembangkan untuk menyelesaikan masalah ini. Pada metode ini, permukaan geometri dapat dipotong melalui sel persegi dan membaginya menjadi bagian tertutup dan terbuka, seperti pada Gambar 2.18. Perbandingan volume terbuka di dalam sel dengan total volume disebut volume fraksi. Perpotongan permukaan dengan sisi sel (berjumlah enam pada tiga dimensi) dihitung dan disimpan sebagai luas fraksi, yang mana adalah perbandingan luas permukaan terbuka terhadap total luas permukaan sisi sel. Sama seperti vektor kecepatan, luas area fraksi dihitung dan disimpan pada *staggered*, sisi sel. Geometri lengkap pada setiap sel komputasi diubah menjadi volume dan luas permukaan fraksi. Dengan penyelesaian *mesh* yang memadai, pembuatan geomeri memungkinkan mencapai keakuratan tinggi.



Gambar 2.18 Metode FAVOR (Reikher and Barkhudarov 2007)

Fraksi luas permukaan dan volume kemudian digabung dalam persamaan numerik dan juga digunakan untuk mendefinisikan kondisi batas. Hasil model memberikan keakuratan lebih

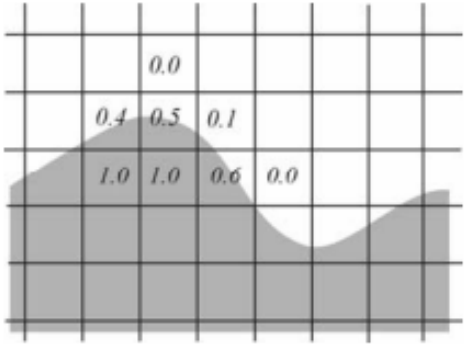
signifikan daripada pendekatan tradisional (Reikher and Barkhudarov 2007)

2.8.4 Pelacakan *Free Surface*

Free surface umunya terdapat pada banyak aliran logam cair dan tentunya selama pengisian cetakan. *Free surface* ini perlu dimasukkan dalam parameter aliran karena sifat material seperti massa jenis, kecepatan, dan tekanan mengalami diskontinuitas pada *free surface*. Selanjutnya, gerakan *free surface* menghasilkan kombinasi kondisi aliran dinamis dan kenematis. Kondisi yang sesuau perlu dimodelkan pada *free surface*.

Salah satu metode yang umum digunakan untuk membuat model *free surface* adalah *volume of fluid* (VOF). Metode ini terdiri dari tiga komponen utama. Pengertian *volum of fluid*, fungsi F, adalah sebuah metode untuk menyelesaikan persamaan perpindahan F dan kondisi batas yang sesuai pada *free surface*.

Fungsi F pada VOF didefinisikan sama dengan satu pada *liquid* dan nol di luar *liquid*. Rata-rata volume sel menjadi fraksi *volume of fluid*, yaitu jumlah *liquid* di dalam sel dibagi total volume. Jadi F=1,0 di dalam sel yang penuh *liquid* dan F=0,0 di dalam sel kosong. Sebuah sel dengan *free surface* akan mempunyai nilai F antara nol sampai satu seperti pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Ilustrasi metode VOF (Reikher and Barkhudarov 2007)

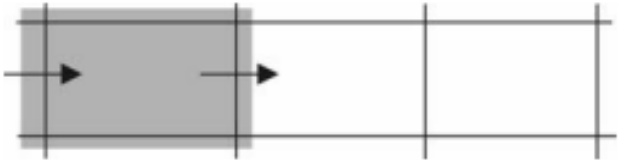
Fungsi VOF dapat diinterpresentasikan sebagai tinta pelacak yang ditambahkan di dalam *liquid*. Kemudia tinta tersebut harus dibawa melalui ruang oleh *liquid*. Interpretasi ini menghasilkan Persamaan 2.41 untuk fungsi VOF.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial Fu}{\partial x} + \frac{\partial Fv}{\partial y} + \frac{\partial Fw}{\partial z} = 0 \quad (2.41)$$

Persamaan ini sering disebut persamaan kenematis karena tidak terdapat gaya. Persaman ini hanya menyebutkan bahwa nilai F yang bergerak bergantung pada kecepatan, seperti asap di dalam udara. Kondisi batas *free surface* dapat tercakup pada persamaan ini.

Jika metode komputasi konvensional diterapkan pada persamaan VOF, hasilnya tidak akan memuaskan karena *free surface* merepresentasikan batas antara nilai F dalam *liquid* dan di luar. Turunan F melalui *free surface* tidak berhingga karena nilainya berubah dari satu ke nol pada skala panjang ynag kecil dan tidak berhingga, yaitu melalui ketebalan *free surface*. Kemudian percobaan pada pendekatan variasi ini menggunakan metode turunan berhingga, mendapatkan hasil yang sangat tidak akurat.

Cara menyelesaikan Persamaan 2.41 di atas secara numerik yaitu menggunakan metode geometri, dimana bentuk dan lokasi *free surface* di dalam sel komputasi dibuat menggunakan nilai fungsi VOF pada daerah sekitarnya sebelum menghitung aliran volume *liquid* pada sisi sel. Sebagai contoh, jika diketahui bahwa *liquid* mengisi bagian kiri sel, seperti pada Gambar 2.20, hal itu membutuhkan waktu untuk sampai di bagian kanan.



Gambar 2.20 Perhitungan aliran volume menggunakan metode geometri (Reikher and Barkhudarov 2007)

Bagian *free surface* di dalam sel komputasi direpresentasikan dalam tiga dimensi dengan potongan mendatar. Kemudian kemiringannya dapat dihitung dari gradien fungsi VOF, dan lokasinya disematkan oleh nilai F di dalam sel. Kemudian jumlah *liquid* yang berpindah masuk atau keluar sel pada setiap enam sisinya dapat dievaluasi. Pendekatan ini seringkali disebut *piecewise linear interface calcluation* atau metode PLIC.

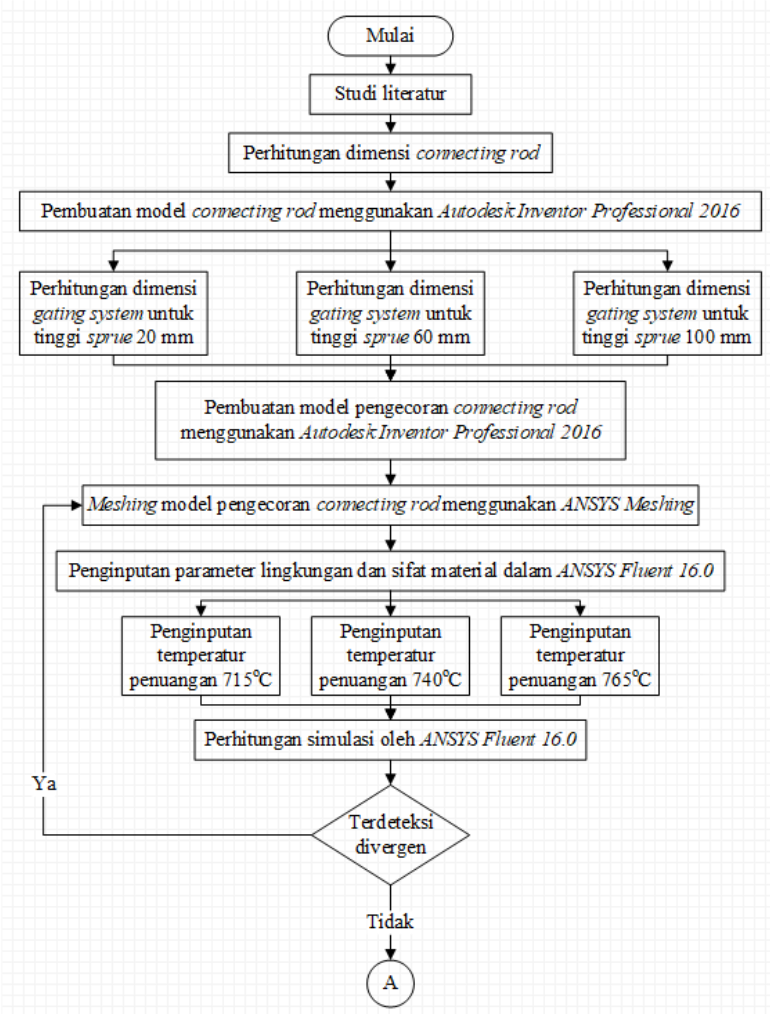
Komponen metode VOF dideskripsikan sejauh yang dapat diaplikasikan dalam dua fasa (logam dan udara) dan satu fasa (logam dan lubang). Dalam kasus sebelumnya, ruang di luar daerah F=1,0 terisi oleh udara, dan persamaan aliran diselesaikan untuk kedua fluida.

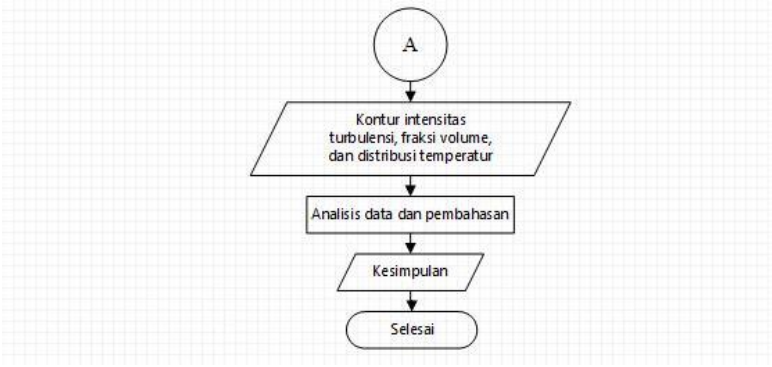
Pada kasus satu fasa, inersia udara diabaikan dan ruang F=0,0 adalah kosong, tidak ada massa, direpresentasikan hanya dengan tekanan dan temperatur seragam. Pendekatan ini mempunyai keuntungan tidak membuang-buang waktu CPU dalam memodelkan udara karena pada banyak kasus, detail gerakannya tidak penting untuk gerakan logam yang lebih berat. Namun, pada kasus ini, *free surface* menjadi salah satu batas luar *liquid* dan membutuhkan definisi kondisi batas dinamis. (Reikher and Barkhudarov 2007)

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ditampilkan pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Perhitungan Data Awal

Pada bagian ini, dilakukan penghitungan data awal meliputi dimensi *connecting rod* dan dimensi *gating system*. Masing-masing perhitungan terdapat pada lampiran

3.2.1 Dimensi *Connecting Rod*

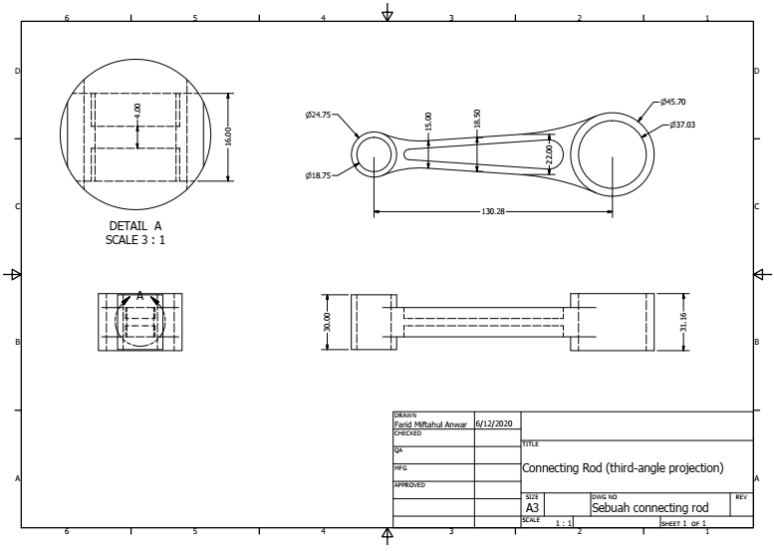
Sesuai perhitungan didapat dimensi model *connecting rod* untuk mesin motor 150 cc. Model *connecting rod* dibuat menggunakan perangkat lunak *Autodesk Inventor Professional* 2016. Nilai dimensi ditabulasikan dalam Tabel 3.1. Untuk gambar teknik dan gambar model 3 dimensi secara berurutan ditampilkan dalam Gambar 3.2 dan 3.3.

Tabel 3.1 Dimensi model *connecting rod* mesin motor 150 cc

Nomor	Bagian	Nilai
1	t (*I-section*)	4 mm
2	Panjang *connecting rod*	130,275 mm
3	Diameter dalam *big end*	37,03 mm
4	Diameter luar *big end*	45,697 mm
5	Ketebalan *big end*	31,157 mm
6	Diameter dalam *small end*	18,75 mm
7	Diameter luar *small end*	24,75 mm
8	Ketebalan *small end*	30 mm

9	Lebar	16 mm
10	Tinggi pada bagian tengah	20 mm
11	Tinggi pada *small end*	15 mm
12	Tinggi pada *big end*	22 mm

Gambar 3. 2 Model 3 dimensi *connecting rod* mesin motor 150 cc



Gambar 3.3 Gambar teknik *connecting rod* mesin motor 150 cc

3.2.1 Dimensi *Gating System*

Dimensi *gating system* berupa ukuran *sprue, pouring basin, sprue base well, choke area, runner, ingate*, dan *riser*. *Gating system* dibuat menggunakan *Autodesk Inventor Professional 2016*. Pada Gambar 3.4 ditampilkan gambar 3 dimensi *gating system* Besar ukuran *gating system* berdasarkan tinggi *sprue* ditabulasikan pada Tabel 3.2. Untuk contoh perhitungan *gating system* terdapat pada lampiran.

Tabel 3.2 Dimensi *gating system* untuk masing-masing tinggi *sprue*

Tinggi *sprue*	***Gating system***	**Dimensi**
20 mm	Kedalaman *sprue base well*	29,853 mm
	Diameter *sprue base well*	38,009 mm
	Panjang *runner extension*	30,408 mm
	Lebar *runner*	15,204 mm

	Tinggi *runner*	5 mm
	Lebar *ingate*	15 mm
	Tinggi *ingate*	5 mm
	Panjang *runner*	64,412 mm
	Diameter *choke*	16,998 mm
	Diameter atas *sprue*	19.323 mm
60 mm	Kedalaman *sprue base well*	22,683 mm
	Diameter *sprue base well*	28,881 mm
	Panjang *runner extension*	23,105 mm
	Lebar *runner*	11,552 mm
	Tinggi *runner*	5 mm
	Lebar *ingate*	15 mm
	Tinggi *ingate*	5 mm
	Panjang *runner*	52,545 mm
	Diameter *choke*	12,916 mm
	Diameter atas *sprue*	17,847 mm
100 mm	Kedalaman *sprue base well*	19,964 mm
	Diameter *sprue base well*	25,418 mm
	Panjang *runner extension*	20,335 mm
	Lebar *runner*	10,167 mm
	Tinggi *runner*	5 mm
	Lebar *ingate*	15 mm
	Tinggi *ingate*	5 mm
	Panjang *runner*	48,044 mm
	Diameter *choke*	11,367 mm
	Diameter atas *sprue*	17,798 mm

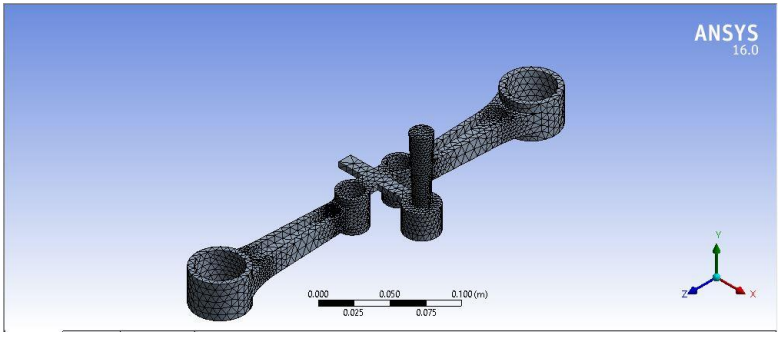
Gambar 3.4 Model 3 dimensi benda cor dengan *gating system*

3.3 Proses Simulasi

Pada tahap ini dilakukan proses *meshing* dan simulasi. Perangkat lunak yang digunakan adalah ANSYS Workbench 16.0. Fungsi yang digunakan dalam ANSYS Workbench adalah ANSYS Fluent.

3.3.1 *Meshing*

Proses simulasi selalu diawali dengan *meshing*. *Meshing* ini terdiri dari kumpulan elemen-elemen dengan bentuk yang bervariasi seperti tetahedral atau balok. Tiga jenis cetakan dengan masing-masing tinggi *sprue* yang telah dibuat dengan *Autodesk Inventor Professional* 2016 *dilakukan* proses *meshing*. Pengaturan *meshing* yang digunakan adalah *default* sistem sesuai fungsi CFD Fluent. Hasil *meshing* ditunjukkan pada Gambar 3.5



Gambar 3.5 Proses *meshing*

3.3.2 Simulasi

Simulasi adalah proses penyelesaian hasil dari model 3 dimensi yang telah dilakukan *meshing*. Parameter yang digunakan dalam proses simulasi ditabulasikan dalam Tabel 3.3. Sedangkan sifat-sifat material yang cor dan cetakan ditabulasikan dalam Tabel 3.4

Tabel 3.3 Parameter awal sebelum simulasi

Nomor	Parameter	Nilai
1	Percepatan gravitasi	9,8 m/s^2
2	Tekanan operasi	101325 Pa
3	Temperatur operasi	298,15 K
4	Temperatur dinding	298,15 K
5	Tegangan permukaan aluminium	1,031 n/m

Tabel 3.4 Sifat-sifat material cor dan cetakan (Sente Software Ltd. Version 7.0.0)

Material	Sifat	Temperatur	Nilai
Aluminium 7075	Massa jenis	Konstan	2470 kg/m^3
	Massa molekul	Konstan	26,982 kg/kmol
	Entalpi standar	Konstan	-978300 J/kmol
	Panas jenis	973,15 K	1170 J/kg.K

	983,15 K	1170 J/kg.K
	990,28 K	1120 J/kg.K
	993,15 K	1120 J/kg.K
	1003,15 K	1120 J/kg.K
	1013,15 K	1120 J/kg.K
	1023,15 K	1120 J/kg.K
	1033,15 K	1120 J/kg.K
	1043,15 K	1120 J/kg.K
	1053,15 K	1120 J/kg.K
	1063,15 K	1120 J/kg.K
Konduktivitas panas	973,15 K	87,45 W/m.K
	983,15 K	87,79 W/m.K
	990,28 K	88,03 W/m.K
	993,15 K	88,13 W/m.K
	1003,15 K	88,48 W/m.K
	1013,15 K	88,83 W/m.K
	1023,15 K	89,18 W/m.K
	1033,15 K	89,54 W/m.K
	1043,15 K	89,89 W/m.K
	1053,15 K	90,24 W/m.K
	1063,15 K	90,59 W/m.K
	1073,15 K	90,94 W/m.K
Viskositas	973,15 K	0,0013 Kg/m.s
	983,15 K	0,00127 kg/m.s
	990,28 K	0,00126 kg/m.s
	993,15 K	0,00125 kg/m.s
	1003,15 K	0,00122 kg/m.s
	1013,15 K	0,0012 kg/m.s
	1023,15 K	0,00118 kg/m.s
	1033,15 K	0,00115 kg/m.s
	1043,15 K	0,00113 kg/m.s
	1053,15 K	0,00111 kg/m.s
	1063,15 K	0,00109 kg/m.s
	1073,15 K	0,00107 kg/m.s

Udara	Viskositas	Konstan	$1,789.10^{-5}$ kg/m.s
	Massa molekul	Konstan	28,996 kg/kmol
	Massa jenis	Konstan	1,225 kg/m^3
	Panas jenis	Konstan	1006,43 J/kg.K
	Konduktivitas panas	Konstan	0,0242 W/m.K
Tool steel H13	Massa jenis	Konstan	7760 kg/m^3
	Panas jenis	298,15-608,15 K	450 J/kg.K 500 J/kg.K 660 J/kg.K 2510 J/kg.K
		608,15-1073.15 K	520 J/kg.K 530 J/kg.K 550 J/kg.K 560 J/kg.K 580 J/kg.K 600 J/kg.K
	Konduktivitas panas	298,15-553,15 K	18,21W/m.K 19,57 W/m.K 21,54 W/m.K 22,44 W/m.K
		553,15-618,15 K	22,44 W/m.K 22,29 W/m.K 20,83 W/m.K
		618,15-1073,15 K	20,83 W/m.K 21,45 W/m.K 22,57 W/m.K 23,7 W/m.K 24,82 W/m.K 25,94 W/m.K

Dalam penelitian ini digunakan dua jenis variasi variabel yaitu tinggi *sprue* dan temperatur penuangan. Variasi tinggi *sprue* yang digunakan adalah 20 mm, 60 mm, dan 100 mm. Sedangkan

variasi temperatur penuangan yang digunakan adalah 715^0C, 740^0C, dan 765^0C. Maka akan terdapat 9 kombinasi variabel seperti pada Tabel 3.5

Tabel 3.5 Kombinasi variabel

Temperatur penuangan / Tinggi *sprue*	**715^0C**	**740^0C**	**765^0C**
20 mm	20 mm, 715^0C	20 mm, 740^0C	20 mm, 765^0C
60 mm	60 mm, 715^0C	60 mm, 740^0C	60 mm, 765^0C
100 mm	100 mm, 715^0C	100 mm, 740^0C	100 mm, 765^0C

Dari variabel-variabel tersebut dilakukan simulasi menggunakan software ANSYS Fluent 16.0. Simulasi dilakukan pada setiap 0,01 detik dengan pengulangan 20 kali dan dilakukan selama 2 detik. Sifat yang dianalisis mengenai aliran pengecoran ini adalah intensitas turbulensi, fraksi volume logam cair, dan distribusi temperatur.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

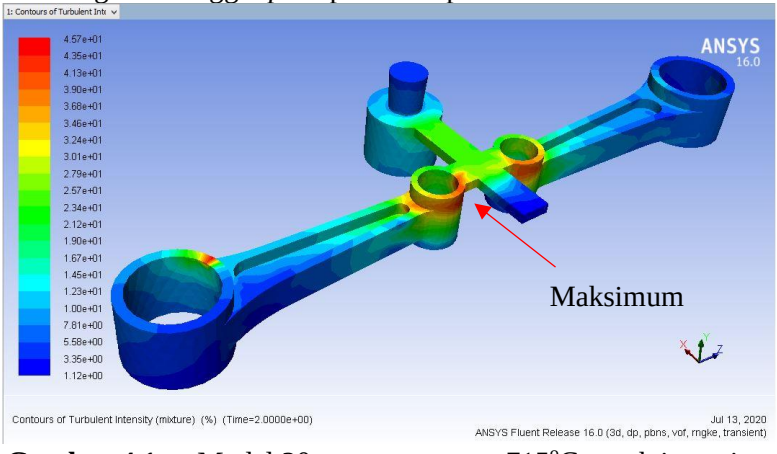
4.1 Pola Intensitas Turbulensi

Hasil simulasi ditampilkan dalam gambar tiga dimensi. Pengamatan yang dilakukan adalah membandingkan nilai maksimum intensitas turbulensi yang terdapat pada hasil simulasi tersebut.

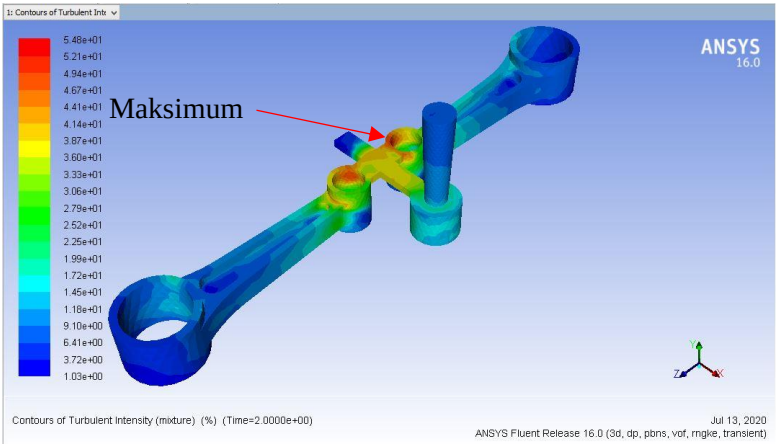
4.1.1 Hasil Simulasi

Hasil simulasi ditampilkan dalam Gambar 4.1-4.9. Untuk memudahkan perbandingan maka dibuatlah Tabel 4.1-4.6 dengan membuat salah satu variabel bernilai konstan. Nilai yang dibandingkan adalah nilai maksimum intensitas turbulensi yang terjadi.

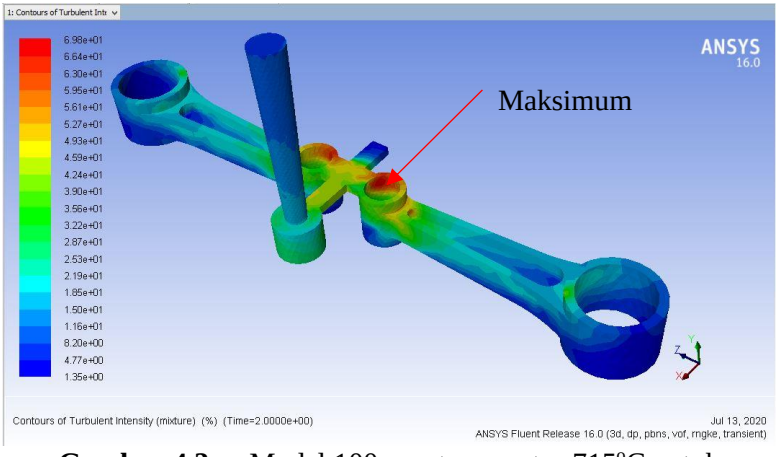
1. Pengaruh Tinggi *Sprue* pada Temperatur 715°C



Gambar 4.1 Model 20 mm temperatur 715°C untuk intensitas turbulensi



Gambar 4.2 Model 60 mm temperatur 715°C untuk intensitas turbulensi

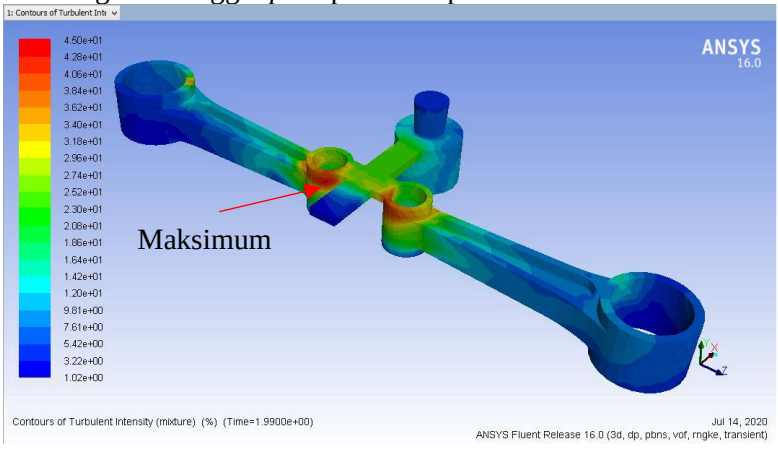


Gambar 4.3 Model 100 mm temperatur 715°C untuk intensitas turbulensi

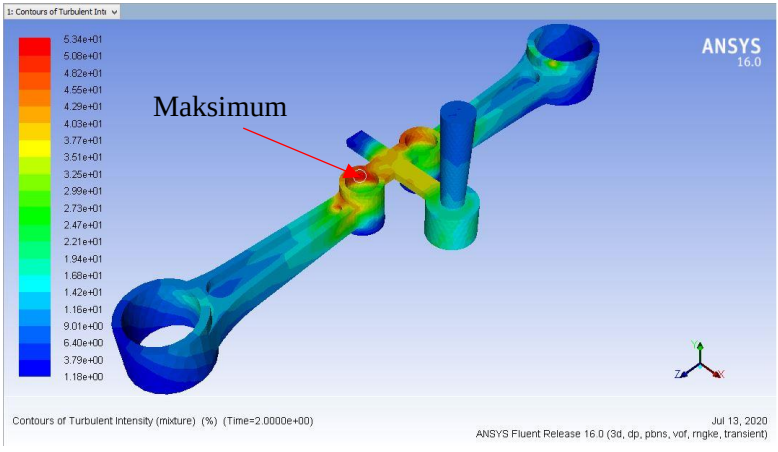
Tabel 4.1 Intensitas turbulensi maksimum pada temperatur 715°C

Nomor	Model	Nilai maksimum
1	20 mm	45,738 %
2	60 mm	54,818%
3	100 mm	69.819%

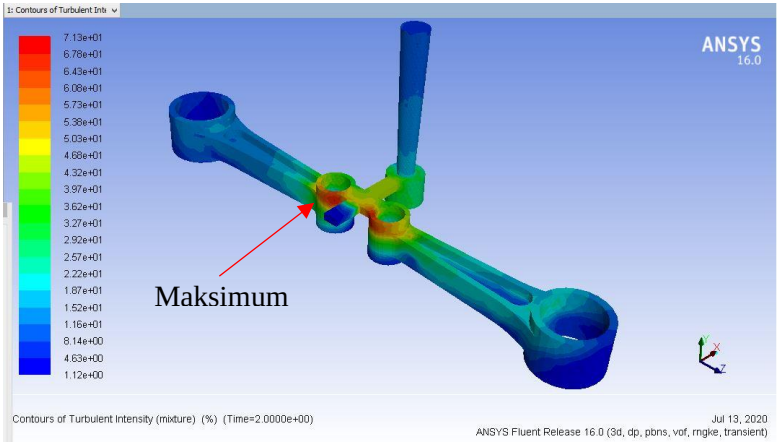
2. Pengaruh Tinggi *Sprue* pada Temperatur 740°C



Gambar 4.4 Model 20 mm 740°C untuk intensitas turbulensi



Gambar 4.5 Model 60 mm 740°C untuk intensitas turbulensi



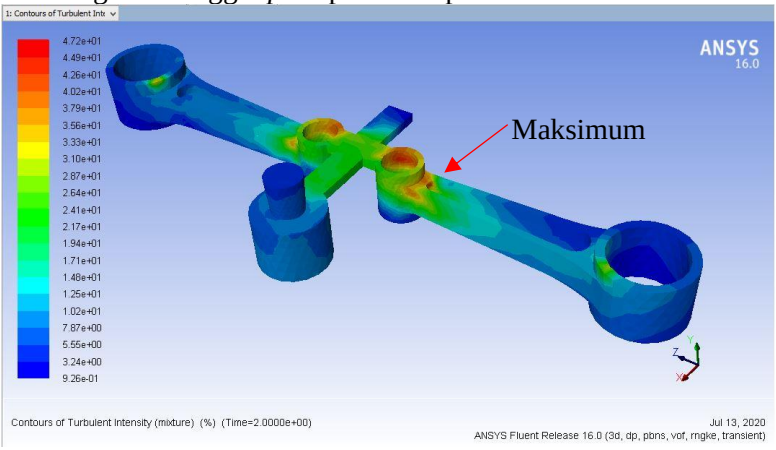
Gambar 4.6 Model 100 mm 740°C untuk intensitas turbulensi

Tabel 4.2 Intensitas turbulensi maksimum pada temperatur 740°C

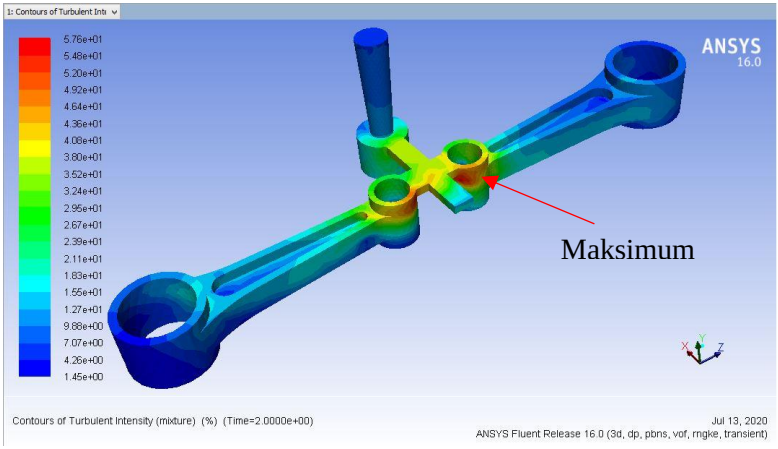
Nomor	Model	Nilai maksimum
1	20 mm	44,993%
2	60 mm	53,377%

3	100 mm	71,323%

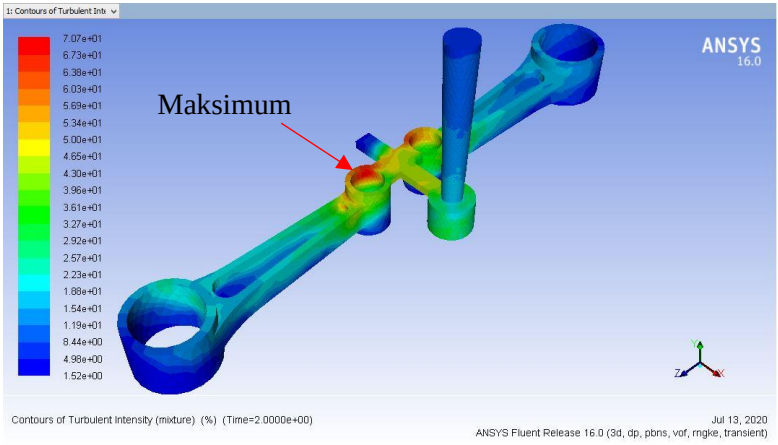
3. Pengaruh Tinggi *Sprue* pada Temperatur 765°C



Gambar 4.7 Model 20 mm 765°C untuk intensitas turbulensi



Gambar 4.8 Model 60 mm 765°C untuk intensitas turbulensi



Gambar 4.9 Model 100 mm 765°C untuk intensitas turbulensi

Tabel 4.3 Intensitas turbulensi maksimum pada temperatur 765°C

Nomor	Model	Nilai maksimum
1	20 mm	44,875%
2	60 mm	57,638%
3	100 mm	70.725%

4. Pengaruh Temperatur Penuangan pada Tinggi *Sprue* 20 mm

Tabel 4.4 Intensitas turbulensi maksimum pada tinggi *sprue* 20 mm

Nomor	Model	Nilai maksimum
1	715°C	45,738%
2	740°C	44,993%
3	765°C	44,875%

5. Pengaruh Temperatur Penuangan pada Tinggi *Sprue* 60 mm

Tabel 4.5 Intensitas turbulensi maksimum pada tinggi *sprue* 60 mm

Nomor	Model	Nilai maksimum
1	715°C	54,818%
2	740°C	53,377%
3	765°C	57,638%

6. Pengaruh Temperatur Penuangan pada Tinggi *Sprue* 100 mm

Tabel 4.6 Intensitas turbulensi maksimum pada tinggi *sprue* 100 mm

Nomor	Model	Nilai maksimum
1	715°C	69,819%
2	740°C	71,323%
3	765°C	70,725%

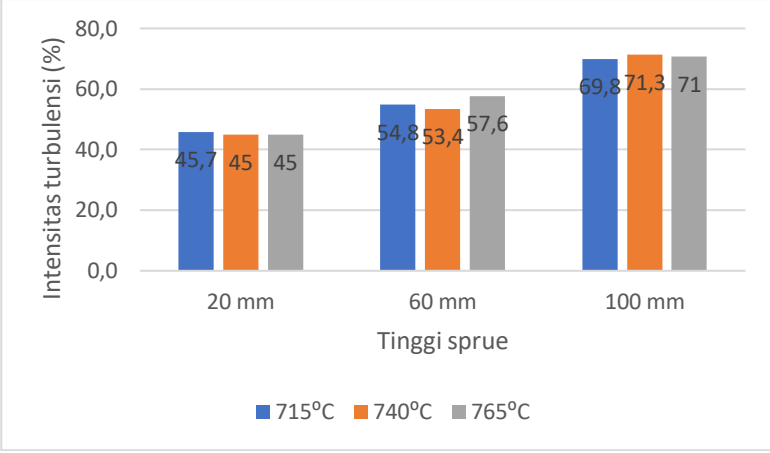
4.1.2 Pembahasan

Dari Gambar 4.1-4.9 dan Tabel 4.1-4.6 dibuatlah grafik pada Gambar 4.10 untuk memudahkan dalam membandingkan antar model. Gambar 4.10 menunjukkan semakin besar tinggi *sprue*, semakin besar pula intensitas turbulensi yang terjadi. Hal ini terjadi karena semakin besar tinggi *sprue* maka semakin besar pula energi potensial yang tersedia, menyebabkan kecepatan aliran yang dihasilkan semakin besar. Kecepatan aliran besar menyebabkan fluktuasi kecepatan semakin besar sehingga intensitas turbulensi juga meningkat, sesuai dengan Persamaan 4.1 bahwa intensitas turbulensi sebanding dengan fluktuasi kecepatan aliran.

$$I = \frac{\sqrt{u'^2}}{U} \quad \text{.....(4.1)}$$

Dengan $u'^2 = \left(\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} u'^2 dt\right)^{1/2}$ dan U adalah rata-rata keepatan. Sehingga intensitas turbulensi bergantung pada fluktuasi

kecepatan dan rata-ratanya. Berdasarkan grafik pada Gambar 4.10, variabel yang menghasilkan intensitas turbulensi terkecil adalah tinggi *sprue* 20 mm dengan temperatur penuangan 740°C dan 765°C.



Gambar 4.10 Grafik intensitas turbulensi

Pengaruh temperatur terhadap intensitas turbulensi pada simulasi ini menghasilkan pola yang bervariasi. Bertambahnya temperatur menyebabkan bertambah pula energi kinetik molekul. Peningkatan energi kinetik menyebabkan peningkatan kecepatan. Dalam Persamaan 4.1 di atas, disebutkan bahwa intensitas turbulensi dipengaruhi oleh fluktuasi kecepatan dan rata-rata kecepatan. Perubahan kecepatan yang terjadi menyebabkan perubahan dua variabel tersebut. Sehingga tidak dapat ditinjau dari satu variabel saja. Sifat aliran bisa juga ditentukan dari tegangan geser yang terjadi. Berdasarkan Persamaan 4.2 berikut ini, sifat aliran mempengaruhi tegangan geser yang terjadi.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} - \rho u' v' = \tau_{lam} + \tau_{turb} \quad \text{.....(4.2)}$$

Dari Persamaan 4.2 dapat dilihat bahwa tegangan geser yang terjadi pada aliran turbulen lebih besar daripada aliran laminar. Pada simulasi ini telah dimodelkan bahwa aliran yang terjadi adalah turbulen. Terlihat dari Persamaan 4.2 bahwa tegangan geser

di dalam aliran turbulen tidak semata-mata sebanding dengan gradien dari kecepatan rata-rata menurut waktu. Tetapi tegangan geser tersebut juga mengandung kontribusi dari fluktuasi acak komponen-komponen x dan y dari kecepatan.

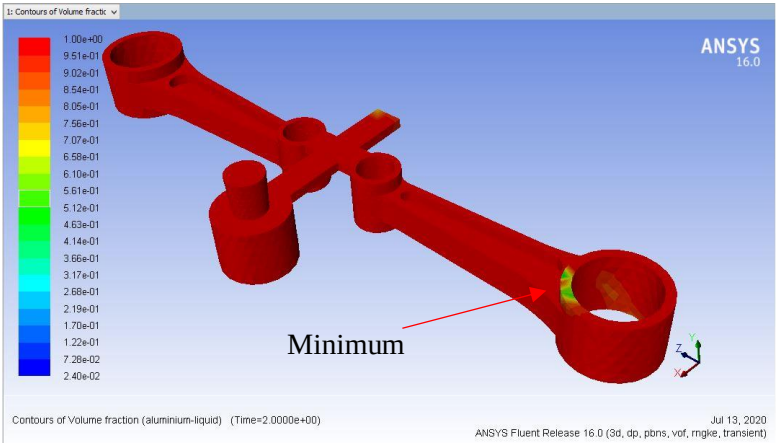
4.2 Pola Fraksi Volume

Fraksi volume yang dimaksud adalah fraksi volume aluminium cair di dalam cetakan. Pola alir ini berguna untuk mengetahui fraksi volume udara yang terjebak di dalam coran. Pengamatan yang dilakukan adalah membandingkan nilai minimum fraksi volume logam pada masing-masing hasil simulasi.

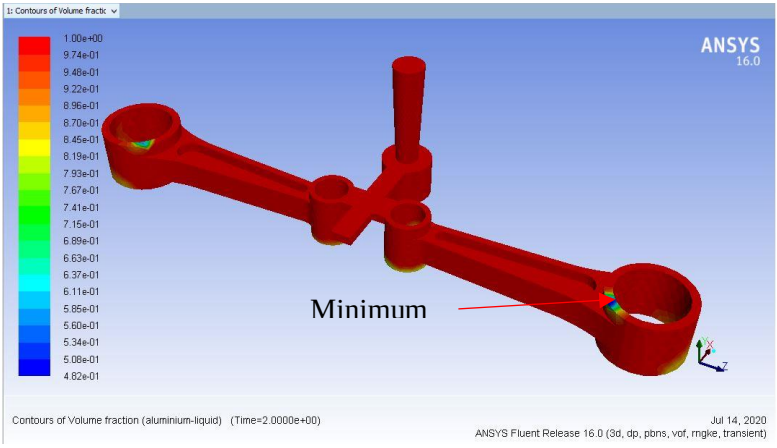
4.2.1 Hasil Simulasi

Simulasi ini menggunakan model multifasa yaitu bahwa pada objek pengamatan terdapat fasa lebih dari satu. Fasa yang digunakan adalah berupa aluminium cair dengan udara. Fraksi volume yang ditampilkan adalah fraksi volume aluminium cair. Nilai fraksi volume adalah dari nol sampai satu. Dengan kata lain, apabila fraksi volume aluminium cair bernilai 0 maka pada daerah tersebut hanya terdapat udara. Hasil simulasi ditampilkan pada Gambar 4.11-4.19 di bawah ini. Untuk memudahkan perbandingan maka dibuat juga Tabel 4.7-4.12 dengan membuat salah satu variabel bernilai konstan.

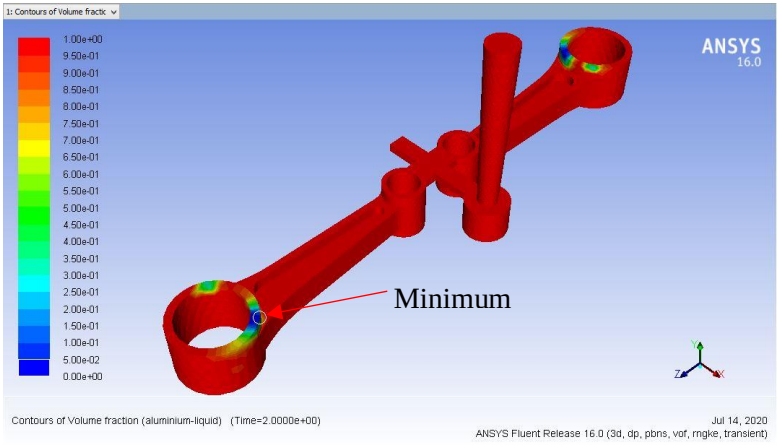
1. Pengaruh Tinggi *Sprue* pada Temperatur 715°C



Gambar 4.11 Model 20 mm 715°C untuk fraksi volume



Gambar 4.12 Model 60 mm 715°C untuk fraksi volume

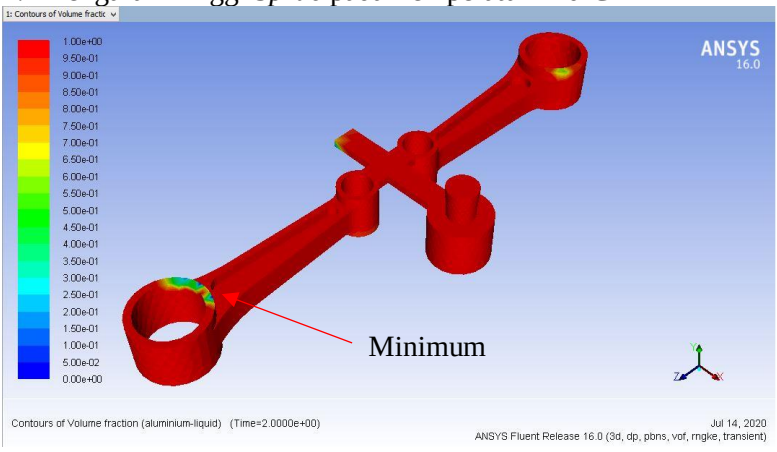


Gambar 4.13 Model 100 mm 715°C untuk fraksi volume

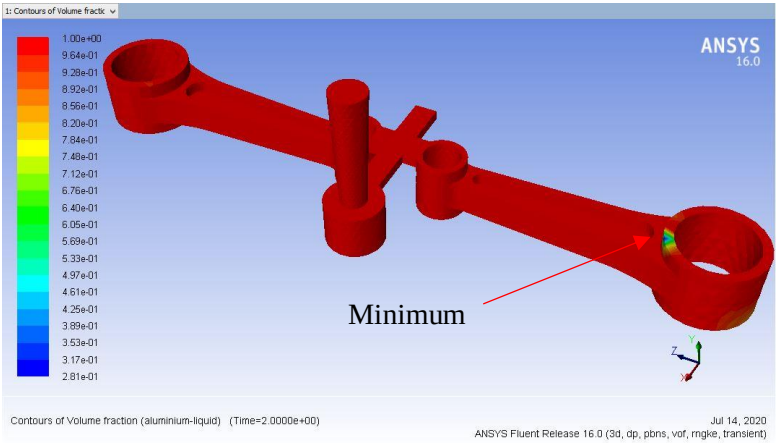
Tabel 4.7 Fraksi volume maksimum pada temperatur 715°C

Nomor	Model	Nilai minimum
1	20 mm	0,512
2	60 mm	0,482
3	100 mm	0

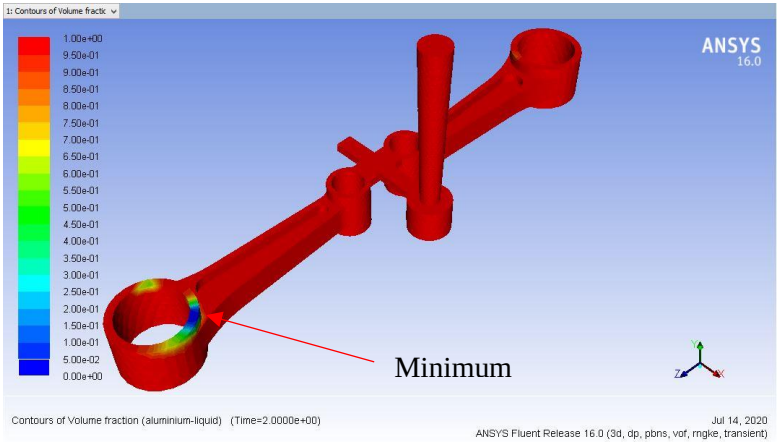
2. Pengaruh Tinggi *Sprue* pada Temperatur 740°C



Gambar 4.14 Model 20 mm 740°C untuk fraksi volume



Gambar 4.15 Model 60 mm 740°C untuk fraksi volume

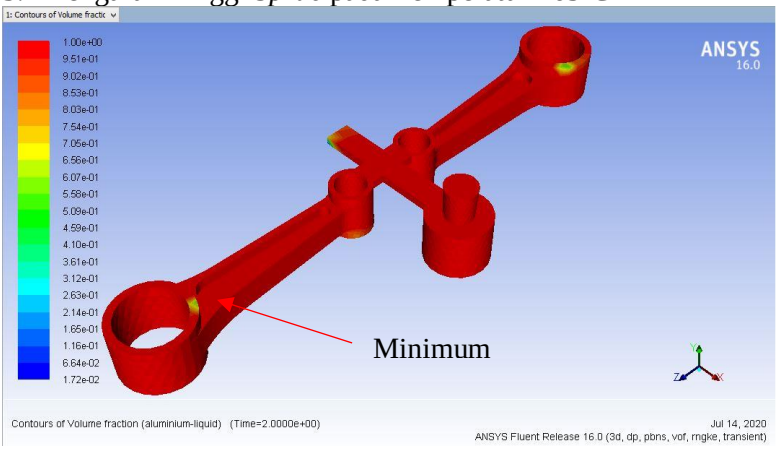


Gambar 4.16 Model 100 mm 740°C untuk fraksi volume

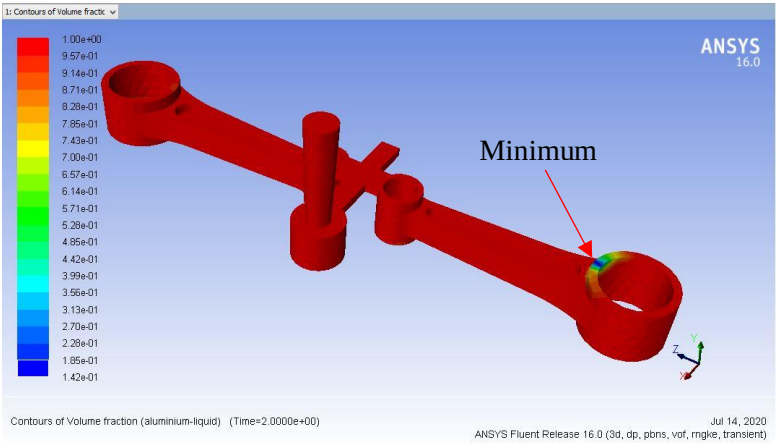
Tabel 4.8 Fraksi volume maksimum pada temperatur 740°C

Nomor	Model	Nilai minimum
1	20 mm	0
2	60 mm	0,281
3	100 mm	0

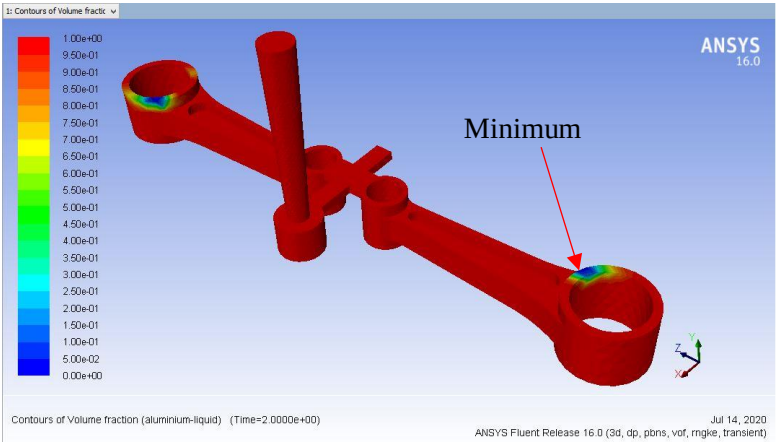
3. Pengaruh Tinggi *Sprue* pada Temperatur 765°C



Gambar 4.17 Model 20 mm 765°C untuk fraksi volume



Gambar 4.18 Model 60 mm 765°C untuk fraksi volume



Gambar 4.19 Model 100 mm 765°C untuk fraksi volume

Tabel 4.9 Fraksi volume maksimum pada temperatur 765°C

Nomor	Model	Nilai minimum
1	20 mm	0,558
2	60 mm	0,142
3	100 mm	0

4. Pengaruh Temperatur Penuangan pada Tinggi *Sprue* 20 mm

Tabel 4.10 Fraksi volume maksimum pada tinggi *sprue* 20 mm

Nomor	Model	Nilai minimum
1	715°C	0,512
2	740°C	0
3	765°C	0,558

5. Pengaruh Temperatur Penuangan pada Tinggi *Sprue* 60 mm

Tabel 4.11 Fraksi volume maksimum pada tinggi *sprue* 60 mm

Nomor	Model	Nilai minimum
1	715°C	0,482
2	740°C	0,281

3	765°C	0,142

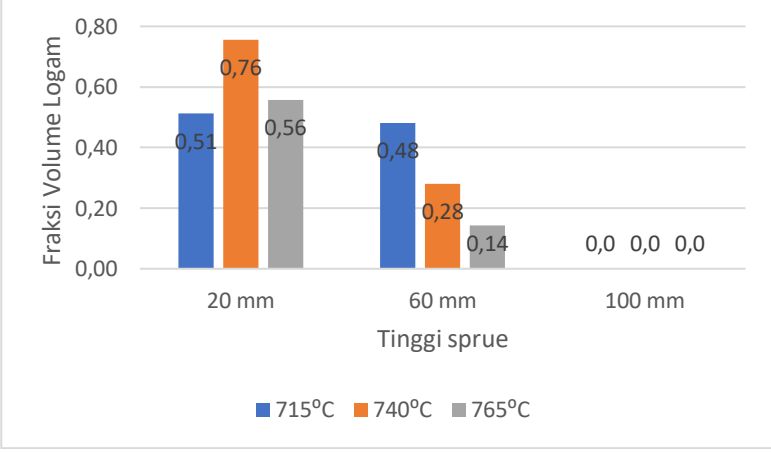
6. Pengaruh Temperatur Penuangan pada Tinggi *Sprue* 100 mm

Tabel 4.12 Fraksi volume maksimum pada tinggi *sprue* 100 mm

Nomor	Model	Nilai minimum
1	715°C	0
2	740°C	0
3	765°C	0

4.2.2 Pembahasan

Fraksi volume dapat digunakan untuk memperkirakan adanya udara yang terjebak dalam logam cair. Fraksi volume bernilai maksimum 1, sehingga apabila fraksi volume logam berjumlah 0,9 maka diperkirakan terdapat 0,1 udara yang terperangkap. Pada penelitian ini, hanya bagian yang mempunyai fraksi volume logam cair yang terendah untuk membandingkan antar variabel. Dari Gambar 4.11-4.19 dan Tabel 4.7-4.12 dibuatlah grafik pada Gambar 4.20 untuk memudahkan perbandingan.



Gambar 4.20 Grafik fraksi volume

Dari Gambar 4.20, Fraksi volume logam cenderung menurun seiring dengan bertambahnya tinggi *sprue*. Bertambahnya tinggi *sprue* menyebabkan meningkatnya aliran kecepatan logam. Kecepatan aliran yang tinggi beakibat meningkatnya intensitas turbulensi. Intensitas turbulensi tinggi bisa membentuk ruang udara di dalam logam cair. Pada tinggi *sprue* 60 mm, peningkatan temperatur penuangan menyebabkan penurunan fraksi volume logam yang terisi dalam cetakan. Hal ini terjadi karena peningkatan energi kinetik. Energi kinetik tinggi menyebabkan kecepatan aliran meningkat, sehingga intensitas turbulensi juga meningkat. Intensitas turbulensi tinggi dapat menimbulkan ruang udara dalam logam cair. Pada tinggi *sprue* 20 mm fraksi volume menurun ketika dari temperatur 740 ^{o}C ke 765°C dan meningkat dari temperatur 715^{0}C ke 740 ^{o}C dan 765 ^{o}C. Selain menimbulkan ruang udara pada aliran kecepatan tinggi, namun bisa juga menyebabkan rongga cetakan lebih cepat terisi sehingga tidak memberikan waktu yang cukup untuk udara memasuki rongga cetakan.

Pada tinggi *sprue* 100 mm, terdapat daerah yang sepenuhnya terisi udara dan terjadi pada ketiga variabel temperatur. Hal ini terjadi karena tinggi *sprue* yang besar dapat menyebabkan kecepatan aliran yang tinggi. Intensitas turbulensi pada tinggi *sprue* 100 mm adalah yang paling besar, sehingga kemungkinan timbulnya ruang udara dalam cairan semakin besar. Menurut (Das, et al. 2019), fraksi volume udara minium yang dapat menyebabkan cacat pengecoran adalah 0,5. Maka variabel hasil simulasi pengecoran yang terhindar dari cacat akibat udara yang terjebak dalam cetakan adalah tinggi *sprue* 20 mm dengan temperatur penuangan 715°C, 740°C, dan 765°C. Perangkat lunak ANSYS Fluent menghitung fraksi volume berdasarkan Persamaan 4.3.

$$\frac{1}{\rho_q}\left[\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_q\rho_q\right)+\nabla\left(\alpha_q\rho_q v_q\right)\right]=S_{aq}+\sum_{p=1}^{n}\left(m_{pq}-m_{qp}\right) \ldots(4.3)$$

Dimana fraksi volume ditunjukkan simbol α, massa jenis ρ, dan kecepatan v. Secara umum ruas kanan bernilai nol karena tidak memodelkan transfer massa. Karena nilai dari massa jenis adalah konstan maka yang berpengaruh terhadap perubahan fraksi

volume adalah kecepatan aliran. Dalam persamaan momentum untuk multifasa terdapat hubungan antara kecepatan dengan temperatur yaitu pada Persamaan 4.4 berikut ini.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla(\rho v^2) = -\nabla p + \nabla[\mu(\nabla v + \nabla v^T)] + \rho g + F \text{.....}(4.4)$$

Di samping itu, peningkatan temperatur mampu meningkatkan kelarutan aluminium terhadap hidrogen. Menurut (Tiryakioglu 2020) hidrogen terserap ke dalam aluminium cair karena adanya dekomposisi uap air dan oksidasi aluminium sesuai Persamaan reaksi 4.5

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$$

$$3H_2O + 2Al \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2 \text{ .....}(4.5)$$

Kelarutan adalah jumlah maksimum zat yang dapat dilarutkan di dalam pelarut pada temperatur tertentu. Kelarutan hidrogen di dalam aluminium cair dapat dihitung menggunakan Persamaan 4.6 berikut.

$$S_{eq[H]} = S_{o[H]}.\sqrt{P}.e^{-\frac{\Delta H}{RT}} \text{.....}(4.6)$$

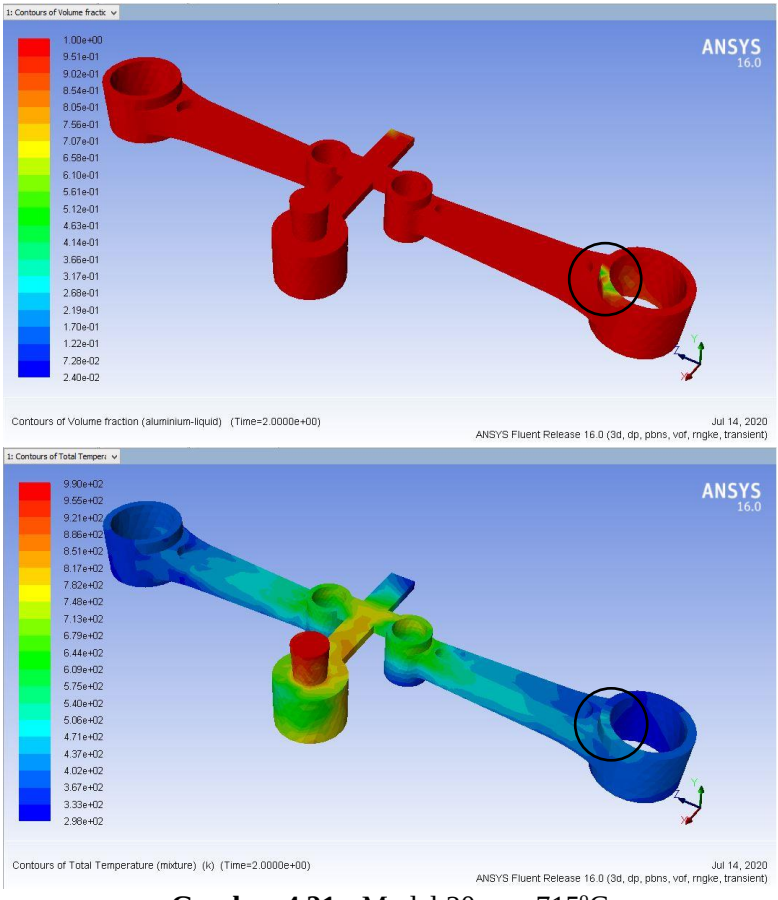
Dimana P adalah tekanan, T adalah temperatur absolut, $S_{o[H]}$ adalah konstanta kelarutan, ΔH adalah entalpi pembentukan larutan hidrogen, dan R adalah konstanta gas. Dapat dilihat pada persaman tersebut bahwa apabila temperatur mengalami kenaikan maka entalpi pembentukan larutan hidrogen pada temperatur tersebut semakin besar. Entalpi pembentukan larutan hidrogen semakin tinggi menyebabkan kelarutan hidrogen dalam aluminium juga meningkat.

4.3 Pola Distribusi Temperatur

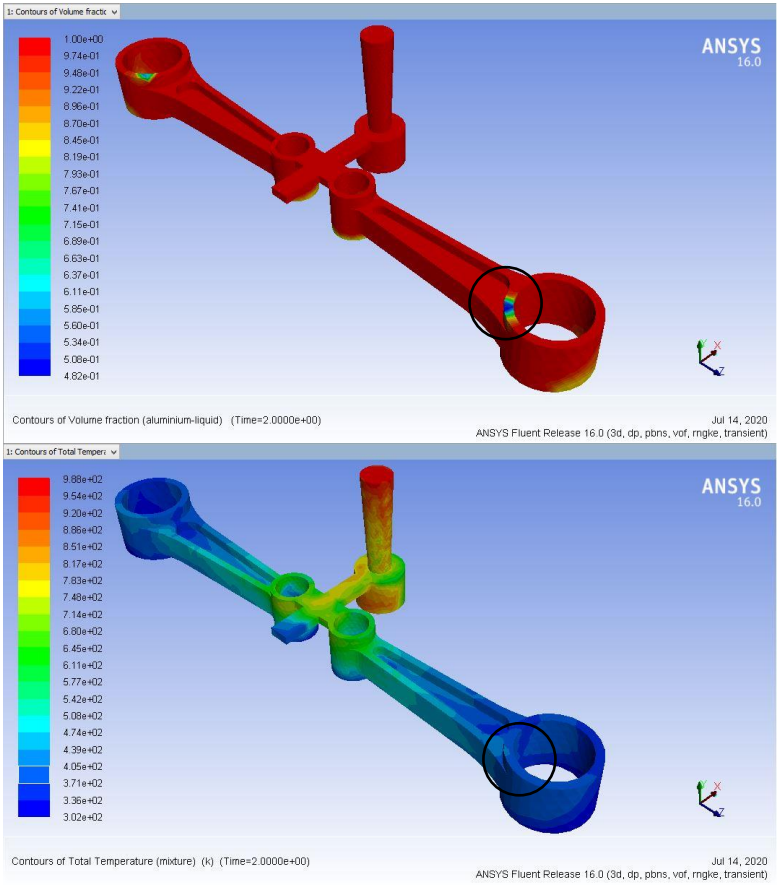
Gambar pola distribusi temperatur dibandingkan dengan pola fraksi volume untuk mengetahui hubungan temperatur dengan kelarutan udara dalam logam cair. Pola temperatur yang diamati adalah pada daerah yang memiliki fraksi volume udara terbesar.

4.3.1 Hasil Simulasi

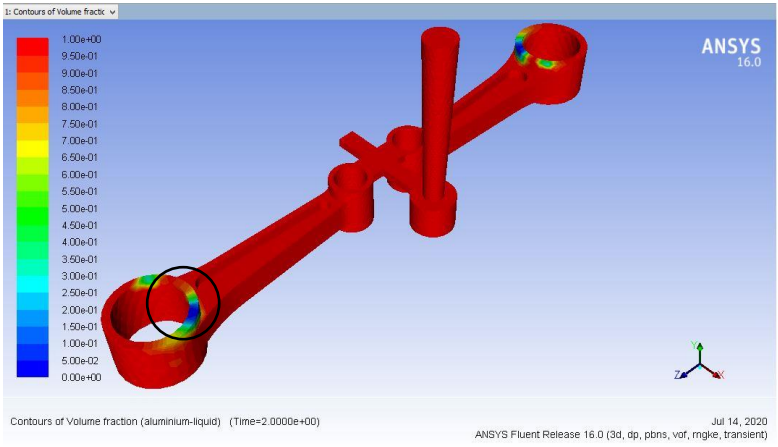
Hasil simulasi ditampilkan dalam Gambar 4.21-4.29 untuk masing-masing model. Kemudian nilai dari distribusi temperatur dimasukkan dalam Tabel 4.13.

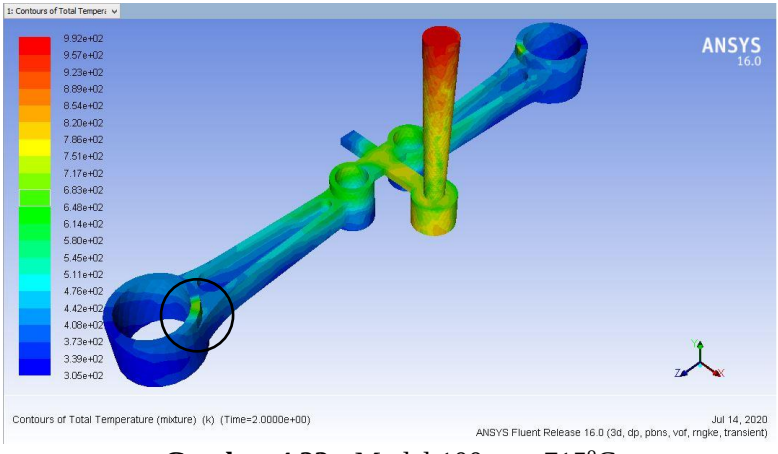


Gambar 4.21 Model 20 mm 715°C

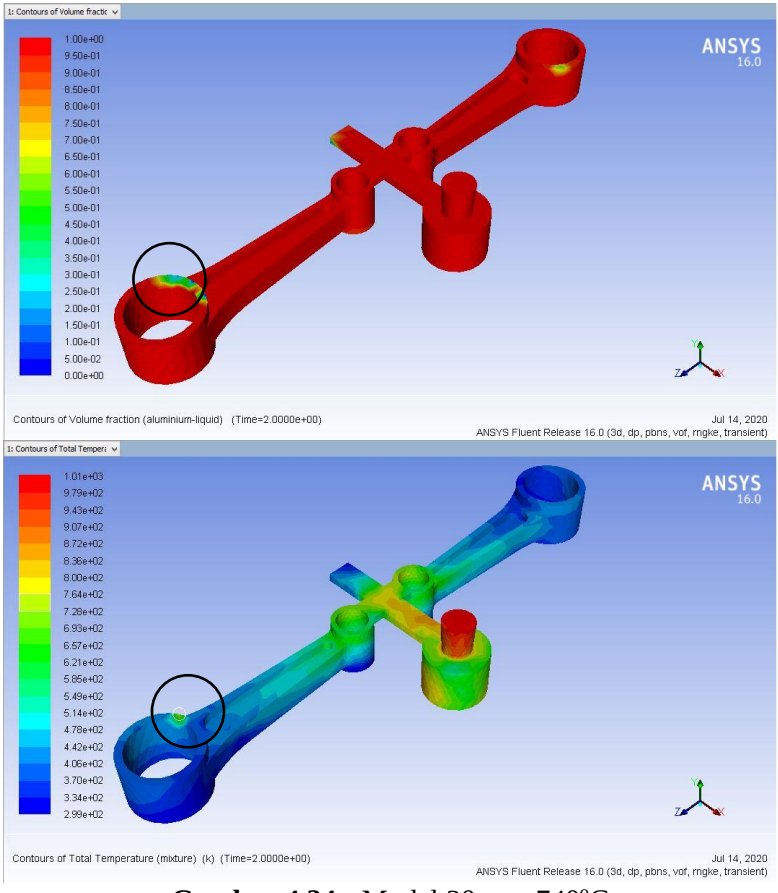


Gambar 4.22 Model 60 mm 715°C

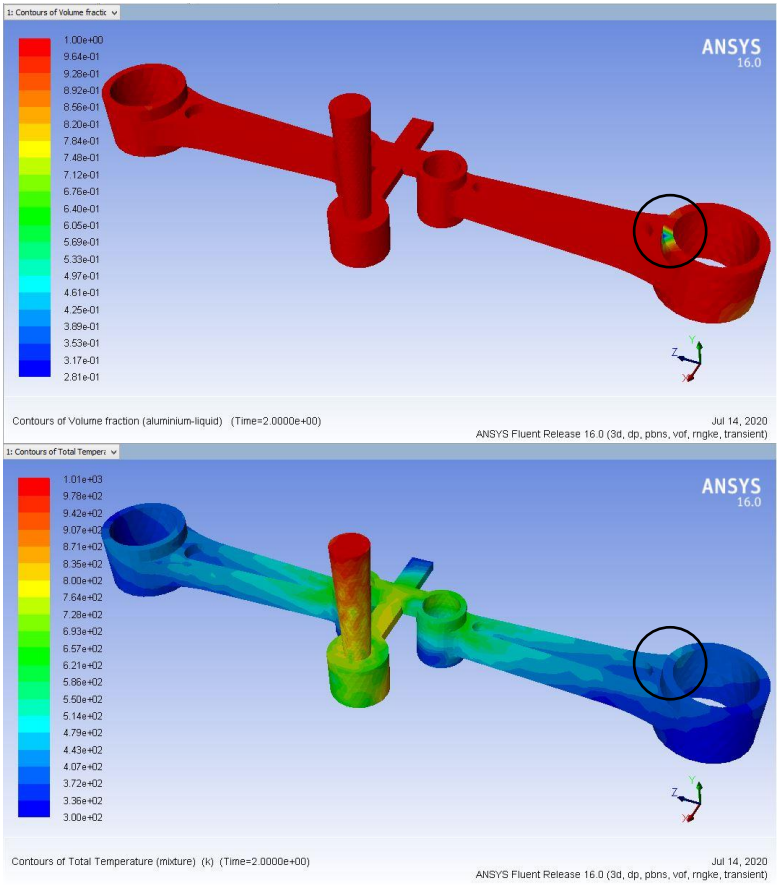




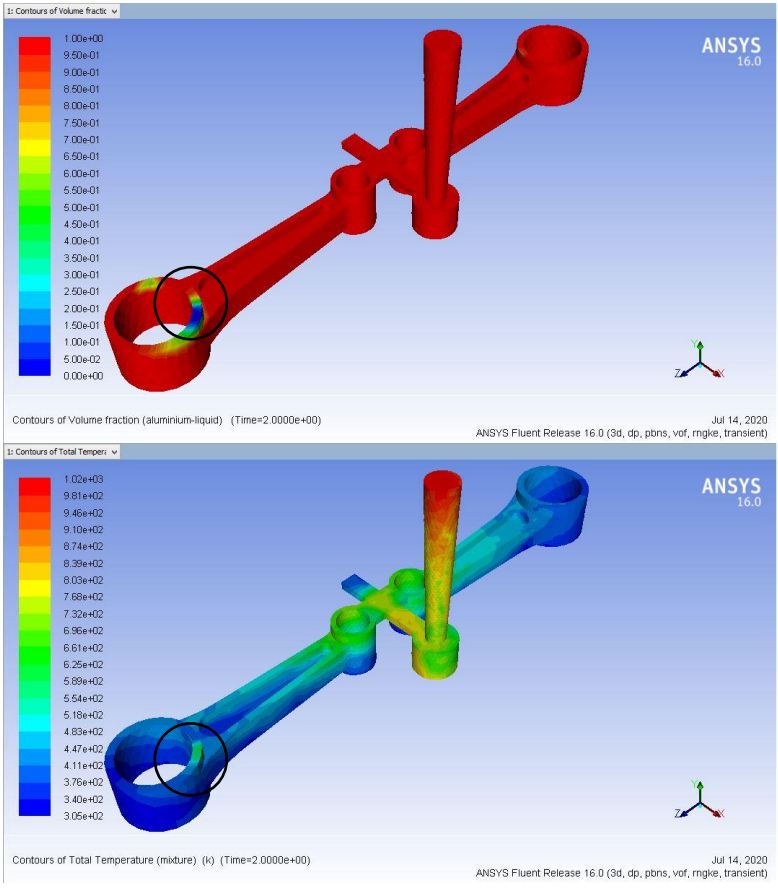
Gambar 4.23 Model 100 mm 715°C



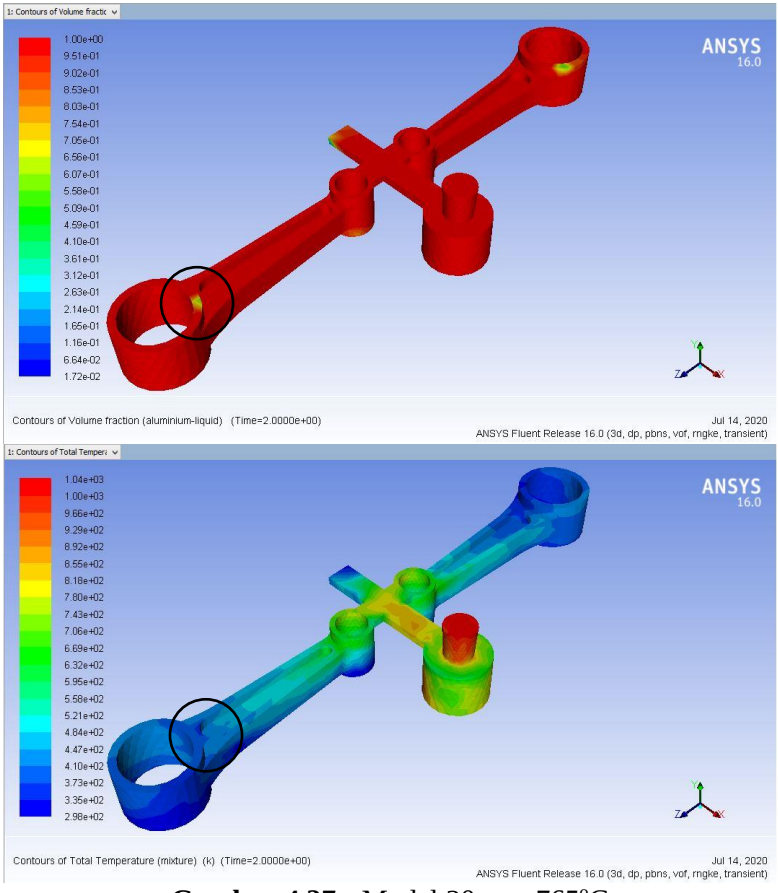
Gambar 4.24 Model 20 mm 740°C



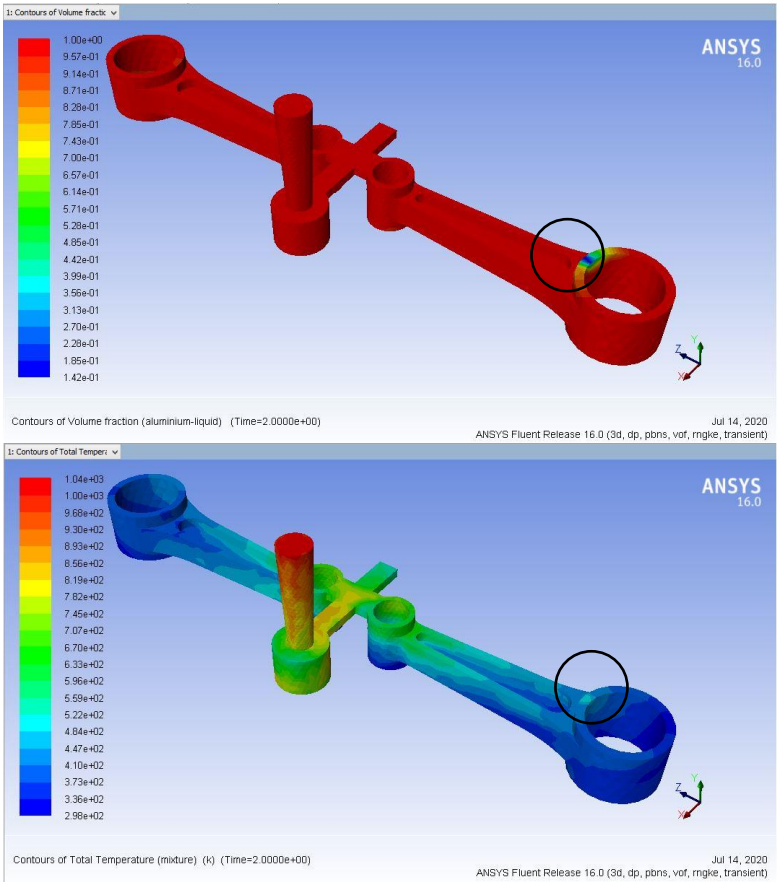
Gambar 4.25 Model 60 mm 740°C



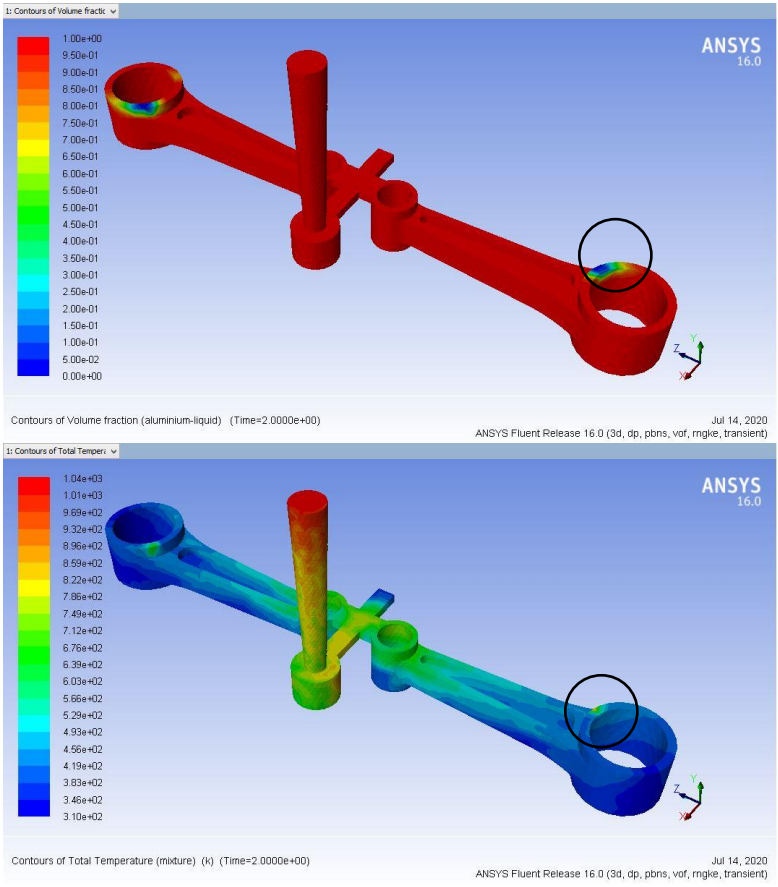
Gambar 4.26 Model 100 mm 740°C



Gambar 4.27 Model 20 mm 765°C



Gambar 4.28 Model 60 mm 765°C



Gambar 4.29 Model 100 mm 765°C

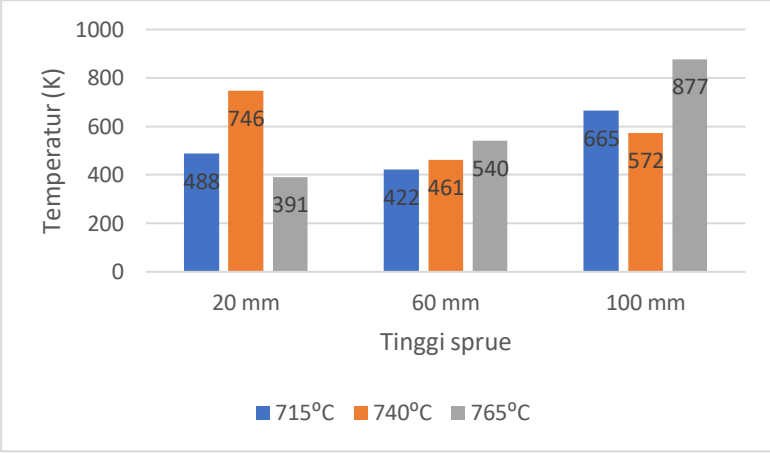
Tabel 4.13 Nilai temperatur pada daerah fraksi volume aluminium terendah

Model	Fraksi Volume	Temperatur (K)
20 mm 715°C	0,51	471,181-505,755
60 mm 715°C	0,48	404,998-439,32
100 mm 715°C	0	648,217-682,562
20 mm 740°C	0	728,434-764,247

60 mm 740°C	0,28	443,023-478,68
100 mm 740°C	0	553,874-589,485
20 mm 765°C	0,56	372,56-409,639
60 mm 765°C	0,14	521,513-558,691
100 mm 765°C	0	858,885-895,505

4.3.2 Pembahasan

Secara umum, pola distribusi temperatur adalah *inlet* memiliki temperatur paling tinggi kemudian berangsur menurun menuju daerah *outlet*. Hal ini terjadi karena pada *inlet* seolah-olah logam cair terus masuk dengan temperatur awal yang sudah ditetapkan. Pada daerah *outlet* lebih dingin karena telah terjadi karena panas dari logam ada yang berpindah pada dinding cetakan. Temperatur dalam logam cair berhubungan dengan kelarutan logam terhadap udara. Pada persamaan 4.4 telah disebutkan bahwa kelarutan berbanding lurus dengan temperatur. Semakin tinggi temperatur maka semakin tinggi pula kelarutan logam terhadap udara. Untuk melihat bagaimana hubungan kelarutan dengan temperatur maka dibuatlah pengamatan antara fraksi volume udara di dalam aluminium cair dengan temperatur pada daerah tersebut. Pada tabel 4.14 terlihat bahwa fraksi volume udara terbesar yang larut yaitu 0, memiliki temperatur paling tinggi daripada lainnya yaitu antara 553,874 K sampai 895,505 K. Sedangkan fraksi volume udara lebih dari 0 memiliki temperatur antara 372,56 K sampai 558,691 K. Untuk memudahkan pengamatan maka nilai pada Tabel 4.14 dibuat grafik pada Gambar 4.30 berikut.



Gambar 4.30 Grafik distribusi temperatur

Pada Gambar 4.30 tersebut, tinggi *sprue* 100 mm memiliki temperatur tertinggi dan menyebabkan fraksi volume aluminium cair terkecil yaitu 0. Hal ini terjadi juga pada model tinggi *sprue* 20 mm dengan temperatur penuangan 740°C. Fraksi volume udara minimum yang menyebabkan cacat adalah 0,5. Fraksi volume udara yang aman terjadi pada tinggi *sprue* 20 mm dengan temperatur penuangan 715°C dan 765°C. Dapat dilihat bahwa model tinggi *sprue* 20 mm dengan temperatur penuangan 765°C memiliki temperatur paling rendah. Pada tinggi *sprue* 60 mm terjadi peningkatan kelarutan udara seiring dengan meningkatnya temperatur penuangan. Hal ini ditunjukkan dari nilai fraksi volume aluminium cair yang menurun seiring bertambahnya temperatur penuangan. Nilai fraksi volume aluminium cair yaitu 0,48, 0,28, dan 0,14. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa peningkatan temperatur dalam logam mampu meningkatkan kelarutan logam terhadap udara.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian di atas dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Tinggi *sprue* mempunyai pengaruh terhadap intensitas turbulensi. Semakin besar tinggi *sprue* maka semakin besar kecepatan aliran logam cair, dengan demikian semakin besar pula intensitas turbulensi yang terjadi.
2. Tinggi *sprue* juga berpengaruh terhadap fraksi volume udara maksimum yang terperangkap dalam logam. Semakin besar tinggi *sprue* maka semakin besar kecepatan aliran logam, sehingga intensitas turbulensi juga meningkat. Hal ini menyebabkan adanya udara yang terperangkap dalam logam cair.
3. Temperatur penuangan mempunyai pengaruh yang bervairasi terhadap intensitas turbulensi. Variasi ini terjadi karena intensitas turbulensi dipengaruhi oleh dua hal yaitu rata-rata kecepatan dan fluktuasi kecepatan. Fluktuasi kecepatan ini sangat bervariasi dan merupakan variabel berdasarkan waktu.
4. Temperatur penuangan berpengaruh terhadap fraksi volume udara yang masuk ke aliran logam. Semakin tinggi temperatur penuangan, maka semakin besar fraksi volume udara yang masuk karena kelarutan logam terhadap udara meningkat. Hal ini dapat diamati dari pola distribusi temperatur pada daerah yang memiliki fraksi volume udara terbesar. Di mana fraksi volume udara besar memiliki temperatur besar pada daerah tersebut.
5. Berdasarkan simulasi ini, model yang memiliki intensitas turbulensi terkecil adalah tinggi *sprue* 20 mm dengan temperatur penuangan 740^0C dan 765^0C. Untuk fraksi volume udara terkecil yang masuk ke dalam rongga cetak terjadi pada model tinggi *sprue* 20 mm dengan temperatur penuangan 740^0C. Dengan mempertimbangkan dua variabel tersebut, maka model pengecoran *connecting rod* untuk mesin motor

150 cc yang paling baik adalah menggunakan tinggi *sprue* 20 mm dengan temperatur penuangan 740^0C

5.2 Saran

Dari penelitian ini penulis dapat menuliskatn beberapa saran sebagai berikut:

1. Referensi perhitungan *gating system* sebaiknya diperluas lagi, tentunya masih banyak metode perhitungan lain.
2. Pengaturan parameter dan penyelesaian pada perangkat lunak ANSYS Fluent sebaiknya lebih diperjelas mengingat hal tersebut mempengaruhi hasil simulasi.
3. Penggunaan cetakan sebaiknya dilakukan agar mendapat hasil simulasi yang lebih akurat seperti pengecoran sebenarnya.
4. Hasil simulasi yang diambil seharusnya ditambah berupa persebaran bukan hanya titik maksimum karena, persebaran akan lebih menggambarkan keadaan sebenarnya.
5. Hasil simulasi tiap perubahan waktu sebaiknya dianalisis untuk mendapatkan analisis lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

Adianta, Andri Willy. 2018. "Studi Fluiditas dan Karakteristik Aliran pada Pengecoran Al-Si Alloy Menggunakan Simulasi Numerik." *TALENTA Conference Series:Energy Engineering Volume 1 Issue 1* 7.

Aishwarya, S., dan E. V. V. Ramanamurthy. 2015. "Design and Ooptimization of Connecting Rod for 4–Stroke Petrol Engine by Using Finite Element Analysis." *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences Vol. 10, No. 11* 4995-4999.

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

ASM International. 1990. *ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.* United States of America: ASM Handbook.

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

Dai, X., X. Yang, J. Campbell, dan J. Wood. 2003. "Effects of Runner System Design on the Mechanical Strength of Al-7Si-Mg Alloy Castings." *Materials Science and Engineering A354* 316-318.

Das, Prosenjit, Bikash Bhuniya, K. Sudip Samanta, dan Pradip Dutta. 2019. "Studies on Die Filling of A356 Al Alloy and Development of a Steering Knuckle Component Using Rheo Pressure Die Casting System." *Journal of Materials Processing Tech.* 300.

Karumuri, Srikanth, Terefe Jima, Masresha Adasho, dan Veeranjaneyulu Itha. 2017. "Aluminium Casting Tool Design for Connecting Rod Using 8 Cavities." *International Journal of Engineering Science Invention Research & Development, Vol. III, Issue XI* 717.

Klemens, A., Rahangmetan, Cipto, F. Sariman, dan M. Syahid. 2019. "Study on Effect of Temperature Smelting and

Pouring to Mechanical Properties Aluminum 7075." *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 343* 1-5.

Li, Yuandong, dan Hongwei Zhou. 2020. "Effects of Pouring Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of the A356 Aluminum Alloy Die Castings." *Mat. Res. vol.23 no.1 São Carlos.*

Munson, Bruce R., Donald F. Young, dan Theodore H. Okiishi. 2003. *Mekanika Fluida.* Jakarta: Erlangga.

Murray, J. L. 1983. "The Al-Zn (Aluminum-Zinc) System." *Bulletin of Alloy Phase Diagrams Vol. 4 No. 1* 55-60.

Murthi, Gopinath. 2018. *What are the Defects in the Casting?* 20 November. https://eligoprojects.com/what-are-the-defects-in-casting/.

Ochulor, E. F., S. O. Adeosun, dan S. A. Balogun. 2015. "Effect of Gating Sprue Height on Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron." *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering Vol. 9, No. 2* 360-367.

Plancak, Miroslav, Dragisa Vilotic, Ognjan Luzanin, Igor Kacmarcik, Aljosa Ivanisavic, Dejan Movrin, Plavka Skakun, dan Milutinovic Mladomir. 2013. "A Review of the Possibilities to Fabricate Connecting Rods." *International Journal of Engineering, Tome XI-Fascicule 2(ISSN 1584-2665)* 169.

Pratama, Rizal Mahendra, dan Soeharto. 2012. "Studi Eksperimen Pengaruh Jenis Saluran pada Aluminium Sand Casting terhadap Porositas Produk Toroidal Piston." *Jurnal Teknik ITS Vol. 1, No. 1, ISSN:2301-9271* 129.

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

Ramesh, B. T., Vinayaka Koppad, dan Hemantha Raju T. 2017. "Analysis and Optimization of Connecting Rod with Different Materials." *World Journal of Research and Review (WJRR) Volume-4, Issue-1* 38.

Rao, M. Srinivas, A. Girish Kumar, dan Dr. D. Vijayaganapathy. 2018. "Design and Analysis of Al 7075 Connecting Rod."

International Journal of Pure and Applied Mathematics Volume 118 No. 24 4-5.

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

Reikher, Alexandre, dan Michael R. Barkhudarov. 2007. *Casting : An Analytical Approach.* Manchester: Springer-Verlag London Limited.

Sente Software Ltd. Version 7.0.0. *JMatPro the Materials Property Simulation Package* . Guildford.

Sidhpara, Ankit B., Vashim I. Kureshi, dan Pinank A. Patel. 2013. "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* 1516-1523.

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

Singh, Vikas, Sumit Kr. Verma, dan Harish Chandra Ray. 2017. "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* 1156-1158.

Technologies, Office of Industrial. 2000. "Mold Materials For Permanent Molding of Alluminium Alloys." *Metal Casting Project Fact Sheet.*

Tiryakioglu, Murat. 2020. "Solubility of Hydrogen in Liquid Aluminium: Reanalysis of Available Data." *Intl. J. Cast Metals Res. v. 32* 1.

Xuan-xuan, Yuwen, Chen Ling, dan Han Yi-jie. 2012. "Numerical Simulation of Casting Filling Process Based on Fluent." *Energy Procedia 17* 1864-1871.

(*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*

Perhitungan waktu tuang

$t = K_3 \sqrt[3]{W'}$
$= 1{,}85 \sqrt[3]{0{,}252}$
$t = 1{,}169$ s

Perhitungan massa logam yang dibutuhkan

Massa logam $= \dfrac{massa\ benda\ cor}{casting\ yield}$
$= \dfrac{0{,}252}{0{,}6}$
Massa logam $= 0{,}42$ kg

Perhitungan kecepatan tuang

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

= $\frac{0{,}42\ kg}{1{,}169\ s}$

Kecepatan tuang = 0,359 kg/s

Perhitungan tinggi efektif *sprue*

H = $h - \frac{p^2}{2c}$

= $100 - \frac{15{,}5^2}{2 \times 31}$

= 100-3,875

H = 96,125 mm

Perhitungan luas penampang *choke*

A = $\frac{W}{d \times t \times C \times \sqrt{2 \times g \times H}}$

= $\frac{0{,}42}{2{,}81 \times 10^{-6} \times 1{,}169 \times 0{,}9 \times \sqrt{2 \times 9800 \times 96{,}125}}$

= $\frac{0{,}42}{2{,}956 \times 10^{-6} \times \sqrt{1884050}}$

= $\frac{0{,}42}{4057{,}426 \times 10^{-6}}$

= 414,056 mm^2

Perhitungan diameter *choke*

D = $\sqrt{\frac{4A}{\pi}}$

= $\sqrt{\frac{4 \times 414{,}056}{\pi}}$

= $\sqrt{527{,}192}$

D = 22,961 mm

Perhitungan luas penampang *runner*

Luas *runner* = $2 \times A$

= $2 \times 414{,}056$

Luas *runner* = 828,112 mm^2

Perhitungan *sprue base well*

Luas = $5 \times A$

= $5 \times 414{,}056\ mm^2$

Luas = 2070,28 mm^2

Diameter = $\sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}}$

= $\sqrt{\frac{4 \times 2070{,}28\ mm^2}{\pi}}$

= $\sqrt{2635{,}962}$

Diameter = 51,342 mm

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

= $\frac{51{,}342\ mm}{2{,}5}$

= 20,537 mm

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

= $\frac{828{,}112\ mm^2}{20{,}537\ mm}$

Kedalaman = 40,323 mm

Perhitungan *runner extension*

Panjang = $2 \times lebar$

= $2 \times 20{,}537\ mm$

Panjang = 41,074 mm

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam penyusunan skripsi ini tidak terlepas dukungan dari berbagai pihak. Peneliti secara khusus mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu. Peneliti banyak menerima bimbingan, petunjuk dan bantuan serta dorongan dari berbagai pihak baik yang bersifat moral maupun material.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT dengan segala rahmat serta karunia-Nya yang memberikan kekuattan bagi peneliti dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Kepada kedua orang tua tercinta yang selama ini telah membantu peneliti dalam bentuk perhatian, kasih sayang, semangat, serta doa yang tidak henti-hentinya mengalir demi kelancaran dan kesuksesan peneliti dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Kemudian terima kasih banyak untuk kakak tercinta Heri Andriyani Anwar, Eva Permata Sari, dan adik tercinta Afida Rahmatika Anwar yang telah memberikan dukungan serta perhatian kepada peneliti.
3. Kepada Bapak Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan bimbingan, arahan, dorongan, dan semangat kepada peneliti, sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.
4. Kepada Mavindra Ramadhani, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan dukungan, perhatian, semangat dari awal menjadi mahasiswa hingga saat ini.
5. Segenap dosen dan seluruh staf akademik yang selalu membantu dalam memberikan fasilitas, ilmu, serta pendidikan pada peneliti hingga dapat menunjang dalam penyelesaian tugas akhir ini.
6. Teman-teman seperjuangan yang pernah tinggal satu kontrakan Tamam, Mar’i, iqbal, Yogatama, Naufal, Bobby, Ghozi, Dayyan, Adhy yang telah memberikan banyak

masukan serta dukungan kepada peneliti. Terima kasih karena pernah bermain dan berbincang-bincang banyak hal bersama

7. Serta masih banyak lagi pihak-pihak yang sangat berpengaruh dalam proses penyelesaian skripsi yang yang tidak bisa penelti sebutkan satu persatu

Semoga Allah SWT senantiasa membalas semua kebaikan yang telah diberikan yang telah diberikan. Semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi peneliti umumnya kepada para pembaca

Surabaya, 30 Juni 2020

Penulis

BIODATA PENULIS

Farid Miftahul Anwar, Dilahirkan di Kabupaten Tulungagung tepatnya di Dusun Jati Desa Mergayu Kecamatan Bandung pada Hari Senin tanggal 8 September 1997. Anak kedua dari tiga bersaudara pasangan dari Samsul Anwar dan Tri Handayani. Peneliti menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di MIM Plus Suwaru di Kecamatan Bandung Kabupaten Tulungagung pada tahun 2010. Pada tahun itu juga peneliti melanjutkan Pendidikan di MTs Negeri Bandung Kabupaten Tulungagung dan tamat pada tahun 2013. Kemudian melanjutkan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Trenggalek pada tahun 2013 dan selesai pada tahun 2016. Pada tahun 2016 peneliti melanjutkan pendidikan di perguruan tinggi negeri, tepatnya di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem pada Departemen Teknik Material dan Metalurgi. Peneliti pernah mengikuti kegiatan Kerja Praktek di PT. Pindad (Persero) pada bagian Tempa, Cor, dan Alat Perkerataapian dengan penelitian mengenai pembuatan *shoulder* penambat rel kereta api jenis *E-clip*. Mempertimbangkan dari kegiatan Kerja Praktek, maka peneliti memilih tema penelitian Tugas Akhir yaitu pengecoran dengan metode numerik Peneliti menyelesaikan kuliah strata satu (S1) pada tahun 2020. Peneliti dapat dihubungi melalui email farid16@mhs.mat-eng.its.ac.id atau nomor *handphone* +6285234459649.