



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENINGKATAN *YIELD* DAN SIFAT MEKANIS
PRODUK COR *CYLINDER HEAD* PADUAN ALUMINIUM
MELALUI PERBAIKAN *CASTING DESIGN* DAN
PENAMBAHAN TITANIUM *FLUX***

TESIS

GIRI WAHYU ALAM

1006735800

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENINGKATAN *YIELD* DAN SIFAT MEKANIS
PRODUK COR *CYLINDER HEAD* PADUAN ALUMINIUM
MELALUI PERBAIKAN *CASTING DESIGN* DAN
PENAMBAHAN TITANIUM *FLUX***

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik

GIRI WAHYU ALAM

1006735800

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar**

Nama : Giri Wahyu Alam

NPM : 1006735800

Tanda Tangan :



Tanggal : 19 Juli 2012

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Giri Wahyu Alam
NPM : 1006735800
Program Studi : S-2 Teknik Metalurgi dan Material
Judul Tesis : Peningkatan *Yield* dan Sifat Mekanis Produk Cor *Cylinder Head* Paduan Aluminium Melalui Perbaikan *Casting Design* dan Penambahan Titanium *Flux*

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik, pada Program Studi S-2 Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1 : Prof. Dr-Ing. Ir. Bambang Suharno

Penguji 1 : Dr. Ir. Donanta Dhaneswara, M.Si

Penguji 2 : Badrul Munir, ST., M.Sc., Ph.D

Penguji 3 : Dwi Marta Nurjaya, ST., MT



(.....)
(.....)
(.....)
(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 19 Juli 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT. yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Program studi S-2 Teknik Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Prof. Dr-Ing. Ir. Bambang Suharno selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan serta membimbing saya dalam penyusunan tesis ini;
- (2) Dewan penguji yang terdiri dari Dr. Ir. Donanta Dhaneswara, M.Si., Badrul Munir, ST., M.Sc., Ph.D, Dwi Marta Nurjaya, ST., MT., atas kesediaannya untuk menguji serta telah banyak memberikan masukan dan arahan yang sangat berharga demi penyempurnaan disertasi ini;
- (3) Prof. Dr. Ir. Johny Wahyuadi M DEA., Dr. Ir. Sri Harjanto, Deni Ferdian S.T., M.Sc, semua dosen DTMM-UI, Sdr. Suryadi, Sdr. Endi, dan rekan-rekan di CMPFA atas masukan, arahan, dan dukungannya;
- (4) Kementerian Riset dan Teknologi yang telah memberikan Beasiswa Program Pascasarjana sehingga penulis dapat menempuh studi program S2; pimpinan serta penanggung jawab program ini, Ibu Laila dan Bapak Shandy atas arahan dan dukungannya;
- (5) Direktur Pusat Teknologi Material – BPPT Drs. Wawas Swathatafrijiah, Dr. Ir. Barman Tambunan, Dr. Ir. Agus Hadi S. W. atas kesempatan dan kebijakan yang diberikan, Nendar Herdianto, ST., M.Si, dan rekan-rekan di Pusat Teknologi Material, atas bantuan dan dukungan untuk menyelesaikan studi dan tesis ini;
- (6) Dr. Ir. I Nyoman Jujur. M.Eng sebagai Pembimbing Akademik dari Pusat Teknologi Material – BPPT, Ir. Agustanhakri Bakri, M.Eng sebagai Ketua Bidang Logam Paduan, Ir. Joni Sah, M.Eng, dan rekan-rekan di Bidang

Logam Paduan yang telah memberikan dukung untuk menyelesaikan studi dan tesis ini;

- (7) PT. Putra Bungsu Makmur – Tegal khususnya Bapak Iman Supandiman, Bapak Aran D. Puspongoro, Bapak Barlian, Sdr. Pandu dan rekan-rekan yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah memberikan tempat dan banyak membantu dalam eksperimen pengecoran, Fahron sebagai “tim logam bayangan” atas pengalamannya, kesabarannya, dan semangatnya;
- (8) Teman satu angkatan program S2 Departemen Teknik Metalurgi dan Material: Fajar Nurjaman, Nanang Masruchin, Hary Olya A, Rakhmad Indra, Rahayu Waskita, Ismadi (semoga lekas selesai), dan rekan yang lain atas kebersamaannya selama ini. Teman dari angkatan yg lain, Laili Novitasari dan lainnya atas bantuan dan dukungannya;
- (9) Ayahanda Alimul Hadi, Ibunda Maemunah, Ibunda Rusmiyati selaku orang tua dan mertua yang senantiasa memberikan dukungan dan restu selama proses studi ini;
- (10) Istriku tercinta Susmaningsih Pujiastuti atas kasih sayang, pengertian, pengorbanan, kesetiaan serta kesabarannya untuk selalu mendoakan, mendorong dan memberikan semangat yang tiada henti hingga menyelesaikan pendidikan magister, anak-anak tercinta Malik Askar Astama Alam dan Kalila Rahmaniya Alam atas pengertiannya; dan
- (11) Rekan, keluarga dan sahabat yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu atas bantuan dan dukungannya.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT. berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini mambawa manfaat bagi pengembangan ilmu metalurgi dan material.

Depok, Juli 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Giri Wahyu Alam
NPM : 1006735800
Program Studi : S-2 Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul: **Peningkatan *Yield* dan Sifat Mekanis Produk Cor *Cylinder Head* Paduan Aluminium Melalui Perbaikan *Casting Design* dan Penambahan *Titanium Flux*** beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan. Mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis /pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 19 Juli 2012

Yang menyatakan



Giri Wahyu Alam

ABSTRAK

Nama : Giri Wahyu Alam
Program Studi : S-2 Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Peningkatan *Yield* dan Sifat Mekanis Produk Cor *Cylinder Head* Paduan Aluminium Melalui Perbaikan *Casting Design* dan Penambahan Titanium *Flux*

Pemanfaatan paduan aluminium untuk aplikasi otomotif telah dipertimbangkan karena faktor berat sehingga meningkatkan rasio *power to weight* dari motor penggerak dan ramah lingkungan. Penggunaan paduan aluminium juga diterapkan pada mesin nasional dua silinder dengan daya maksimum 11,5 kW/3.800 RPM. Efisiensi biaya dapat dicapai dengan meningkatkan *yield* dari produk *cylinder head* melalui modifikasi desain pengecoran dan perbaikan sifat mekanis pada daerah ruang bakar melalui penurunan nilai SDAS. Modifikasi *casting design* dilakukan melalui: pengubahan dimensi dan posisi dari *chill* dan *riser*, penggunaan “*chill plate*” pada daerah ruang bakar, dan penambahan titanium *flux*. Perangkat lunak simulasi pengecoran “Z-Cast versi 2.6” digunakan untuk membantu modifikasi *casting design*. Parameter simulasi dan percobaan pengecoran dilakukan pada temperatur tuang 690°C dan 730°C, material AC4B, material cetakannya pasir silika dan resin *furane*. Proses pengecoran, proses *heat treatment* T6, dan pengujian kualitas dilakukan sesuai dengan SOP yang sudah berlaku. *Yield* dari *casting design* awal dapat ditingkatkan lebih dari 16%. 0,15% berat Ti meningkatkan kekerasan pada permukaan bawah dan *dome cylinder head* baik pada kondisi pengecoran dan T6. Nilai SDAS lebih ditentukan oleh laju pembekuan yang ditunjukkan dengan penggunaan “*chill plate*”. Peningkatan *yield* juga diikuti dengan penurunan biaya produksi hingga 7,11%.

Kata kunci: *cylinder head*, AC4B, simulasi pengecoran, SDAS, *grain refinement*.

ABSTRACT

Name : Giri Wahyu Alam
Program Studi : S-2 Metallurgy and Material Engineering
Title : Increase in Yield and Mechanical Properties of Cast Products of Aluminum Alloy Cylinder Head with Improvements in Casting Design and Addition of Titanium Flux

Utilization of aluminum alloys for automotive applications have been considered due weight factors which increased power to weight ratio of engine and environmental friendly. The use of aluminum alloys is also applied to the national two-cylinder engine with maximum power of 11.5 kW/3.800 RPM. Cost efficiency can be achieved by increasing product yield through the cylinder head casting design modifications and improving mechanical properties of the combustion chamber area through reduction of SDAS. Casting design modifications carried out through: changing the dimensions and position of the chills and the risers, using "chill plate" in the combustion chamber area, and adding titanium flux. Casting simulation software "Z-Cast version 2.6" was used to help casting design modifications. Parameters of simulation and experiments carried out at pouring temperatures 690 °C and 730 °C, AC4B ingot, silica sand and furan resin as mold material. The casting process, T6 heat treatment process, and quality testing conducted in accordance with SOPs that are applicable. Yield of the initial casting design can be increased more than 16%. 0,15 wt% of Ti increased the hardness at bottom surface and dome of the cylinder head in both as-cast and as-T6. SDAS more determined by freezing rate which indicated by the use of "chill plate". Increased yield also accompanied by decrease in production costs of up to 7.11%.

Keywords: cylinder head, AC4B, casting simulation, SDAS, grain refinement.

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS	
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan dan Sasaran Penelitian	6
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	6
1.5 <i>State of the Art</i> Penelitian.....	7
1.6 Hipotesis.....	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1 Sistem Paduan Aluminium.....	9
2.1.1. Pengaruh Unsur Paduan	10
2.1.2. Penghalus Butir	15
2.1.3. <i>Heat Treatment</i> Paduan Al.....	16
2.1.4. Paduan aluminium seri 3xx.x untuk <i>Cylinder Head</i>	19
2.2 <i>Cylinder Head</i> dalam Mesin	23
2.2.1. Sistem <i>Cylinder Head</i>	23
2.2.2. Perbaikan dalam Sistem <i>Cylinder Head</i>	24
2.3 Proses Pengecoran.....	31
2.3.1. Cacat Pengecoran	31
2.3.2. Kriteria Niyama.....	32
2.3.3. Desain Pengecoran	33
2.3.4. Biaya Pengecoran.....	34
2.4 Pemanfaatan Perangkat Lunak dalam Desain Pengecoran	38
2.4.1. Sistem Perangkat Lunak.....	38
2.4.2. Aplikasi Simulasi Pengecoran.....	39
2.5 Studi Proses Pembekuan Aluminium.....	43
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	48
3.1 Evaluasi <i>Casting Design</i> Awal	49
3.2 Modifikasi dan Simulasi <i>Casting Design</i>	51
3.2.1. Modifikasi melalui Perubahan Posisi dan Ukuran dari <i>Chill</i> dan <i>Riser</i> 53	
3.2.2. Modifikasi melalui Penggunaan “ <i>Chill Plate</i> ”	63
3.3 Eksperimen Pengecoran	69
3.3.1. Cetakan.....	69

3.3.2. Proses Pengecoran.....	72
3.4 Eksperimen <i>Heat Treatment</i> T6.....	75
3.5 Perhitungan <i>Yield</i>	76
3.6 Pengujian Kualitas.....	77
3.6.1. Pengamatan Visual Bagian Luar.....	77
3.6.2. Pengamatan Visual Bagian Dalam.....	77
3.6.3. Pengujian Hidrostatik dan NDT.....	78
3.7 Karakterisasi Struktur Mikro dan Kekerasan.....	79
3.8 Analisis Biaya Produksi.....	80
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....	83
4.1 Evaluasi <i>Casting Design</i> Awal.....	83
4.1.1. Desain.....	83
4.1.2. <i>Yield</i>	84
4.1.3. Cacat yang Muncul.....	85
4.1.4. Komposisi Kimia.....	87
4.1.5. Struktur Mikro.....	87
4.1.6. Hasil Uji Kekerasan.....	88
4.1.7. Pra-Simulasi.....	89
4.2 Modifikasi dan Simulasi <i>Casting Design</i>	90
4.2.1 Modifikasi Posisi dan Ukuran dari <i>Chill</i> dan <i>Riser</i>	90
4.2.2 Modifikasi dengan Penggunaan “ <i>Chill Plate</i> ”.....	95
4.3 Eksperimen Pengecoran.....	114
4.4 Perhitungan <i>Yield</i>	118
4.5 Pengujian Kualitas.....	120
4.6.1 Pengamatan Visual Bagian Luar.....	120
4.6.2 Pengamatan Visual Bagian Dalam.....	124
4.6.3 Pengujian Hidrostatik dan NDT.....	133
4.6.4 Pengujian Kekerasan.....	135
4.6.5 Pengamatan Struktur Mikro.....	140
4.6 Eksperimen <i>Heat Treatment</i> T6.....	145
4.6.1 Pengujian Kekerasan.....	146
4.6.2 Pengamatan Struktur Mikro.....	147
4.7 Analisis Biaya Produksi.....	152
BAB V PENUTUP.....	157
5.1 Kesimpulan.....	157
5.2 Saran.....	158
DAFTAR PUSTAKA.....	159

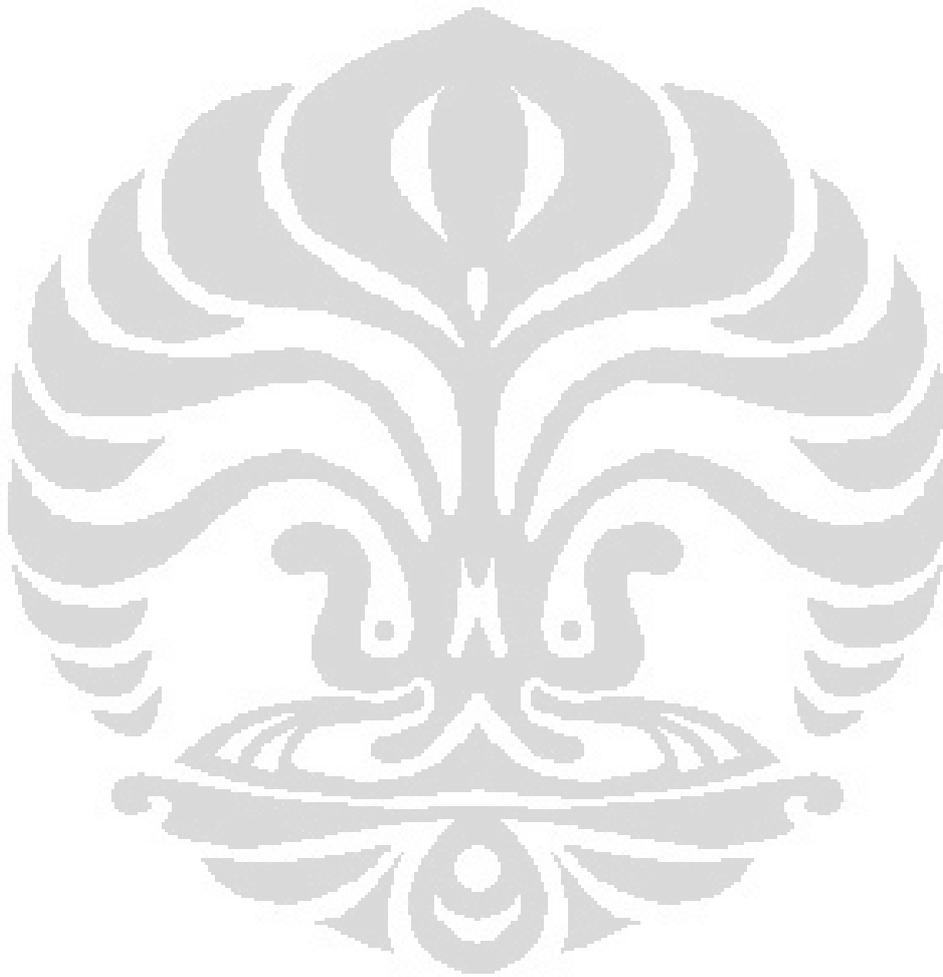
DAFTAR GAMBAR

Gambar 1-1. Mesin BMW 555i dari aluminium [4].....	2
Gambar 1-2. <i>Casting design</i> dari <i>cylinder head</i> saat ini [12].....	4
Gambar 2-1. Pengaruh kadar silikon terhadap mampu alir [34].	11
Gambar 2-2. Diagram fasa Al-Cu dan rentang temperturnya untuk <i>annealing</i> , <i>precipitation heat treating</i> , dan <i>solution heat treating</i> [36].....	17
Gambar 2-3. Efek <i>solution heat treatment</i> pada bentuk silikon eutektik [39]. ...	18
Gambar 2-4. Diagram dua fasa Al-Si [46].	20
Gambar 2-5. Diagram tiga fasa Al-Si-Cu, (a) temperatur cair (<i>liquidus</i>), dan (b) temperatur padat (<i>solidus</i>). [48].	21
Gambar 2-6. Gambar potongan mesin bensin empat silinder <i>in-line</i> [13].	23
Gambar 2-7. Nilai SDAS pada bagian dalam dan luar dari daerah ruang bakar [13].	25
Gambar 2-8. Pengaruh laju pendinginan terhadap nilai SDAS dan ukuran butir pada paduan aluminium (a) AlSi9Cu, dan (b) AlSi7Cu(2/4) [16,17].	25
Gambar 2-9. Laju pendinginan yang tinggi dapat dicapai dengan (a) penurunan temperatur tuang dan (b) penurunan temperatur cetakan [18,19].	26
Gambar 2-10. Pengaruh empat unsur paduan dalam aluminium pada laju pendinginan 0,75°C/detik [19].	26
Gambar 2-11. Porositas yang terbentuk dalam paduan aluminium E319 [20]....	27
Gambar 2-12. Kelarutan hidrogen dalam aluminium pada tekanan 1 atm [33]. .	28
Gambar 2-13. Skematis proses <i>degassing</i> menggunakan gas N ₂ dan Ar yang dapat dilakukan dengan mesin <i>rotary degassing</i> [49].....	29
Gambar 2-14. Efek struktur mikro terhadap ketahanan lelah [20].	30
Gambar 2-15. Beberapa contoh cacat pengecoran yang umum [51].	31
Gambar 2-16. Ilustrasi skematis dari <i>riser-gated casting</i> [51].	33
Gambar 2-17. Keseluruhan arsitektur dalam sistem perkiraan biaya [53].	37
Gambar 2-18. Perbandingan pengembangan desain pengecoran antara yang konvensional dan yang dibantu dengan komputer [25].	39
Gambar 2-19. Optimisasi pengumpanan komponen suspensi dari aluminium [24].	39
Gambar 2-20. Optimisasi secara otomatis desain runner untuk die casting [24].	40
Gambar 2-21. a) Integrasi hasil dari simulasi proses pengecoran menjadi simulasi kinerja.....	41
Gambar 2-22. (1) Tiga desain berbeda yang diusulkan oleh perangkat optimisasi. Warna	43
Gambar 2-23. Diagram skematis <i>engine block</i> . Titik bulat mengindikasikan posisi.	44
Gambar 2-24. Temperatur yang dibaca termokopel di antara liner dimana logam diisikan.	44
Gambar 2-25. Desain percobaan dan penempatan termokopel [56].	46
Gambar 2-26. Pengaruh HTC berbagai <i>chill</i> pada kecepatan pendinginan. (a) Tembaga, (b) Aluminium, dan (c) Besi tuang kelabu [56].	46

Gambar 2-27. Pengaruh HTC berbagai <i>chill</i> pada temperatur efektif benda cor. (a) Tembaga, (b) Aluminium, dan (c) Besi tuang kelabu [56]....	47
Gambar 3-1. Metodologi Penelitian.....	48
Gambar 3-2. Kinerja kelelahan termal dari berbagai material untuk cetakan permanen [57].	52
Gambar 3-3. Cacat dari hasil simulasi pembekuan <i>cylinder head</i> tanpa <i>riser</i> , <i>chill</i> , dan.....	54
Gambar 3-4. Cacat dari hasil simulasi pembekuan <i>cylinder head</i> saja untuk <i>Casting Design C</i> dan <i>D</i> pada temperatur tuang 690 °C dan 730°C.....	64
Gambar 3-5. Cetakan hasil modifikasi sebelum dan setelah dirangkai untuk hasil <i>Casting Design A</i> dan <i>Casting Design D</i>	71
Gambar 3-6. Dapur induksi Inductotherm yang akan digunakan.....	72
Gambar 3-7. Penimbangan berat tuangan untuk menghitung <i>yield</i> dengan timbangan kapasitas 10 kg.	77
Gambar 3-8. Daerah pemotongan untuk pengamatan visual pada bagian dalam.....	78
Gambar 3-9. (a) Peralatan pengujian kebocoran, dan (b) <i>dye penetrant</i> untuk mengecek cacat pada permukaan <i>cylinder head</i>	78
Gambar 3-10. Daerah pengamatan struktur mikro dan pengujian kekerasan (a) pengukuran.....	79
Gambar 3-11. Metode pengukuran SDAS dengan menghitung panjang segment dibagi dengan jumlah lengan dendrit [19].	80
Gambar 4-1. <i>Casting design</i> dari <i>cylinder head</i> awal [12].....	83
Gambar 4-2. Hasil pengecoran dengan <i>casting design</i> awal.....	85
Gambar 4-3. Pembelahan terhadap <i>cylinder head</i> menunjukkan tidak ditemukannya	85
Gambar 4-4. Kriteria Niyama yang diperoleh dari hasil simulasi pembekuan pada daerah tengah.	86
Gambar 4-5. Struktur mikro daerah <i>dome</i> dan dasar <i>cylinder head</i> kondisi pengecoran, 100x.	88
Gambar 4-6. Struktur mikro setelah T6, perbesaran 100x [60,61].....	88
Gambar 4-7. <i>Casting Design A</i> terakhir.....	90
Gambar 4-8. <i>Casting Design B</i> terakhir.....	93
Gambar 4-9. <i>Casting Design C</i> terakhir.....	96
Gambar 4-10. <i>Casting Design D</i> terakhir.....	98
Gambar 4-11. Simulasi kecepatan penuangan pada <i>Casting Design A</i>	102
Gambar 4-12. Distribusi temperatur setelah penuangan tampak atas dan tampak bawah.	103
Gambar 4-13. Distribusi fraksi padatan setelah penuangan.	104
Gambar 4-14. Proses pembekuan <i>Casting Design A</i> dan bentuk akhir pembekuannya.....	105
Gambar 4-15. Simulasi pembekuan setelah simulasi penuangan dari <i>Casting Design A</i> menunjukkan titik-titik <i>hotspot</i>	107
Gambar 4-16. Simulasi kecepatan penuangan pada <i>Casting Design D</i>	109
Gambar 4-17. Distribusi temperatur setelah penuangan tampak atas dan tampak bawah pada <i>Casting Design D</i>	110
Gambar 4-18. Distribusi fraksi padatan setelah penuangan tampak atas dan tampak bawah pada <i>Casting Design D</i>	111

Gambar 4-19. Proses pembekuan <i>Casting Design D</i> dan bentuk akhir pembekuannya.....	112
Gambar 4-20. Simulasi pembekuan setelah simulasi penuangan dari <i>Casting Design D</i> menunjukkan titik-titik <i>hotspot</i>	113
Gambar 4-21. Diagram tiga fasa Al-Si-Cu, (a) temperatur cair (<i>liquidus</i>), dan (b) temperatur padat (<i>solidus</i>). [41].	115
Gambar 4-22. Hasil pengecoran setiap variasi sebelum pembongkaran cetakan.	116
Gambar 4-23. Mekanisme pembentukan riser yang cembung akibat adanya kandungan hidrogen di dalam aluminium cair [64].	117
Gambar 4-24. Perbaikan <i>yield</i> dari hasil modifikasi yang dihitung dengan berbagai metode.	118
Gambar 4-25. Pengamatan visual pada permukaan luar <i>Casting Design A</i>	121
Gambar 4-26. Pengamatan visual pada permukaan luar <i>Casting Design D</i>	123
Gambar 4-27. Pengamatan visual bagian dalam <i>Casting Design A</i> , $T_{\text{tuang}} 730^{\circ}\text{C}$	126
Gambar 4-28. Pengamatan visual bagian dalam <i>Casting Design A</i> , $T_{\text{tuang}} 690^{\circ}\text{C}$	128
Gambar 4-29. Pengamatan visual bagian dalam <i>Casting Design D</i> , $T_{\text{tuang}} 730^{\circ}\text{C}$	130
Gambar 4-30. Pengamatan visual bagian dalam <i>Casting Design D</i> , $T_{\text{tuang}} 690^{\circ}\text{C}$	132
Gambar 4-31. Potongan daerah yang mengalami rembesan pada No. 5.....	134
Gambar 4-32. Potongan daerah yang mengalami rembesan pada No. 7.....	135
Gambar 4-33. Pengaruh <i>casting design</i> dan penambahan Ti terhadap kekerasan pada permukaan bawah.	136
Gambar 4-34. Pengaruh <i>casting design</i> dan penambahan Ti terhadap kekerasan kondisi pengecoran pada penampang melintang <i>dome</i> (P1) dan dasar (D1).	137
Gambar 4-35. Pengaruh nilai SDAS terhadap kekerasan pada <i>Casting Design A</i> dan D.	137
Gambar 4-36. Pengaruh (a) temperatur tuang dan (b) temperatur cetakan terhadap nilai SDAS.	139
Gambar 4-37. Pengaruh <i>casting design</i> dan perlakuan cairan aluminium terhadap nilai SDAS.	140
Gambar 4-38. Struktur mikro <i>Casting Design A</i> kondisi pengecoran pada daerah <i>dome</i> dan dasar, 50x.....	141
Gambar 4-39. Hubungan antara <i>chemical grain refinement</i> , penggunaan <i>chill</i> , dan modifikasi struktur mikro [67].	143
Gambar 4-40. Struktur mikro <i>Casting Design D</i> kondisi pengecoran pada daerah <i>dome</i> dan dasar, 100x.....	144
Gambar 4-41. Perubahan bentuk fisik dari potongan sampel <i>cylinder head</i> sebelum dan setelah.....	145
Gambar 4-42. Pengaruh <i>casting design</i> dan penambahan Ti terhadap kekerasan kondisi T6 pada penampang melintang <i>dome</i> (P1) dan dasar (D1).	147
Gambar 4-43. Struktur mikro <i>Casting Design A</i> kondisi T6 pada daerah <i>dome</i> dan dasar, 50x.....	148

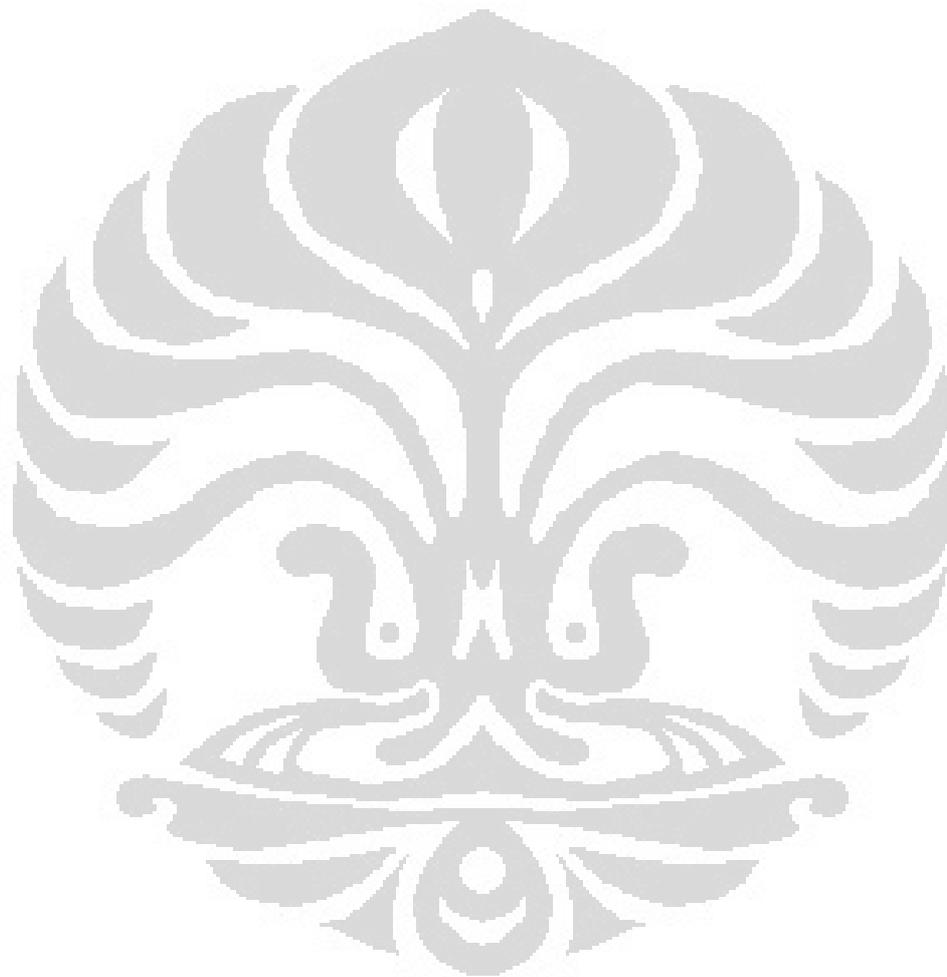
- Gambar 4-44.** Struktur mikro *Casting Design D* kondisi T6 pada daerah *dome* dan dasar, 50x..... 149
- Gambar 4-45.** Sampel pengamatan struktur mikro *Casting Design A* dan *D* dari kondisi pengecoran dan kondisi T6 pada daerah *dome* dan dasar. 151
- Gambar 4-46.** Perbandingan biaya pembuatan *cylinder head* dari berbagai macam *casting design*. 152



DAFTAR TABEL

Tabel 1-1. Kebutuhan <i>chill</i> dalam casting design dari <i>cylinder head</i> saat ini [12].	5
Tabel 2-1. Sistem penamaan aluminium [30,31].	9
Tabel 2-2. Komposisi kimia AC4B (JIS) dan kesetaraannya [30, 37, 38, 67]... 20	20
Tabel 2-3. Beberapa sifat mekanis AC4B dan kesetaraannya [30,37,38,69]..... 22	22
Tabel 2-5. Perbandingan dari tiga desain yang dioptimisasi [28].	42
Tabel 2-7. Sifat-sifat Material Cor, Chill, dan Pasir Cetak [50].	45
Tabel 3-1. Menghitung modulus <i>cylinder head</i> pada tiga posisi.	56
Tabel 3-2. Penentuan awal dimensi <i>riser</i> dan leher <i>riser</i> (dalam mm).....	57
Tabel 3-3. Dimensi <i>riser</i> yang telah disesuaikan.	58
Tabel 3-4. Perhitungan awal <i>riser</i> samping (dalam mm) [53].	59
Tabel 3-5. Penjumlahan massa (W) <i>cylinder head</i> dan <i>riser</i>	60
Tabel 3-6. Penentuan rasio <i>sprue:runner:ingate</i> terhadap waktu tuang yang optimal <i>Casting Design A</i>	61
Tabel 3-7. Penentuan rasio <i>sprue:runner:ingate</i> terhadap waktu tuang yang optimal <i>Casting Design B</i>	63
Tabel 3-8. Penjumlahan massa (W) <i>cylinder head</i> dan <i>riser</i>	66
Tabel 3-9. Penentuan rasio <i>sprue:runner:ingate</i> terhadap waktu tuang yang optimal.	67
Tabel 3-10. Penentuan rasio <i>sprue:runner:ingate</i> terhadap waktu tuang yang optimal.	68
Tabel 3-11. Cetakan dan proses pembuatannya untuk modifikasi <i>Casting Design A</i> dan <i>Casting Design D</i>	69
Tabel 3-12. Perbandingan jumlah dan berat <i>chill</i> sebelum dan setelah modifikasi <i>casting design</i>	70
Tabel 3-13. Rincian variasi yang digunakan pada saat eksperimen.....	72
Tabel 3-14. Perhitungan material balance untuk mendapatkan berat titanium <i>flux GR 2815</i> yang ditambahkan.	73
Tabel 3-15. Parameter berbagai temperatur pada saat eksperimen.....	75
Tabel 4-1. Rincian dimensi <i>casting design</i> awal.....	84
Tabel 4-2. Tabel komposisi kimia desain awal <i>cylinder head</i>	87
Tabel 4-3. Perbandingan kekerasan daerah <i>dome</i> dan dasar <i>cylinder head</i> kondisi pengecoran.	89
Tabel 4-4. Desain <i>riser</i> atas terakhir.	91
Tabel 4-5. Desain <i>riser</i> samping terakhir.....	91
Tabel 4-6. Susunan <i>Chill</i> pada <i>Casting Design A</i>	92
Tabel 4-7. <i>Casting design A</i> tanpa pemasangan <i>chill</i> dan <i>yield</i> -nya.	93
Tabel 4-8. Desain <i>riser</i> atas terakhir.	94
Tabel 4-9. Susunan <i>Chill</i> pada <i>Casting Design B</i>	94
Tabel 4-10. <i>Casting Design B</i> prediksi <i>yield</i> -nya.	95
Tabel 4-11. Desain <i>riser</i> atas terakhir.	96
Tabel 4-12. Susunan <i>Chill</i> pada <i>Casting Design C</i>	97
Tabel 4-13. <i>Casting design C</i> perkiraan <i>yield</i> -nya.....	97
Tabel 4-14. Desain <i>riser</i> atas terakhir.	98
Tabel 4-15. Susunan <i>Chill</i> pada <i>Casting Design D</i>	99

Tabel 4-16. <i>Casting Design D</i> perkiraan <i>yield</i> -nya.....	99
Tabel 4-17. Perbandingan <i>Casting Design</i> melalui Perubahan Posisi dan Ukuran <i>Chill</i> dan <i>Riser</i> dan melalui Penggunaan “ <i>Chill Plate</i> .”	100
Tabel 4-18. Tabel komposisi kimia ingot AC4B, Pengecoran Tahap I dan Tahap II.....	114
Tabel 4-19. Rincian perhitungan dari <i>casting design</i> awal dan hasil modifikasi.	119
Tabel 4-20. Hasil pengukuran kekerasan pada permukaan bawah.	135
Tabel 4-21. Analisis biaya sebelum dan setelah modifikasi <i>casting desain</i>	153



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1: Laporan Pengujian Komposisi Kimia <i>Cylinder Head</i> Produksi 2010	165
Lampiran 2: Laporan Pengujian Kekerasan Daerah <i>Dome</i> dari <i>Cylinder Head</i> Produksi 2010	166
Lampiran 3: Laporan Pengujian Kekerasan Daerah Dasar dari <i>Cylinder Head</i> Produksi 2010	167
Lampiran 4: Laporan Pengujian Struktur Mikro <i>Dome</i> Dasar dari <i>Cylinder Head</i> Produksi 2010	168
Lampiran 5: Laporan Pengujian Struktur Mikro Daerah <i>Dasar</i> dari <i>Cylinder Head</i> Produksi 2010	170
Lampiran 6: Detail <i>Casting Design A</i>	172
Lampiran 7: Detail <i>Casting Design B</i>	175
Lampiran 8: Detail <i>Casting Design C</i>	177
Lampiran 9: Detail <i>Casting Design D</i>	180
Lampiran 10: Temperatur vs. Waktu pada Penuangan dan Pembekuan	183
Lampiran 11: Hasil Pengukuran Kekerasan pada Bagian Bawah <i>Cylinder Head</i>	187
Lampiran 12: Hasil Pengukuran Kekerasan pada Penampang Melintang <i>Cylinder Head</i>	190
Lampiran 13: Hasil Pengukuran Nilai SDAS pada Penampang Melintang <i>Casting Design A</i>	191
Lampiran 14: Hasil Pengukuran Nilai SDAS pada Penampang Melintang <i>Casting Design D</i>	195
Lampiran 15: Struktur Makro dari Berbagai Variasi	199

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemakaian aluminium untuk aplikasi otomotif bukan tanpa alasan yang kuat. Aluminium telah memberikan keuntungan dari kinerjanya dibandingkan dengan baja. Berat yang lebih ringan 50% dari baja tidak hanya memberikan kekakuan dan keamanan tetapi juga meningkatkan rasio *power to weight* dari motor penggerak. Penggunaan aluminium dapat menekan pula berat mati kendaraan dengan berat angkut kendaraan tidak mengalami perubahan. Selain itu, umur dari kendaraan akan dapat lebih panjang karena sifat aluminium yang memberikan ketahanan korosi yang baik sekali. Dengan semakin ringannya berat kendaraan maka akan meningkatkan akselerasi kendaraan, memberikan stabilitas dan respon yang lebih baik, dan membutuhkan jarak berhenti yang lebih pendek dari pada kendaraan yang lebih berat. Fleksibilitas desain aluminium memudahkan pembuat kendaraan untuk membuat bentuk dan kinerja yang optimum untuk setiap jenis kendaraan [1,2].

Aluminium dapat memberikan keuntungan secara lingkungan. Aluminium dengan berat 0,45 kg yang menggantikan 0,90 kg besi/baja dapat menghemat emisi CO₂ 9,07 kg bersih terhadap umur dari suatu kendaraan. Setiap pengurangan berat sebanyak 10% maka dapat menghemat bahan bakar 6 – 8 % dan ini melalui desain yang sesuai sehingga emisi *greenhouse gas* lebih sedikit. Berdasarkan data dari *Environmental Protection Agency*, hampir 90 % aluminium untuk otomotif dapat didaur ulang dan diperbaiki. Data ini didukung oleh *Ducker Worldwide* dimana pada tahun 2006 sekitar 57 % aluminium di Amerika Utara bersumber dari daur ulang, sementara di Eropa sekitar 50 % dan di Jepang 63 %. Penggunaan aluminium ini kemudian menjadi meningkat dan akan terus meningkat karena aluminium menjadi pilihan bagi pembuat kendaraan [2].

Volume terbesar dari komponen aluminium di kendaraan adalah produk cor, seperti *cylinder heads*, *engine blocks*, dan *chassis part* [3]. Penggantian *engine*

blocks dari besi tuang terus berlanjut baik untuk yang berbahan bakar bensin, sebagaimana terlihat di **Gambar 1-1** maupun untuk berbahan bakar diesel. Mesin BMW 555i dengan kapasitas silinder total 5,5 liter dari delapan silinder yang dimilikinya dengan susunan V telah menggunakan aluminium paduan sehingga daya yang besar dan berat yang ringan akan meningkatkan kenyamanan berkendara [4]. Pengembangan paduan aluminium Al-Si-Cu-Mg-Fe sudah dapat memenuhi persyaratan pada kekuatan dan daya tahan yang diperoleh dari besi tuang. Teknik pengecoran baru telah muncul untuk memperbaiki sifat-sifat material dan integrasi dari fungsional mesin. Kecenderungan ini didorong atas kebutuhan untuk mengurangi berat kendaraan secara total [5]. Konsep mesin *blocks* untuk masa depan adalah mengkombinasikan antara biaya rendah, berat ringan, kekakuan, dan ketahanan yang tinggi terhadap tegangan. Dengan memperhatikan kondisi operasi seperti tekanan yang tinggi sekitar 200 bar pada mesin *diesel* dengan *direct-injection* maka akan menghasilkan mesin yang optimum [6].



Gambar 1-1. Mesin BMW 555i dari aluminium [4].

Produsen kendaraan khususnya yang memiliki jalur produksi mesin terus berupaya untuk menekan biaya produksi melalui optimalisasi proses pengecoran. Optimalisasi proses pengecoran tidak hanya terbatas bagaimana mengoptimalkan logam cair untuk mengubahnya menjadi komponen aluminium. Optimalisasi diperlukan ketika mendesain suatu produk berikut *casting design* dan mencoba *casting design* tersebut untuk menghasilkan komponen sebenarnya. Secara konvensional cara tersebut menjadi pilihan dari beberapa industri dan mereka melakukan proses ini hingga beberapa kali sehingga diperoleh produk cor yang dapat diterima secara kualitasnya. Akan tetapi hal ini memberikan dampak biaya

Universitas Indonesia

yang tinggi dan waktu yang lama yang harus disiapkan oleh industri tersebut. Penggunaan perangkat lunak yang didesain untuk mensimulasikan proses pengecoran dapat meminimalkan biaya ini. Perangkat lunak ini akan sangat berperan dalam menekan biaya yang ditimbulkan pada tahap desain. Pemanfaatan perangkat lunak dapat menekan biaya untuk pembuatan pola, pembuatan cetakan, peleburan logam cair, energi, dan jam kerja. Waktu yang dibutuhkan dalam pelaksanaan kegiatan tersebut tentu juga bisa dipersingkat dengan mengalihkan waktu tersebut ke dalam pembuatan model dan mensimulasikannya dalam perangkat lunak [7].

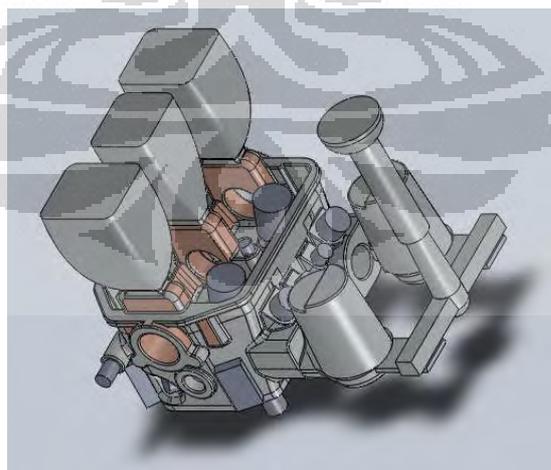
1.2 Perumusan Masalah

Pengecoran *cylinder head* yang telah dilakukan selama ini bekerjasama dengan berbagai industri pengecoran dengan menggunakan metode pengecoran secara gravitasi dalam suatu cetakan pasir. Pada awalnya, penggunaan simulasi *casting* sudah dipakai dalam lingkup yang masih sangat terbatas untuk meyakinkan bahwa pola cetakan yang akan dibuat sudah memenuhi persyaratan. Terbatasnya penggunaan simulasi *casting* ini juga belum melibatkan faktor-faktor yang mempengaruhi pengecoran secara simultan seperti jenis pasir, binder, dan temperatur tuang [8].

Pola cetakan yang dihasilkan ini kemudian digunakan dalam pembuatan cetakan pengecoran untuk menghasilkan prototip yang pertama dimana hasilnya belum memuaskan karena masih ditemukan cacat keropos. Dalam mengatasi permasalahan cacat ini, perbaikan proses pengecoran berikutnya dilakukan secara *trial and error* tanpa penggunaan simulasi *casting*. Pengalaman di lapangan dari mitra industri menjadi dasar utama dalam perbaikan proses pengecoran dengan mengubah jenis pasir, *binder*, *gating system*, *riser*, dan penggunaan *chill*. Selain itu, riset pengecoran untuk menghasilkan cairan aluminium yang bersih, pemilihan temperatur tuang yang tepat, dan perlakuan panas T6 yang sesuai juga telah dilakukan untuk mendukung perbaikan tersebut [8,9].

Perbaikan terhadap proses pengecoran secara *trial* dan *error* tentunya memakan waktu yang lama dan biaya yang tidak sedikit hingga akhirnya diperoleh *casting design* yang terbaik. *Casting design* ini telah menghasilkan *cylinder head* dengan kualitas yang baik melalui dua macam pengujian mutu. Dua persyaratan yang harus dipenuhi melalui pengujian mutu adalah uji kebocoran melalui tekanan hidrostatik pada tekanan 3 bar selama 15 menit dan uji tak merusak menggunakan *dye penetrant*. *Cylinder head* yang telah memenuhi persyaratan ini kemudian dipasangkan menjadi satu mesin untuk melewati suatu rangkaian pengujian mesin. Berdasarkan hasil pengujian mesin ini berhasil diketahui daya maksimum 11,5 kW/3.800 RPM dari uji kinerja mesin dan mencapai waktu ketahanan selama 100 jam dengan prestasi mesin yang relatif sama dari uji ketahanan mesin [10].

Meskipun produk ini berhasil melewati pengujian kualitas dan pengujian mesin, perbaikan yang berkelanjutan perlu terus dilakukan khususnya untuk menurunkan biaya produksi. Harapan yang besar dari mitra industri dan didorong dari hasil studi pasar akan menjadikan penurunan biaya produksi menjadi prioritas penting selain dari konsistensi kualitas produk yang akan dihasilkan dalam jumlah banyak [11]. Penurunan biaya produksi ini dapat dilakukan antara lain melalui peningkatan nilai *yield*, pengurangan berat sistem saluran dan *riser*, penghematan pasir untuk cetakan pasir, dan peningkatan persentase *scrap* yang digunakan.



Gambar 1-2. *Casting design* dari *cylinder head* saat ini [12].

Pencapaian berat sistem saluran dan *riser* yang lebih rendah pada *casting design* saat ini yang diilustrasikan pada **Gambar 1-2** akan memegang peranan penting.

Volume *riser* dan saluran-salurannya dimana saat ini mencapai 7,5 kg atau setara dengan 42,31% dari total berat seluruh tuangan. Secara umum, *casting design* ini terdiri dari tiga buah *top riser*, dua buah *side riser*, dan 38 buah *chill* dengan berbagai bentuk dan dimensi seperti yang dijelaskan dalam **Tabel 1-1**. Dengan menggunakan susunan *chill* sebanyak ini maka memerlukan tingkat ketelitian yang tinggi dari operator terlatih. Operator terlatih memegang peran penting untuk menghasilkan karakteristik cetakan yang sama sehingga menghasilkan kualitas produk cor yang identik [12].

Tabel 1-1. Kebutuhan *chill* dalam casting design dari *cylinder head* saat ini [12].

No.	Bentuk	Dimensi (mm)				Jumlah	Lokasi	Asal Material
		Dia.	P	L	T			
1	Bulat	20			20	4	Bawah	As Roda
2	Bulat	12			15	2	Bawah	Behel
3	Persegi Panjang		20	15	10	1	Bawah	Plat
4	Bulat	15			15	2	Sisi Intake	Behel
5	Bulat	25			20	2	Sisi Intake	As Roda
6	Bulat	35			40	2	Atas	As Roda
7	Bulat	25			20	2	Atas	As Roda
8	Bulat	20			15	2	Kiri-Kanan	As Roda
9	Persegi Panjang		50	25	10	2	Kiri-Kanan	Plat
10	Persegi Panjang		50	20	10	2	Kiri-Kanan	Plat
11	Persegi Panjang		40	10	5	1	Atas	Plat
12	Bulat	20			15	4	Atas	As Roda
13	Bulat	12			10	2	Atas	Behel
14	Bulat	8			30	1	Atas	Behel
15	Bulat	8			40	2	Atas	Behel
16	Bulat	20			15	2	Atas	As Roda
17	Bulat	15			20	1	Sisi Exhaust	Behel
18	Bulat	10			10	2	Inti Intake	Behel
19	Bulat	10			10	2	Inti Exhaust	Behel
Jumlah						38		

Penurunan biaya produksi melalui perbaikan *casting design* melalui pemanfaatan perangkat lunak simulasi *casting* akan berperan utama sehingga bisa memangkas waktu dan biaya. Perangkat lunak ini akan mensimulasikan proses penuangan cairan ke dalam cetakan dan proses pembekuan yang terjadi dengan menyesuaikan kondisi pengecoran yang ada di lapangan. Kondisi pengecoran ini meliputi kondisi cairan, kondisi cetakan, dan kondisi lingkungan.

1.3 Tujuan dan Sasaran Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan persentase berat produk cor terhadap berat tuangan (*yield*) dalam rangka efisiensi produksi dengan kualitas yang memenuhi persyaratan dan meningkatkan sifat mekanis pada daerah ruang bakarnya.

Adapun tujuan khusus dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Diperolehnya pemahaman tentang pembuatan *casting design* dalam meningkatkan *yield* baik dengan menggunakan metode perhitungan desain dan metode secara komputer.
- b. Diperolehnya pemahaman tentang pengaruh perubahan *casting design* dan penambahan *grain refinement* terhadap perbaikan sifat mekanis pada daerah ruang bakar baik setelah pengecoran maupun setelah *heat treatment* T6.
- c. Diperolehnya perkiraan analisis biaya produksi sebelum dan setelah perbaikan

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini meliputi:

- a. Melakukan modifikasi *casting design* untuk meningkatkan *yield* tanpa melakukan modifikasi pada benda cor (*cylinder head*) yang merupakan hasil desain Tim BPPT tahun 2009.
- b. Melakukan simulasi terhadap *casting design* yang telah dimodifikasi pada T_{tuang} 690°C dan 730°C sesuai dengan rentang temperatur pada saat produksi *cylinder head*.
- c. Melakukan percobaan pengecoran dari *casting design* terpilih pada T_{tuang} 690°C dan 730°C sesuai dengan rentang temperatur pada saat produksi *cylinder head*.
- d. Melakukan pengecoran sesuai SOP yang telah ditetapkan hanya pada Al cair yang tidak mengalami perlakuan. Ketika terdapat perlakuan terhadap Al cair dengan penambahan Ti maka akan memerlukan modifikasi terhadap SOP tersebut sesuai dengan standar industri pada penyiapan Al cair.
- e. Melakukan *heat treatment* T6 sesuai dengan SOP yang telah ditetapkan untuk kedua macam perlakuan terhadap Al cair.

- f. Melakukan pengujian kualitas sesuai dengan SOP yang telah ditetapkan dgn penambahan pada pengamatan visual dan struktur mikro, dan pengujian kekerasan.

1.5 State of the Art Penelitian

Cylinder head adalah salah satu komponen utama dan penting dalam suatu mesin. Pada *cylinder head*, proses pencampuran udara dan bahan bakar hingga terjadi proses ledakan pada ruang bakar yang menyebabkan piston bergerak turun, merupakan kondisi kerja yang paling berat. Sehingga komponen ini, khususnya yang berada pada ruang bakar, mengalami beban *thermomechanical fatigue* (TMF). Faktor-faktor struktur mikro sangat berpengaruh seperti penghalusan struktur mikro (SDAS), porositas, oksida, modifikasi silikon, fraksi eutektik, fasa endapan dan fasa intermetalik. [13-15]

Pengendalian nilai SDAS sekecil mungkin yang akan berpengaruh terhadap pembentukan porositas dan fasa intermetalik yang lebih merata telah banyak dilakukan. Metode yang dilakukan adalah dengan meningkatkan laju pembekuan, penambahan unsur paduan lain, meminimalkan cacat porositas yang terjadi, dan dengan menjaga kebersihan dari cairan aluminium. Metode yang telah dilakukan tersebut ada yang kemudian dilanjutkan dengan pengujian kelelahan dengan mendekati kondisi sebenarnya pada ruang bakar di dalam *cylinder head*. [16-20]

Perangkat lunak simulasi *casting* telah banyak digunakan untuk melakukan optimisasi proses pengecoran. Optimisasi yang bisa dilakukan dengan perangkat lunak ini tidak hanya dalam meningkatkan *casting yield* saja tetapi juga digunakan untuk memprediksi struktur mikro yang terbentuk melalui kecepatan pendinginannya. Optimisasi *casting yield* dapat ditingkatkan dengan melakukan optimisasi pada *riser* dan penyusunan ulang *chill* telah banyak dilakukan penelitian untuk berbagai komponen dan material baik ferro maupun non-ferro (Al). Struktur mikro dapat diprediksi dari fitur di perangkat lunak melalui Niyama dan waktu pembekuannya. Cacat yang terbentuk selama pembekuan bisa diprediksi dari simulasi yang dilakukan. Hasil simulasi dengan cepat dapat

diketahui sehingga perbaikannya dapat langsung diubah desain komponennya atau desain pengecorannya secara cepat. [21-28]

1.6 Hipotesis

Penggunaan perangkat lunak simulasi *casting* akan memudahkan dalam meningkatkan *yield* pengecoran *cylinder head* dan bisa digunakan untuk memperkirakan kualitas dari produk coranya serta sifat mekanisnya. Penggunaan “*chill plate*” pada permukaan ruang bakar (*dome*) yang diikuti dengan penambahan *grain refinement* akan dapat meningkatkan sifat mekanisnya khususnya pada daerah ini dibandingkan dengan cairan aluminium yang tidak mengalami perlakuan tersebut.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Paduan Aluminium

Aluminium merupakan material yang sudah digunakan luas di dunia untuk memenuhi berbagai kebutuhan manusia. Untuk itu maka aluminium tidak hanya dijumpai dalam keadaan murni saja tetapi juga dipadu dengan berbagai unsur-unsur lainnya. Unsur paduan ini dapat memberikan sifat-sifat yang berbeda terhadap paduan aluminium. Unsur paduan ini kemudian dikelompokkan untuk memudahkan penggunaannya dalam industri. Pengelompokkan ini dilakukan oleh beberapa lembaga standardisasi dari setiap negara dengan mengeluarkan penamaan masing-masing. Dengan demikian tidak ada standar nama yang berlaku secara internasional namun demikian antara standar tersebut masih memiliki kemiripan berdasarkan unsur pepadunya. Sistem penamaan yang dikeluarkan oleh ANSI (*American National Standards Institute*) yang diurus oleh *Aluminum Association* mengelompokkan produk aluminium berdasarkan *wrought alloys* dan *casting alloys* dapat dilihat pada **Tabel 2-1** berikut ini [29-31].

Tabel 2-1. Sistem penamaan aluminium [30,31].

<i>Wrought Alloys</i>	<i>Casting Alloys</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Digit pertama: unsur pokok paduan utama • Digit kedua: variasi dari paduan awal • Digit ketiga dan keempat: variasi paduan individu (nomor tidak memiliki signifikansi tetapi unik) 	<ul style="list-style-type: none"> • Digit pertama: unsur pokok paduan utama • Digit kedua dan ketiga: penamaan paduan khusus (nomor tidak memiliki signifikansi tetapi unik) • Digit keempat: penamaan <i>casting</i> (0), <i>ingot</i> standar (1), dan <i>ingot</i> dengan komposisi yang lebih sempit tetapi masih sesuai standar (2) • Variasi diindikasikan oleh huruf awal (A, B, C)
<ul style="list-style-type: none"> • 1xxx - Al murni (99.00% atau lebih besar) • 2xxx – Paduan Al-Cu • 3xxx – Paduan Al-Mn • 4xxx – Paduan Al-Si • 5xxx – Paduan Al-Mg • 6xxx – Paduan Al-Mg-Si • 7xxx – Paduan Al-Zn • 8xxx – Paduan Al + unsur lain • 9xxx – seri yang tidak digunakan 	<ul style="list-style-type: none"> • 1xx.x – Al murni (99.00% atau lebih besar) • 2xx.x – Al-Cu • 3xx.x – Al-Si + Cu dan/atau Mg • 4xx.x – Al-Si • 5xx.x – Al-Mg • 7xx.x – Al-Zn • 8xx.x – Al-Sn • 9xx.x – Al + unsur lain • 6xx.x - seri yang tidak digunakan

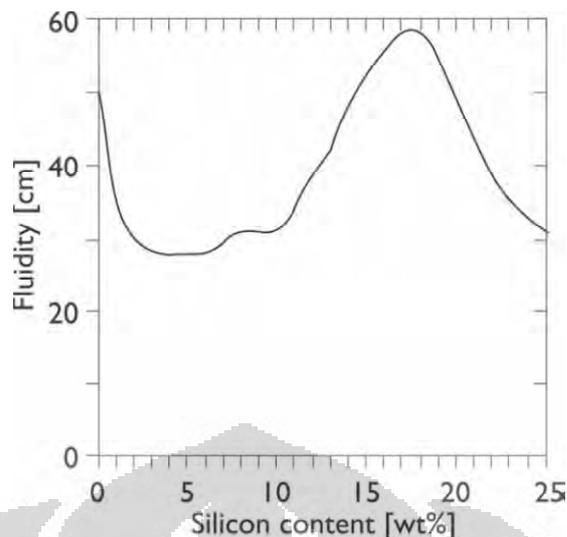
2.1.1. Pengaruh Unsur Paduan

Unsur paduan yang mempengaruhi karakteristik dari paduan aluminium dapat diklasifikasikan menjadi unsur utama, unsur minor, unsur yang memodifikasi struktur mikro, dan unsur pengotor [32].

Unsur Paduan Utama

Silikon (Si) banyak digunakan dalam proses pemaduan aluminium dengan kadar hingga 25%. Silikon dapat memperbaiki karakteristik benda cor seperti mampu alir, ketahanan *hot tear*, dan karakteristik pengumpanan (*riser*). Besarnya rentang kadar Si yang optimum dapat ditentukan berdasarkan proses pengecoran yang dipilih. Penetapan rentang komposisi ini didasarkan pada laju pendinginan, mampu alir, dan efek persentase eutektik pada pengumpanan. Proses pengecoran dengan pembekuan lambat seperti menggunakan plaster, investment, pasir berada pada kisaran 5 – 7%. Pengecoran dengan menggunakan cetakan permanen pada kisaran 7 – 9% dan untuk *die casting* pada kisaran 8 – 12%. Penambahan Si diikuti dengan menurunnya *specific gravity* dan koefisien ekspansi termal [33].

Pada aluminium murni, silikon dengan kadar kurang dari 1,65% akan menurunkan mampu alirnya. Penambahan kadar silikon di atas itu tidak banyak mempengaruhi mampu alirnya hingga kadar silikon 7 atau 8%. Mampu alirnya akan terus meningkat hingga kadar silikon mencapai 18% yang kemudian turun lagi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2-1**. Salah satu alasan dari fenomena ini adalah karena tingginya panas peleburan dari silikon primer. Besarnya panas peleburan silikon primer adalah 4,5 kali panas peleburan aluminium [34].



Gambar 2-1. Pengaruh kadar silikon terhadap mampu alir [34].

Tembaga (Cu) merupakan unsur yang pertama kali digunakan dan paling banyak dalam kadar berkisar 4 – 10%. Tembaga dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada produk hasil kondisi *as-cast* dan *as-heat-treated*, menurunkan ketahanan *hot tear*, dan menurunkan mampu cornya. Kadar tembaga 4 – 6% memberikan respon yang kuat terhadap perlakuan panas. Secara umum, tembaga akan menurunkan ketahanan korosi secara umum dan untuk kasus khusus tertentu rentan korosi tegangan. Pada aluminium murni, tembaga memberikan pengaruh yang rendah terhadap penurunan mampu alirnya. Namun pada seri A380, penambahan tembaga 1% dapat meningkatkan mampu alirnya menjadi 4% [33,34].

Magnesium (Mg) digunakan sebagai dasar untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan dalam paduan Al-Si yang mampu di-*heat treated* dan umum digunakan bersama dengan unsur paduan lain seperti Cu, Ni, dan lainnya untuk tujuan yang sama. Fasa penguat Mg_2Si memiliki batas kelarutan sekitar 0,70% Mg, lebih dari itu unsur ini tidak memberikan penguatan lanjutan atau dapat mengurangi kekuatannya. Kadar magnesium yang dapat menghasilkan kekuatan-premium adalah pada kisaran 0,4 – 0,7% [33].

Unsur Paduan Minor

Nikel (Ni) biasanya digunakan dengan tembaga untuk meningkatkan sifat kekerasan pada temperatur tinggi. Perbaikan sifat ini dicapai ketika kadarnya tidak melebihi jumlah eutektik silikon dan lebih dari jumlah eutektik nikel. Sifat mekanis lainnya yang dapat ditingkatkan adalah ketahanan tekanan dan *flexion*. Nikel juga dapat mengurangi koefisien ekspansi termal. Peningkatan sifat tersebut disebabkan oleh terbentuknya fasa intermetalik Al_3Ni [32,33].

Tin (Sn) biasa digunakan untuk mengurangi gesekan dalam aplikasi *bearing* dan *bushing*. Unsur paduan ini dapat bekerja dengan memberikan pelumasan secara singkat dalam kondisi darurat jika terjadi kelebihan panas dalam kerjanya [32].

Unsur yang Memodifikasi Struktur Mikro

Titanium (Ti) digunakan secara luas untuk menghasilkan struktur butir yang halus dari paduan aluminium cor, sering dalam kombinasi dengan sejumlah kecil boron. Titanium sisa dari stoikiometri TiB_2 diperlukan untuk penghalus butir. Titanium sering digunakan pada konsentrasi yang lebih besar dari yang diperlukan untuk penghalus butir untuk mengurangi kecenderungan retak dalam komposisi *hot short* [33].

Boron (B) berkombinasi dengan logam lain dengan membentuk borides, seperti Al_2 dan TiB_2 . Titanium borida membentuk tempat nukleasi yang stabil untuk berinteraksi dengan fasa penghalus butir yang aktif seperti $TiAl_3$ dalam aluminium cair. Borida dapat mengurangi umur peralatan ketika proses pemesinan, dalam bentuk partikel kasar yang terdiri dari inklusi yang tidak diinginkan akan memberikan efek yang mengganggu pada sifat mekanis dan keuletan. Konsentrasi boron yang tinggi menyebabkan borida berkontribusi terhadap kotoran dapur, penggumpalan partikel, dan meningkatkan resiko inklusi pengecoran. [33].

Strontium (Sr) digunakan untuk memodifikasi eutektik Al-Si. Modifikasi efektif dapat dicapai pada penambahan level yang rendah dimana kisaran umum yang digunakan adalah 0,008 – 0,04%. Tingkat penambahan yang lebih tinggi dapat menyebabkan porositas pengecoran, khususnya dalam proses atau bagian yang

tebal dimana pembekuan terjadi lebih lambat. Efisiensi *degassing* mungkin juga kurang berpengaruh pada tingkat strontium yang lebih tinggi karena semakin banyak gas yang terserap oleh stronsium.[33].

Sodium (Na) memodifikasi paduan eutektik aluminium-silikon. Kehadirannya dapat menyebabkan kerapuhan pada paduan aluminium-magnesium. Sodium berinteraksi dengan fosfor (P) untuk mengurangi keefektifan dalam memodifikasi eutektik dan dalam penghalusan fasa silikon primer [33].

Fosfor (P). Dalam bentuk AlP_3 , fosfor bernukleasi dan menghaluskan pembentukan fasa silikon primer dalam paduan Al-Si hipereutektik. Dalam suatu konsentrasi beberapa ppm, fosfor mengkasarkan struktur eutektik dalam paduan Al-Si hipoeutektik. Fosfor mengurangi keefektifan dari pemodifikasi eutektik yang umum sodium dan stronsium [33].

Antimoni. Pada konsentrasi sama atau lebih besar dari 0,05%, antimoni menghaluskan fasa eutektik aluminium-silikon menjadi bentuk lamelar pada komposisi hipoeutektik. Keefektifan antimoni dalam menghasilkan struktur eutektik tergantung pada kehadiran fosfor dan laju pendinginan yang cukup cepat. Antimoni juga bereaksi dengan sodium atau stronsium untuk membentuk intermetalik yang kasar dengan efek yang buruk pada mampu cor dan struktur eutektik. Antimoni ini diklasifikasikan sebagai logam berat yang berpotensi menyebabkan keracunan dan implikasi kesehatan lainnya [33].

Mangan (Mn) secara normal dapat dikelompokkan sebagai pengotor dalam komposisi pengecoran sehingga dikendalikan hingga level terendah dalam kebanyakan komposisi pengecoran gravitasi. Keberadaan mangan dapat sedikit menurunkan mampu alir dari aluminium murni. Meski demikian, mangan adalah unsur terpenting dalam komposisi produk *wrought* yang mungkin mengandung tingkat mangan yang lebih tinggi dari produk *casting*. Mangan memberikan keuntungan yang signifikan pada produk yang mengalami pengerjaan dingin dari pada pada paduan aluminium cor. Namun fraksi volume yang tinggi dari $MnAl_6$

dalam paduan mengandung Mn lebih dari 0,5% mungkin dapat mempengaruhi kualitas bagian dalam benda cor. Mangan juga dapat digunakan untuk mengubah respon dalam lapisan kimia penutup dan *anodizing* [33,34].

Kromium (Cr) Penambahan kromium secara umum dilakukan dalam konsentrasi rendah ke temperatur *aging* ruang dan komposisi kimia yang tidak stabil secara termal dimana *germination* dan pertumbuhan butir diketahui akan terjadi. Kromium biasanya membentuk senyawa $CrAl_7$, yang menunjukkan *solid-state solubility* yang sangat terbatas dan kemudian berguna dalam menekan kecenderungan pertumbuhan butir. Endapan yang mengandung Fe, Mg, dan Cr dapat dijumpai pada komposisi paduan *die casting* dan jarang ditemui pada paduan pengecoran gravitasi. Kromium mempengaruhi ketahanan korosi pada beberapa paduan dan meningkatkan sensitifitas pendinginan cepat pada konsentrasi yang lebih tinggi [33].

Unsur Pengotor

Besi (Fe) memperbaiki ketahanan *hot tears* dan menurunkan kecenderungan untuk pelekatan pada cetakan atau *soldering* pada *die casting*. Namun peningkatan kadar besi diikuti dengan penurunan keuletan dengan membentuk suatu *myriad* dari fasa tidak terlarut dalam cairan paduan aluminium. Fasa yang paling umum dijumpai adalah $FeAl_3$, $FeMnAl_6$, dan $\alpha-AlFeSi$. Ini adalah fasa yang tidak terlarut dan berpengaruh terhadap peningkatan kekuatan, khususnya pada temperatur tinggi. Sebagaimana fraksi fasa tidak terlarut ini meningkat dengan meningkatnya kadar besi maka sifat pengecoran seperti karakter mampu alir dan pengumpulan berkurang. Meningkatnya kadar Fe akan semakin menurunkan mampu alirnya. Fe berpartisipasi dalam pembentukan fasa endapan dengan Mn, Cr, dan elemen lainnya [33,34].

Zinc (Zn) tidak menunjukkan keuntungan yang signifikan dengan penambahan ke paduan aluminium. Penambahan ke dalam paduan Al-Mg dapat meningkatkan ketahanan korosi tegangan dengan membentuk fasa Al-Mg-Zn yang stabil. Bersamaan dengan penambahan Cu dan/atau Mg, Zn menghasilkan dalam *heat*

treatable yang atraktif atau komposisi *naturally aging*. Kombinasi Zn dengan Fe dan Mn pada Al-8%Si-3%Cu dapat meningkatkan mampu alirnya [32,33,34].

2.1.2. Penghalus Butir

Dalam pengecoran aluminium, struktur butir yang halus dapat diperoleh dengan cara mempengaruhi komposisi paduan, waktu pembekuan, dan penambahan penghalus butir yang mengandung fasa intermetalik. Keuntungan dari penghalus butir yang efektif adalah [33]:

- Memperbaiki karakteristik pengumpanan
- Meningkatkan ketahanan *tear*
- Memperbaiki sifat mekanis
- Meningkatkan kekuatan tekanan
- Memperbaiki respon terhadap perlakuan termal
- Memperbaiki penampilan antara lain pelapisan secara kimia, elektrokimia, dan mekanikal.

Struktur butir ini dapat memberikan kualitas cor yang semakin baik dengan meminimalkan penyusutan, *hot cracking*, dan porositas hidrogen. Ukuran rongga penyusutan interdendritik secara langsung dipengaruhi oleh ukuran butir. Efek ini meminimalkan pembentukan potensial dari rongga penyusutan yang lebih besar. Begitu pula ketika porositas dari hidrogen hadir, ukuran pori lebih besar dengan dampak yang lebih merusak dapat dihindari dengan struktur butiran-halus dari benda cor. Efektifitas penghalus butir dapat dicapai jika dimasukkan secara terkendali, dapat diprediksi, dan jumlah aluminida (dan borida) dalam bentuk yang tepat, ukuran, dan distribusi untuk nukleasi butir. Selain itu kadar titanium yang berlebih dari kesetimbangan stokiometri dengan boron dalam TiB_2 diperlukan dalam menghasilkan penghalusan butir yang optimum [33].

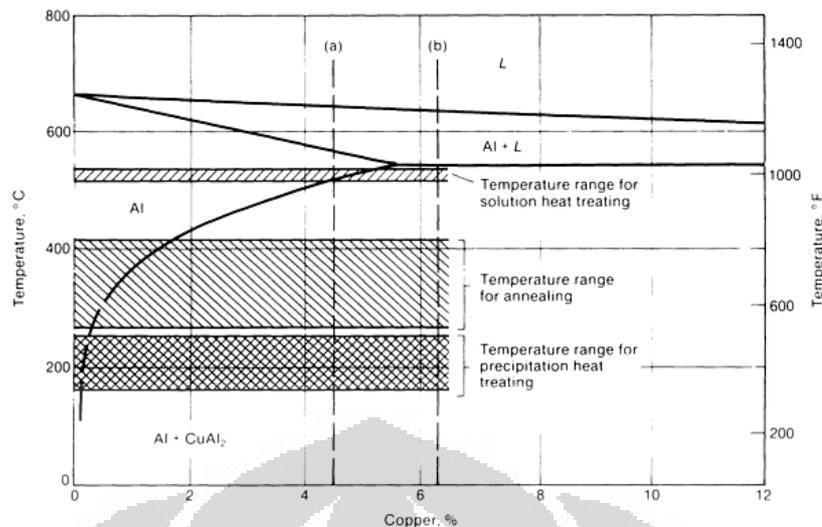
Penggunaan penghalus butir yang paling luas adalah dalam bentuk *master alloy* dan *flux*. *Master alloy* mengandung titanium, boron, dalam aluminium. Paduan aluminium-titanium secara umum mengandung 3 – 10% berat Ti. Kisaran yang sama dari konsentrasi titanium digunakan dalam paduan Al-Ti-B dengan kadar

dari 0,2 – 1% dan rasio titanium terhadap boron berkisar dari sekitar 5 – 50. *Flux* yang dicampur dengan garam-garam mengandung titanium, boron, zirkonium, dan karbon. Garam-garam yang digunakan seperti *potassium fluorotitanate* dan *potassium fluoroborate* digunakan untuk membantu memasukkan titanium dan boron ke dalam cairan aluminium [33,35].

Efek penghalus butir terhadap mampu alir dari paduan aluminium begitu kompleks. Keberadaan titanium (Ti) yang rendah cenderung menurunkan mampu alirnya seperti paduan Al-4,5%Cu pada kadar Ti 0,15%, AlSi7Mg dan AlSi11Mg pada kadar Ti kurang dari 0,12%. Sementara kadar penghalus butir yang lebih tinggi dapat meningkatkan dari kadar tersebut dapat meningkatkan nilai mampu alirnya. Beberapa faktor dari penghalus butir yang dapat menurunkan mampu alir paduan aluminium adalah jenis dan jumlah penghalus butir, komposisi paduan, waktu tunggu (*holding time*), dan temperatur dalam dapur [34].

2.1.3. Heat Treatment Paduan Al

Sebagian paduan aluminium dapat dilakukan peningkatan sifat mekanis, perubahan struktur metalurgi, atau penghilangan tegangan sisa melalui perlakuan panas dan sebagian lagi tidak. Mekanisme ini melibatkan pembentukan fasa endapan yang dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan pada paduan dengan kategori dapat dikeraskan melalui perlakuan panas (*heat treatable*). Sistem paduan yang mengalami pengerasan secara endapan adalah paduan Al-Cu dan Al-Si-Cu dengan membentuk CuAl_2 , paduan Al-Cu-Mg, paduan Al-Mg-Si dengan membentuk Mg_2Si , paduan Al-Zn-Mg dengan membentuk MgZn_2 , dan paduan Al-Zn-Mg, Cu. Paduan aluminium yang lainnya dapat dikeraskan dengan mekanisme pengerjaan dingin seperti melalui proses pengerolan. Kedua kelompok paduan aluminium ini dapat dilakukan proses pelunakan untuk menurunkan kekuatannya dan meningkatkan keuletannya [36].



Gambar 2-2. Diagram fasa Al-Cu dan rentang temperturnya untuk *annealing*, *precipitation heat treating*, dan *solution heat treating* [36].

Pada paduan yang dapat dikeraskan melalui perlakuan panas, perlakuan panas untuk meningkatkan kekuatan paduan aluminium dilakukan dengan tiga tahap proses. Ketiga tahap itu adalah *solution heat treating*, *quenching*, dan *age hardening (precipitation hardening)* [36]. Pengendalian proses yang baik untuk menghasilkan sifat yang diinginkan perlu diperhatikan salah satunya adalah temperatur. Pada paduan Al-Cu rentang temperatur *heat treatment* diilustrasikan pada **Gambar 2-2** dimana *solution treatment* memiliki rentang temperatur lebih tinggi dan mendekati temperatur solidus sementara *age hardening* memiliki rentang temperatur yang lebih rendah dari temperatur *annealing*-nya.

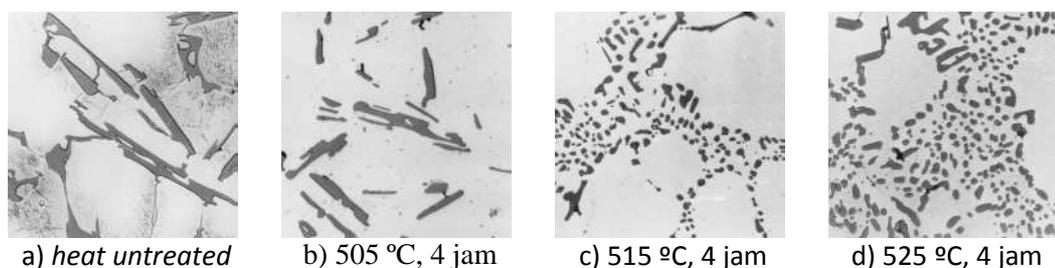
Solution Heat Treating

Tahap ini diperlukan untuk tiga tujuan yaitu (1) menghasilkan *solid solution* dimana sejumlah partikel penguat terlarut (fasa kaya-Cu dan kaya-Mg) yang terbentuk dari pembekuan dapat secara maksimal berada dalam kondisi terlarut dalam padatan; (2) menghomogenkan unsur-unsur paduan; dan (3) membulatkan fasa Si-eutektik. Proses yang dibutuhkan ini memerlukan waktu tahanan yang relatif lama dan temperatur yang cukup tinggi sehingga diperoleh larutan yang hampir homogen. Temperatur yang terlalu tinggi hingga melebihi temperatur eutektiknya dapat menyebabkan penurunan sifat mekanisnya dan terjadi pencairan secara lokal. Begitu pula pada temperatur yang terlalu rendah dari seharusnya juga akan

mempengaruhi sifat mekanisnya karena belum tercapainya larutan yang homogen [36,37].

Waktu yang diperlukan untuk proses ini dapat berkurang sehingga biaya yang diperlukan menjadi lebih rendah karena pemakaian energi menjadi berkurang. Faktor yang memegang peranan dalam tahap ini adalah struktur mikro yang dibentuk setelah pengecoran. Semakin kasar struktur mikro yang dihasilkan maka semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk tahap ini. Kekasaran struktur mikro ini bisa dilihat dari besarnya nilai SDAS [37]. Jenis cetakan yang digunakan akan mempengaruhi waktu yang diperlukan karena menghasilkan struktur mikro yang berbeda seperti pada paduan aluminium yang dapat dicor dengan cetakan pasir dan permanen [36].

Penambahan *modifier* seperti stronsium juga dapat menurunkan waktu yang dibutuhkan untuk proses ini. Proses ini dapat diselesaikan dalam hitungan menit pada temperatur di atas 500°C. Hal ini karena stronsium telah merubah bentuk silikon eutektik menjadi bulat sebelum proses *solution heat treatment* dilakukan. Jumlah stronsium yang dimasukkan juga ada batasannya dimana jika melebihi nilai tersebut maka sifat mekanisnya dapat berkurang [38]. Umumnya perubahan bentuk dan ukuran silikon eutektik terjadi selama proses ini pada temperatur dan waktu tertentu. Proses *solution heat treatment* dan perubahan silikon eutektik terhadap paduan AlSi9Cu3 selama 4 jam pada temperatur 505°C, 515°C, dan 525°C ditampilkankan pada **Gambar 2-3**. Fasa silikon eutektik ditampilkan dalam warna abu-abu gelap sementara matriks α ditampilkan dalam warna abu-abu terang [39].



Gambar 2-3. Efek *solution heat treatment* pada bentuk silikon eutektik [39].

Quenching

Tahap ini yang paling kritis dimana bertujuan untuk mempertahankan *solid solution* yang telah terbentuk melalui pendinginan cepat hingga temperatur tertentu yang lebih rendah. Selain itu berguna pula untuk menjaga sejumlah kecil dari tempat kisi-kisi yang kosong yang berguna untuk memandu difusi temperatur rendah yang diperlukan terjadi. Kehati-hatian dalam proses ini khususnya terhadap pembentukan endapan yang dapat menurunkan sifat mekanis dan ketahanan korosi perlu diperhatikan seperti dari bentuk komponennya. Bentuk komponen yang rumit termasuk yang memiliki perbedaan ketebalan memerlukan pendinginan yang relatif lambat yang dapat dilakukan dengan menggunakan media *quenching* yang hangat dengan temperatur 65 – 80°C [36].

Age Hardening

Tahap terakhir ini dapat dilakukan pada temperatur ruang (*natural aging*) atau dengan *precipitation heat treatment* (*artificial aging*). *Natural aging* dengan pengkodean temper T3- dan T4- dicirikan dengan perbandingan yang tinggi antara kekuatan tarik terhadap kekuatan luluhnya dan *fracture toughness* yang tinggi, dan ketahanan lelehnya. *Artificial aging* umumnya dilakukan pada temperatur yang rendah (115 – 190°C) dan waktu yang lama dengan waktu 5 – 48 jam. Pengkodean temper untuk proses ini adalah T5- hingga T10-. Temper T6 umumnya menghasilkan kekuatan tertinggi tanpa mengorbankan sifat lainnya pada tingkat rendah sehingga berguna dalam penggunaan di kerekayasaan [36].

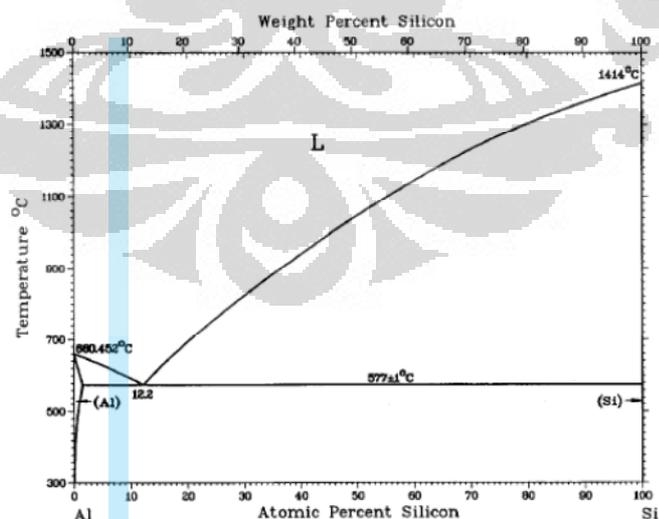
2.1.4. Paduan aluminium seri 3xx.x untuk Cylinder Head

Paduan aluminium seri 3xx.x merupakan dengan paduan utamanya adalah silikon (Si) dan tembaga (Cu) atau magnesium (Mg). Pemilihan paduan ini sebagai material untuk mesin dengan cara cor karena mampu cornya yang sangat baik dengan cetakan pasir atau permanen, sifat mekanis yang baik (kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan ausnya tinggi), mampu alir baik sekali. Paduan ini juga memiliki kemampuan laku panas yang baik sehingga dapat diatur kekuatannya melalui berbagai jenis *heat treatment* [33,40].

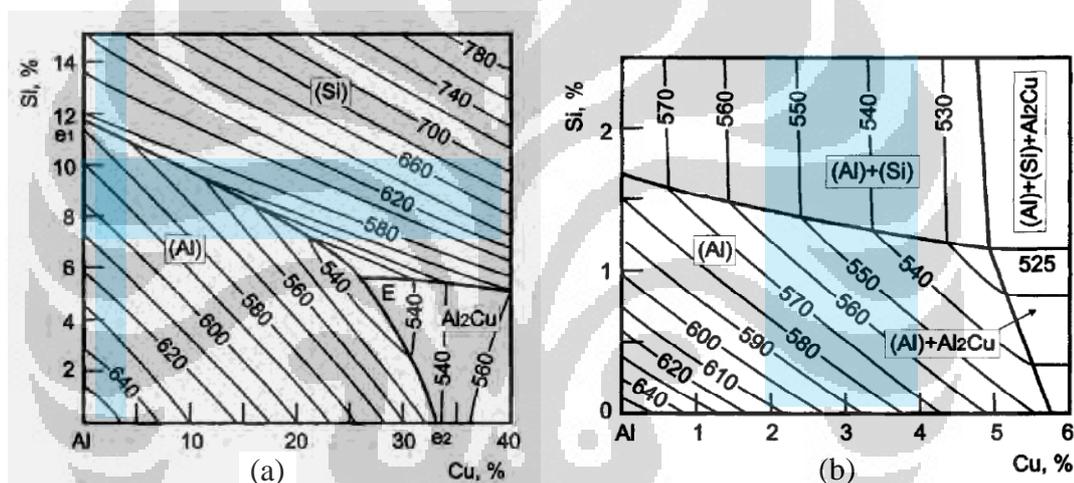
Tabel 2-2. Komposisi kimia AC4B (JIS) dan kesetaraannya [30,38,41-44].

Standar	Seri	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ag	Ti	Sn	Lainnya	
													Ma-sing	To-tal
JIS	AC4B (H-5202)	7,0- 10,0	≤1,0	2,0- 4,0	≤0,5	≤0,5	≤0,2	≤0,3 5	≤1,0	-	≤0,2	≤0,1	-	-
	ADC10 (H-5302)	7,5- 9,5	≤1,3	2,0- 4,0	≤0,5	≤0,3	-	≤0,5	≤1,0	-	-	≤0,2	-	-
ANSI	333.0	8,0- 10,0	1,0	3,0- 4,0	0,50	0,05 -0,5	-	0,50	1,0	-	0,25	-	-	0,50
	A333.0	8,0- 10,0	1,0	3,0- 4,0	0,50	0,05 -0,5	-	0,50	3,0	-	0,25	-	-	0,50
EN	AB-46000 AB- /AlSi9Cu3 (Fe)	8,0- 11,0	0,6- 1,1	2,0- 4,0	0,55	0,15 - 0,55	0,15	0,55	1,2	-	0,20 /0,25	0,25	0,05	0,25
	AB-46200 /AB- AlSi8Cu3	7,5- 9,5	0,7 /0,8	2,0- 3,5	0,15 - 0,65	0,15 - 0,55	-	0,35	1,2	-	0,20 /0,25	0,15	0,05	0,25

Dalam pembuatan *cylinder head* dua silinder ini adalah AC4B dengan komposisi kimia seperti yang dijelaskan pada **Tabel 2-2** dimana unsur utamanya Si memiliki kadar 7 – 10% berat dan Cu dengan kadar 2 – 4% berat. Sementara kadar Mg dibatasi tidak lebih dari 0,5% berat. Paduan AC4B yang merupakan bagian dari JIS H-5202 ini memiliki kesetaraan dengan standar JIS H-5302 dengan ADC10, standar ANSI dengan 333.0 dan A333.0 dan standar EN dengan AB-46000 dan AB-46200.

**Gambar 2-4.** Diagram dua fasa Al-Si [45].

Dalam memproduksi paduan aluminium seri ini, diagram dua fasa Al-Si atau diagram tiga fasa Al-Si-Cu dapat dijadikan acuan untuk menentukan karakteristik pembekuannya. Berdasarkan diagram dua fasa Al-Si pada **Gambar 2-4** diketahui bahwa titik eutektik dicapai ketika kadar Si adalah sebesar 12,2% berat dengan titik lebur pada $577\pm 1^\circ\text{C}$ yang juga merupakan titik padatan (*solidus*). Titik lebur aluminium murni terjadi pada temperatur $660,452^\circ\text{C}$ sedangkan titik lebur silikon murni pada temperatur 1414°C [45]. Rentang pembekuan dari AC4B berdasarkan diagram fasa ini berkisar antara $23 - 43^\circ\text{C}$. Dengan demikian rentang pembekuan yang merupakan rentang temperatur *liquidus* – *solidus* paduan ini dikelompokkan sebagai paduan yang memiliki rentang pembekuan pendek dengan jarak kurang dari 50°C [46].



Gambar 2-5. Diagram tiga fasa Al-Si-Cu, (a) temperatur cair (*liquidus*), dan (b) temperatur padat (*solidus*). [47].

Menimbang komposisi penyusun utama dari AC4B yang tidak hanya terdiri dari aluminium dan silikon maka perlu untuk menggunakan diagram tiga fasa. Dari diagram tiga fasa Al-Si-Cu pada **Gambar 2-5** terlihat bahwa rentang antara temperatur *liquidus* dan temperatur *solidus* dapat dilihat dengan lebih teliti. Temperatur *liquidus* AC4B ini berkisar antara $578 - 606^\circ\text{C}$ sementara temperatur *solidus* berada pada rentang $534 - 554^\circ\text{C}$. Disini terlihat bahwa rentang pembekuan AC4B berbeda dibandingkan jika hanya memprediksi rentang pembekuannya berdasarkan pada diagram dua fasa Al-Si. Rentang pembekuan dari paduan ini berada dalam kisaran $24 - 72^\circ\text{C}$ yang dapat dikelompokkan ke

dalam dua macam rentang pembekuan, yaitu pendek jika kurang dari 50°C dan rentang pembekuan menengah dimana berada pada rentang 50 - 110°C [46].

Sifat mekanis paduan AC4B dalam JIS H-5202 tidak dijelaskan secara detail dimana hanya menyatakan UTS dari kondisi setelah pengecoran (F) dan setelah *temper* (T6) yang dirangkum dalam **Tabel 2-3** bersama dengan paduan lainnya yang setara. Dengan memperhatikan UTS antara AC4B dan paduan lainnya terlihat bahwa setelah pengecoran UTS minimal AC4B sama dengan EN-AB-46200 yang dihasilkan dari cetakan pasir. Nilai kekerasan dari AC4B setelah pengecoran diperkirakan adalah juga mendekati nilai 60 HB. Melalui proses *heat treatment*, nilai UTS AC4B bisa menyamai UTS minimal 333,0 yang dihasilkan dengan cetakan permanen yang telah melewati proses *temper* T5. Nilai kekerasan dari AC4B setelah *temper* T6 diperkirakan bisa mencapai nilai 85 HB. Dengan perlakuan *temper* yang sama, T6, terlihat bahwa UTS minimum paduan seri 333,0 masih lebih tinggi dari AC4B. Nilai UTS ini setara dengan nilai UTS yang dihasilkan paduan ADC10, EN-AB-46000 dan EN-AB-46200 melalui proses *die casting*. Dengan demikian maka perbedaan komposisi kimia yang tidak terlalu besar namun dihasilkan dari proses pengecoran yang berbeda menunjukkan sifat mekanis yang berbeda pula. Pemilihan proses *heat treatment* yang tepat dapat memperbaiki sifat mekanis yang telah dihasilkan dari proses pengecoran.

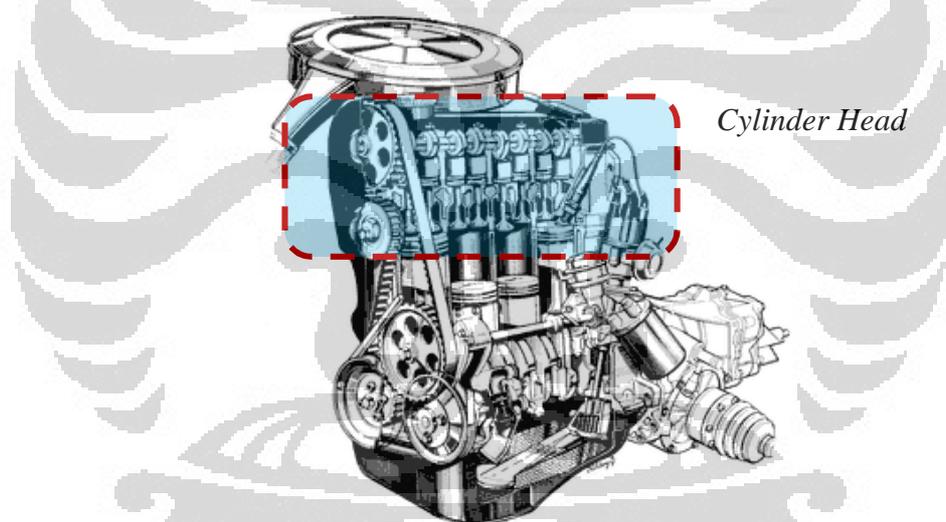
Tabel 2-3. Beberapa sifat mekanis AC4B dan kesetaraannya [30,38,41,43,44].

Standar	Seri	Cetakan	Temper	ρ	UTS	YS	E	Hardness			
				g/cm ³	MPa	MPa	%	HB	HRB		
JIS	AC4B	Cetakan Pasir	F	...	140	...	...	...	...
			T6		210						
	ADC10	Die Casting	...	...	241	157	1,5	73,6	39,4
ANSI	333.0	Cetakan Permanen	F	2,77	195	...	...	105	...
			T5		205						
			T6		240						
	A333.0	-	...	...	...	...	...	...
EN	AB-46000 / AB- AlSi9Cu3 (Fe)	...	...	2,65	240 – 310	140 – 240	0,5 – 3	80 – 120	...
			<i>Sand</i>		F	2,76	150	90	1	60	...
			<i>Shell</i>		F		170	100	1	75	
			<i>Pressure Die</i>		F		240	140	1	80	

2.2 *Cylinder Head* dalam Mesin

2.2.1. Sistem *Cylinder Head*

Cylinder head pada **Gambar 2-6** adalah salah satu komponen utama dalam suatu mesin. Umumnya, komponen ini diletakkan pada bagian atas *engine block* dan menutupi silinder sebagai tempat piston yang menggerakkan *crankshaft*. Pada bagian yang menutup silinder ada dua jenis saluran yang dilengkapi katup untuk menghisap dan membuang campuran bahan bakar dan udara, dan satu lubang untuk penempatan pemacu pembakaran di ruang bakar, seperti busi. Kerja membuka dan menutup dari katup ini diatur oleh suatu *camshaft* yang terletak pada bagian atas dari *cylinder head*. Sementara pergerakan dari *camshaft* ini disebabkan dari putaran yang dihasilkan dari *crankshaft* akibat gerak turun-naik dari piston. Putaran yang dihasilkan oleh *crankshaft* ini dihubungkan melalui suatu sistem pemindah daya seperti roda gigi, rantai, atau *belt* ke *camshaft* [13].



Gambar 2-6. Gambar potongan mesin bensin empat silinder *in-line* [13].

Pada *cylinder head*, proses pencampuran udara dan bahan bakar hingga terjadi proses ledakan pada ruang bakar menyebabkan piston bergerak turun-naik, merupakan kondisi kerja yang paling berat. Proses ini terjadi pada temperatur lebih dari 250°C dalam jangka waktu yang lama sesuai dengan lamanya mesin beroperasi. Selain temperatur, pada proses ini terjadi tekanan yang cukup besar sekitar 101,97 – 122,37 kg/cm². Kondisi kerja yang berat dalam ruang bakar menyebabkan *cylinder head* mengalami beban *thermomechanical fatigue* (TMF) pada daerah *dome* dan sekitarnya. Paduan aluminium yang digunakan akan

Universitas Indonesia

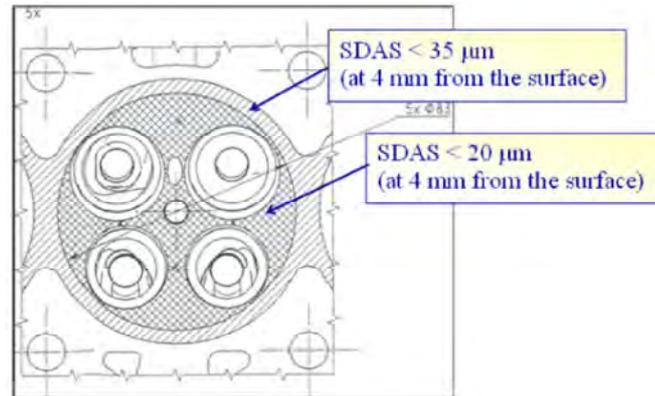
mengalami perilaku mekanis yang melibatkan keplastisannya pada temperatur rendah dan viskoplastisitas yang besar pada temperatur tinggi. Proses *aging* secara tidak direncanakan juga terjadi ketika beroperasi pada temperatur di atas 150°C. Mekanisme tegangan dan regangan berperan dalam siklus *thermomechanical* dalam bentuk *low-cycle fatigue* dan *high-cycle fatigue*. Pemahaman proses kelelahan ini secara menyeluruh sangat kompleks karena mekanisme yang bekerja pada siklus *thermomechanical*. Faktor-faktor struktur mikro sangat berpengaruh seperti penghalusan struktur mikro, porositas, oksida, modifikasi silikon, fraksi eutektik, fasa endapan dan intermetalik. [14,15].

2.2.2. Perbaikan dalam Sistem *Cylinder Head*

Berbagai usaha telah dilakukan untuk mengatasi permasalahan ini dengan mengendalikan struktur mikronya melalui laju pendinginan sehingga mengurangi nilai *secondary dendrite arms spacing* (SDAS) dan porositas. Nilai SDAS yang kecil berpengaruh positif terhadap *low-cycle fatigue* sementara porositas akan memiliki pengaruh pada *high-cycle fatigue* [13].

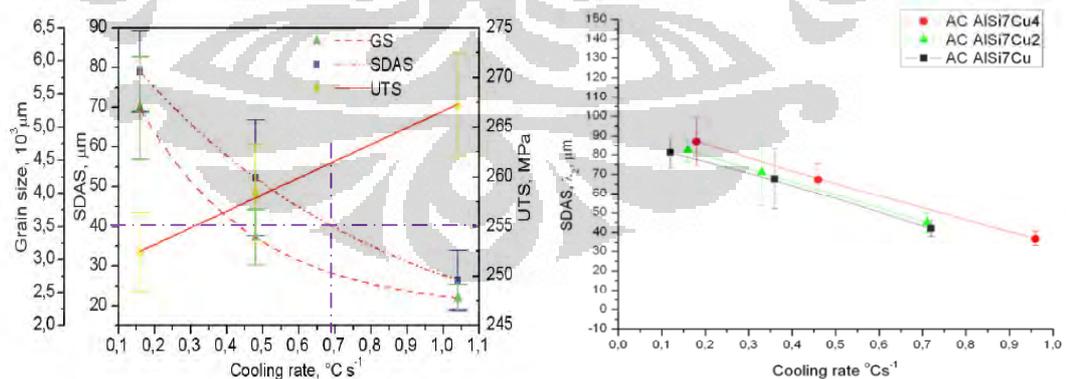
2.2.2.1 *Secondary Dendrite Arms Spacing*

Nilai SDAS yang kecil juga akan mengurangi waktu untuk homogenisasi saat perlakuan panas akibat jarak difusi lebih pendek. Secara umum, nilai SDAS bervariasi dari berbagai model *cylinder head* yang berkisar 20 – 40 μm pada jarak 3 – 5 mm dari permukaan ruang bakar. Namun ada juga yang mensyaratkan lebih ketat dimana SDAS < 20 μm pada jarak 4 mm seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 2-7**. Permukaan ruang bakar menjadi perhatian karena di sini mengalami tegangan secara termal dan secara mekanis yang paling besar. Pada prakteknya sulit untuk mendapatkan nilai SDAS yang sesuai karena bentuk geometris yang rumit dari *cylinder head* dengan adanya lubang dan perbedaan ketebalan [13].



Gambar 2-7. Nilai SDAS pada bagian dalam dan luar dari daerah ruang bakar [13].

Pembentukan SDAS dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain laju kecepatan pendinginan dan komposisi kimia. SDAS juga ditentukan oleh waktu pembekuan melalui zona *mushy*, dimana semakin besar rentang zona ini semakin besar pula nilai SDASnya. Laju pendinginan yang semakin cepat mempengaruhi nilai SDAS menjadi lebih kecil seperti halnya ukuran besar butir. Beberapa penelitian yang telah dilakukan pada berbagai jenis paduan aluminium yaitu, Al-Si dan Al-Si-Cu pada **Gambar 2-8** menunjukkan bahwa laju pendinginan minimal sebesar $0,7^{\circ}\text{C}/\text{detik}$ harus dicapai untuk menghasilkan nilai batas maksimal SDAS sekitar $40 \mu\text{m}$. Sementara laju pendinginan yang lebih besar dari $1,1^{\circ}\text{C}/\text{detik}$ perlu dicapai untuk menghasilkan nilai SDAS lebih kecil dari $20 \mu\text{m}$ [16-19].



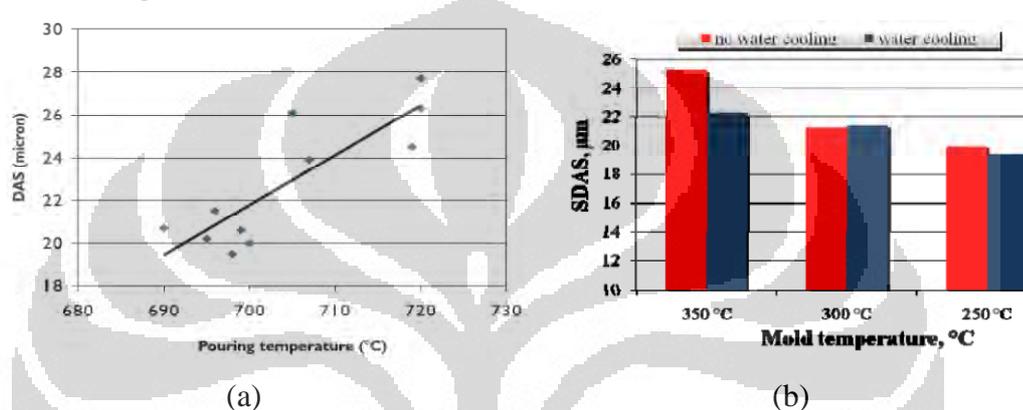
(a)

(b)

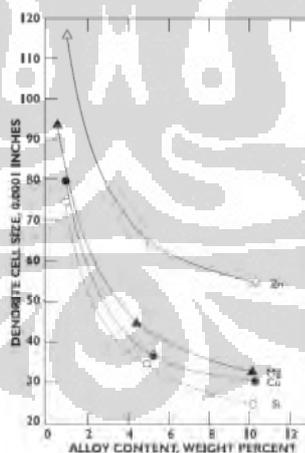
Gambar 2-8. Pengaruh laju pendinginan terhadap nilai SDAS dan ukuran butir pada paduan aluminium (a) AlSi9Cu, dan (b) AlSi7Cu(2/4) [16,17].

Dalam mencapai laju pendinginan yang tinggi, metode yang dilakukan adalah dengan menurunkan temperatur tuang dari aluminium cair atau dengan

menggunakan cetakan dengan temperatur yang rendah baik dengan atau tanpa pendingin tambahan. Penurunan temperatur tuang lebih disukai pada cetakan permanen karena memberikan efek yang lebih besar dibandingkan dengan penurunan temperatur cetakan dalam menghasilkan laju pendinginan yang tinggi seperti yang dijelaskan dalam **Gambar 2-9**. Dalam produksi *cylinder head*, faktor-faktor yang dapat mempengaruhi laju pembekuan adalah temperatur lokal cetakan, temperatur tuang, dan konfigurasi geometrik dari *cylinder head* dalam daerah ruang bakar [17-19].



Gambar 2-9. Laju pendinginan yang tinggi dapat dicapai dengan (a) penurunan temperatur tuang dan (b) penurunan temperatur cetakan [18,19].



Gambar 2-10. Pengaruh empat unsur paduan dalam aluminium pada laju pendinginan $0,75^{\circ}\text{C}/\text{detik}$ [19].

Nilai SDAS juga dipengaruhi oleh komposisi kimia sebagai mana diilustrasikan pada **Gambar 2-10** dimana unsur yang berpengaruh besar secara berturut-turut adalah Si, Cu, Mg, dan Zn. Nilai SDAS semakin rendah dengan semakin tingginya persentase berat unsur paduan yang terkandung dalam aluminium cair.

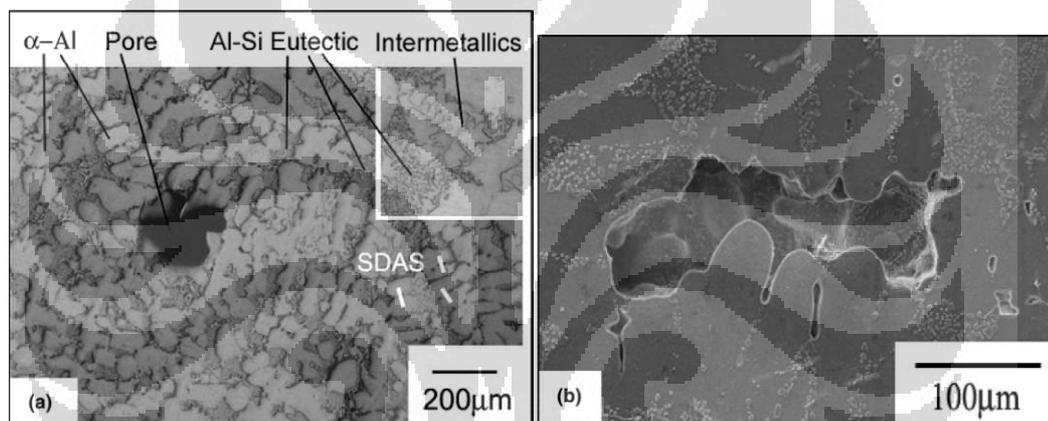
Universitas Indonesia

Dengan memahami pengaruh unsur paduan terhadap nilai SDAS maka dapat dipilih temperatur tuang dan cetakan yang sesuai sehingga menghasilkan nilai SDAS yang diinginkan. Selain itu dapat pula didesain konfigurasi geometri ruang bakar dalam daerah ruang bakar dan dari *riser* [19]. Nilai SDAS sendiri dapat diprediksi dengan menggunakan perhitungan seperti yang dirumuskan pada persamaan (2-1).

$$SDAS = C \cdot t_s^n \quad (2-1)$$

Dimana t_s adalah waktu pembekuan lokal pada daerah yang akan diketahui nilai SDASnya, C dan n adalah konstanta yang terkait dengan setiap material [27].

2.2.2.2 Porositas

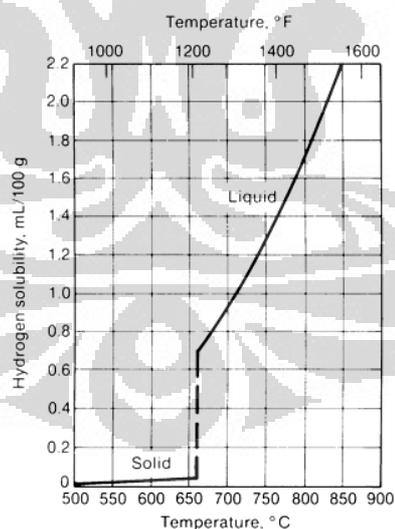


Gambar 2-11. Porositas yang terbentuk dalam paduan aluminium E319 [20].

Porositas di benda cor adalah hal yang umum dan bisa terbentuk dalam berbagai hal seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2-11**. Dari ukurannya, porositas dapat dikelompokkan menjadi mikro dan makro yang dibedakan berdasarkan kemampuan untuk dilihat mata. Porositas makro dapat dilihat dengan mudah oleh mata saat inspeksi radiografi, sementara porositas mikro hanya dapat dilihat dengan perbesaran khusus. Berdasarkan letaknya, porositas ada yang dekat dengan permukaan dimana bisa diamati dengan teknik *dye penetrant*, dan porositas yang lebih ke dalam dimana bisa diamati dengan teknik radiografi. Pada prakteknya, keberadaan porositas tidak berarti produk tersebut harus langsung ditolak (*rejected*) karena lokasi porositas dan fungsi komponen menjadi pertimbangan lainnya [46]. Dalam kaitannya dengan TMF, porositas menjadi perhatian yang serius. Tingkat porositas yang tinggi dan diikuti dengan kehadiran

porositas yang besar dan tidak beraturan adalah faktor utama dalam menurunkan kekuatan leleh pada komponen *cylinder head* [15].

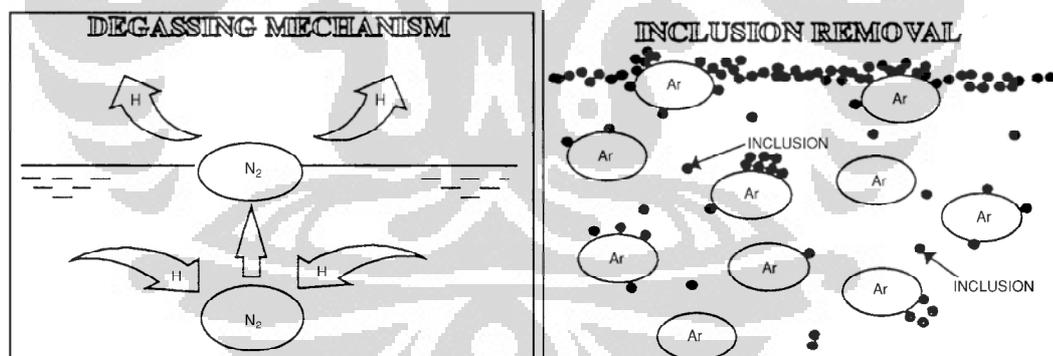
Porositas dapat terjadi akibat kombinasi antara penyusutan logam dan pembentukan gas hidrogen ketika membeku. Kebersihan cairan sangat mempengaruhi keberadaan porositas. Cairan yang mengandung pengotor seperti inklusi akan menghasilkan porositas yang lebih banyak. Keberadaan porositas makro tentunya dapat mengurangi sifat mekanisnya seperti kekuatan tarik, elongasi, keuletan, ketangguhan, dan ketahananlelehnya akibat dari pembentukan konsentrasi tegangan. Porositas yang dihasilkan dari gas hidrogen dapat dijumpai dalam bentuk yang bulat jika terbentuk pada awal pembekuan atau dalam bentuk antar dendrit jika terbentuk di akhir pembekuan [46]. Dari bentuk ukurannya, porositas dari gas hidrogen dapat dibedakan besarnya tingkat kandungan gas hidrogen. Kandungan hidrogen yang besar dapat membentuk porositas antar dendrit yang cukup besar sementara kandungan hidrogen yang rendah hanya menghasilkan porositas dalam ukuran mikron dan membentuk rongga yang subkritis [33].



Gambar 2-12. Kelarutan hidrogen dalam aluminium pada tekanan 1 atm [33].

Pembentukan porositas dari gas hanya dimungkinkan dari hidrogen yang terperangkap saat pembekuan. Hal ini karena kelarutan hidrogen yang tinggi dalam cairan aluminium dibandingkan dalam padatnya. Hubungan antara kelarutan hidrogen dalam aluminium dijelaskan dalam **Gambar 2-12** di atas.

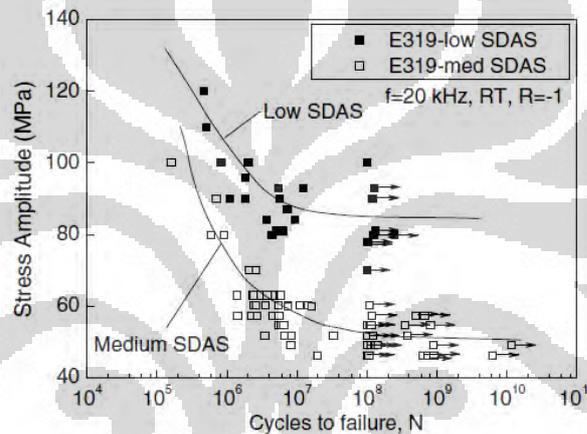
Hidrogen dapat masuk ke dalam cairan aluminium disebabkan oleh uap air yang masuk ke cairan aluminium melalui beberapa cara. Atmosfir yang mengandung uap air dapat menyebabkan hidrogen terurai dan masuk ke dalam cairan. Keberadaan lapisan penghalang dari oksida aluminium pada permukaan cairan dapat menghalangi masuknya hidrogen namun pergolakan cairan akibat mengalami perpindahan dapat menyerap hidrogen. Uap air dapat dijumpai dalam unsur padu seperti magnesium, modifikator, *flux*, dan bahkan material yang dimasukkan ke dalam dapur saat *preheating*. Penyimpanan material tersebut memang harus menjadi perhatian sehingga penyerapan uap air oleh material tersebut dapat dihindari. Metode yang lain yang harus dilakukan untuk menghilangkan hidrogen dari cairan aluminium adalah dengan *degassing* melalui *fluxing* yang kering, gas nitrogen murni, gas argon, gas klorin, senyawa *hexacholoroethane*, dan *freon*. Mekanisme ini ditunjukkan pada **Gambar 2-13(a)** yang bekerja untuk menghilangkan hidrogen dengan cara perbedaan difusi tekanan. Pada **Gambar 2-13(b)** ditunjukkan bagaimana inklusi bisa diangkat ke atas permukaan melalui proses ini [33,48].



Gambar 2-13. Skematis proses *degassing* menggunakan gas N₂ dan Ar yang dapat dilakukan dengan mesin *rotary degassing* (a) mekanisme *degassing* dan (b) pengangkatan inklusi [48].

Porositas mikro yang ditemukan di antara dendrit-dendrit lebih disebabkan oleh ketidakmampuan logam cair untuk mencapai daerah antar dendrit ketika penyusutan terjadi dan gas terbentuk. Porositas mikro ini sulit dihilangkan karena terjadi pada akhir pembekuan khususnya pada logam dengan rentang pembekuan panjang atau memiliki daerah *mushy*. Cara yang paling efektif adalah dengan meningkatkan perbedaan termal yang sering dicapai dengan peningkatan laju

pendinginan sehingga panjang zona *mushy* berkurang. Namun cara ini memiliki keterbatasan karena sifat termal cetakan dan paduannya, dan bentuk dari benda cornya. Bentuk porositas mikro yang dapat mempengaruhi sifat mekanis dari benda cor ini menjadi penting. Bentuk yang memanjang akan lebih berbahaya dibandingkan bentuk yang bulat. Metode *hot isostatic pressing* (HIP) dapat pula digunakan baik untuk menghilangkan porositas mikro maupun makro dengan biaya relatif rendah. Keberadaan panas dan tekanan dalam prosesnya dapat memungkinkan terjadinya perubahan struktur mikro tetapi cacat lain yang ada seperti inklusi dan oksida tetap ada bahkan porositas yang berada dipermukaan juga [46].



Gambar 2-14. Efek struktur mikro terhadap ketahanan lelah [20].

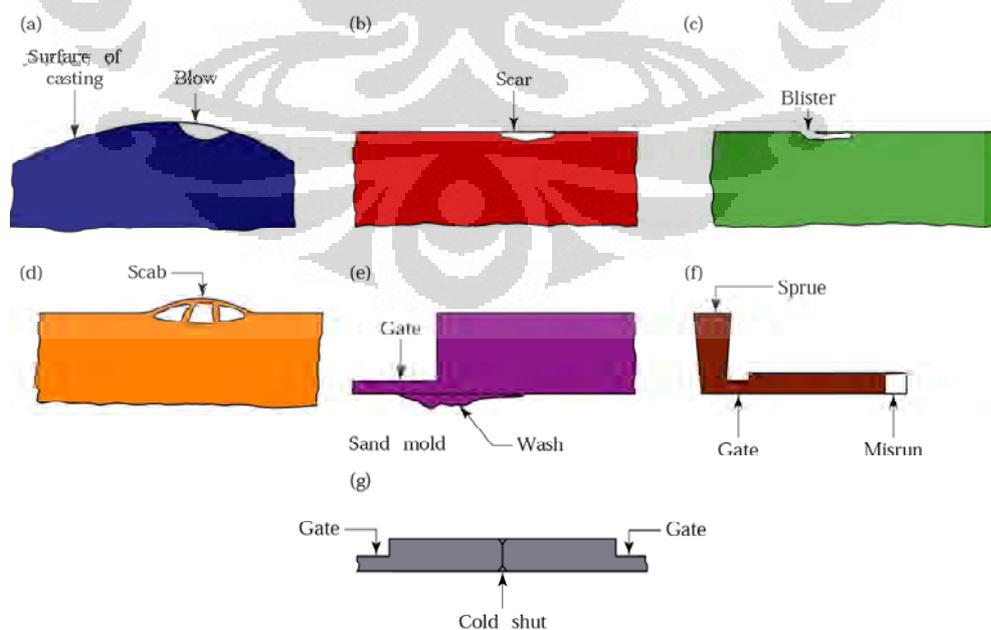
Pengaruh struktur mikro yang terkait dengan porositas, terhadap umur kelelahan sudah dipelajari oleh X. Zhu dan kawan-kawan [20] pada paduan E319-T7. Faktor kunci yang menentukan umur kelelahan dari paduan ini adalah ukuran dari porositas. Distribusi ukuran pori dan fitur struktur mikro lain memberikan variasi dari umur kelelahan. Keberadaan SDAS yang kecil dapat mengendalikan ukuran porositas yang lebih kecil dan penyebaran porositas yang lebih merata. Nilai SDAS yang kecil memiliki ketahanan lelah yang lebih tinggi dari pada SDAS yang berukuran menengah pada pengujian kelelahan dengan frekuensi ultrasonik dengan hasil yang ditunjukkan pada **Gambar 2-14**. Salah satu alasannya adalah karena dengan semakin besarnya SDAS maka semakin besar pula porositasnya dibandingkan dengan SDAS yang lebih kecil. Pada sampel dengan nilai SDAS

medium, perambatan retak diawali dari pori-pori penyusutan sementara SDAS kecil 90% perambatan retak diawali dari pori-pori penyusutan sementara 10% sisanya dari fitur struktur mikro lainnya seperti *twin boundaries*.

2.3 Proses Pengecoran

2.3.1. Cacat Pengecoran

Pada prinsipnya, untuk menghasilkan produk cor dengan kualitas baik ada sepuluh aturan yang harus dipenuhi. Kesepuluh aturan itu dimulai dari mempersiapkan cairan yang baik yang dimulai dari persiapan, pemeriksaan, dan perlakuan. Tiga aturan terkait dengan proses penuangan logam cair adalah menghindari aliran logam cair yang turbulen, lapisan laminar yang terbentuk, dan menghindari gelembung udara yang dapat timbul selama penuangan. Satu aturan terkait dengan perlakuan cetakan yaitu inti cetakan yang tidak menghasilkan gas-gas. Tiga aturan yang terkait dengan desain cetakan dimana cetakan yang didesain harus bebas dari penyusutan pada benda cor, memperkirakan waktu pembekuan dalam hubungan terhadap waktu untuk konveksi yang dapat menyebabkan kerusacakan/cacat, menghilangkan segregasi. Dua aturan terakhir terkait dengan aktifitas setelah proses pengecoran yaitu menghilangkan tegangan sisa dalam proses *heat treatment* dan memberikan titik-titik lokasi yang baik untuk pemeriksaan dan pemesinan [49].



Gambar 2-15. Beberapa contoh cacat pengecoran yang umum [50].

Jika proses pengecoran tidak bisa memenuhi aturan-aturan tersebut maka dapat dipastikan cacat-cacat akan dijumpai dalam produknya seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 2-15**. Cacat tersebut oleh *International Committee of Foundry Technical Associations* disusun standar pengelompokannya yang dinyatakan dengan huruf besar. Standar ini dikelompokkan ke dalam tujuh kategori dasar cacat yaitu [50]:

A – *Metallic projection* terdiri dari *fins, flash, swells*, dan permukaan kasar.

B – *Cavities* terdiri dari *blowholes, pinholes*, dan porositas.

C – *Discontinuities* terdiri dari *crack, cold/hot tearing*, dan *cold shuts*.

D – *Defective surface* terdiri dari *folds, laps, scars, adhering sand layer*, dan *oxide scale*.

E – *Incomplete casting* terdiri dari *misrun, insufficient molten metal*, dan *runout*.

F – *Incorrect dimensions/shape* seperti kelonggaran penyusutan yang tidak sesuai.

G – *Inclusions* terdiri dari inklusi metalik dan non-metalik.

2.3.2. Kriteria Niyama

Kriteria Niyama [21-23] yang dikembangkan oleh Dr. Niyama, peneliti Jepang, saat ini telah digunakan dalam memprediksi porositas penyusutan oleh perbedaan temperatur yang dangkal. Awalnya penelitian ini dikembangkan untuk memprediksi porositas penyusutan pada baja dan bekerja dengan baik namun saat ini juga digunakan pada material lain seperti paduan aluminium dan paduan tembaga. Rumusan yang digunakan sangatlah sederhana dengan menggunakan parameter termal saja tanpa melibatkan faktor lain seperti gravitasi dan ini ditunjukkan pada persamaan (2-2).

$$N_y = G / \sqrt{\dot{T}} \quad (2-2)$$

Dimana:

G adalah perbedaan temperatur [$^{\circ}\text{C}/\text{cm}$], dan

\dot{T} adalah laju pendinginan [$^{\circ}\text{C}/\text{s}$].

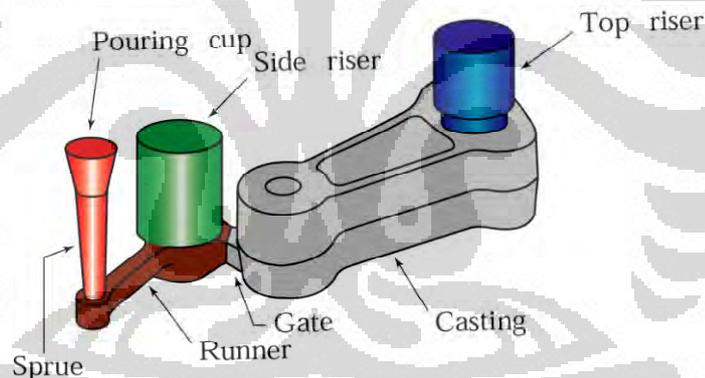
Kedua nilai tersebut dievaluasi pada temperatur tertentu ketika pembekuan akan berakhir dan ini akan sangat mudah jika dilihat pada saat proses simulasi dengan

Universitas Indonesia

perangkat lunak pengecoran. Nilai Niyama yang lebih rendah dari batasnya maka dapat diperkirakan bahwa porositas penyusutan akan terjadi di sana. Batasan nilai untuk paduan aluminium berkisar pada nilai 0,25 – 0,3 dan nilai ini berbeda-beda sesuai dengan jenis materialnya seperti paduan tembaga, besi tuang, dan baja.

2.3.3. Desain Pengecoran

Untuk menghasilkan suatu produk cor maka diperlukan sistem untuk menyalurkan logam cair yang dikenal dengan *gating system* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2-16**. Sistem ini menyalurkan logam cair ke dalam rongga cetakan yang kosong untuk menjadi suatu produk benda cor. Logam dialirkan mulai dari *pouring cup* menuju *downsprue* atau *sprue*, dilanjutkan melalui *runner* dan *ingate* yang mengarahkan ke benda cor. Logam cair perlu untuk dijaga kualitasnya dengan menghindari dari pengaruh turbulensi yang disebabkan penuangan. Hal ini diperoleh dengan mendesain bagian atas *sprue* melalui *pouring cup* dan menjaga aliran logam cair tidak melebihi kecepatannya [49,50].



Gambar 2-16. Ilustrasi skematis dari *riser-gated casting* [50].

Dari hukum mekanika fluida yang menyatakan bahwa jumlah fluida per detik melewati semua titik dalam suatu saluran penuh adalah sama meski ada perubahan luas penampang dan kecepatan. Hukum ini dapat ditulis dalam persamaan (2-3) dan dapat digunakan untuk menentukan luas penampang bagian atas dan bawah *sprue*.

$$Q = A_1v_1 = A_2v_2 \quad (2-3)$$

Dimana, Q laju aliran volumetrik, A_1 luas penampang bagian atas *downsprue*, v_1 kecepatan bagian atas *downsprue*, A_2 luas penampang bagian bawah *downsprue*,

dan v_2 kecepatan bagian bawah *downsprue* [50]. Perhitungan ini tidak hanya dapat digunakan untuk menghitung *spure* tetapi dapat juga untuk menghitung kecepatan aliran pada bagian tertentu sehingga kecepatan aliran tidak melebihi kecepatan kritisnya.

Penyusutan dan retak yang terkait dengannya dalam pembekuan logam cair dapat diatasi dengan pemasangan *riser*. Desain *riser* yang optimum ditentukan oleh penempatan yang tepat, volume yang sesuai, dan waktu yang tepat. Metode untuk menentukan dimensi *riser* yang dibutuhkan umumnya dilakukan dengan empat cara [46], yaitu: *shape factor method*, *geometric method*, *modulus method*, dan *computerized method*. Dalam menentukan volume *riser* dengan menggunakan *modulus method* maka menghitung modulus *casting* benda cor harus ditetapkan terlebih dahulu. Setelah modulus *casting* benda ditetapkan penghitungan modulus *casting riser* dapat dilakukan. Biasanya modulus *casting riser* (M_r) dihitung sebesar 1,2 kali dari modulus *casting* (M_c) benda cor. Modulus *casting* untuk *riser* dan benda cor dihitung dengan menggunakan persamaan (2-4).

$$M_c = V_c / A_c \quad (2-4)$$

Dimana, M_c modulus *casting*, V_c volume benda cor, dan A_c luas permukaan benda cor [46]. Perhitungan dimensi *riser* dengan bentuk sederhana seperti silinder dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2-5). Namun untuk *riser* dengan bentuk lain persamaan tersebut tidak berlaku.

$$M_r = DH / (4Hx + Dy) \quad (2-5)$$

Dimana, M_r modulus *casting* dari *riser*, D diameter *riser*, H tinggi *riser*, x faktor insulasi dinding samping (*sleeve*) dimana untuk *sand casting* $x = 1$, dan $y =$ faktor *hot topping* [46].

2.3.4. Biaya Pengecoran

Pengecoran *cylinder head* dua silinder selama ini telah dilakukan dengan menggunakan metode pengecoran secara gravitasi dengan cetakan pasir (*sand casting*). Pengecoran melalui metode *sand casting* ini memiliki karakteristik antara lain: hasil akhir permukaan yang kasar, porositas dengan tingkat menengah hingga terburuk, kompleksitas bentuk yang sangat baik, akurasi dimensi yang

menengah, ketebalan minimum yang dapat dibuat 3 mm, dan toleransi dimensi 1,6 – 4 mm. Berdasarkan biayanya, metode ini memberikan biaya yang rendah untuk cetakan dan perlengkapan dan biaya pekerja yang rendah hingga menengah. Selain itu metode ini memungkinkan proses produksi dilakukan hanya untuk satu unit produk saja dengan laju produksi dalam satu jam tidak lebih dari 20 unit [50].

Perhitungan biaya dan pengendalian biaya pengecoran telah menjadi peralatan utama untuk mengambil keputusan dalam persaingan industri [51]. Berbagai metode perhitungan dan pengendalian biaya telah dikembangkan untuk membantu proses ini. Biaya-biaya yang keluar ini pada dasarnya dimulai saat desain dan dari sini perkiraan biaya yang dibutuhkan sudah bisa diperhitungkan. Desain komponen yang akan diproduksi dengan kualitas tertentu akan menyebabkan pemilihan proses pengecoran yang sesuai. Proses pengecoran yang terpilih ini akan mempengaruhi biaya yang diperlukan untuk cetakan, cairan, waktu, dan tenaga kerja. Metode pendekatan yang sudah dikembangkan dapat dikategorikan menjadi lima, yaitu: *intuitive*, *analogical*, *analytical*, *feature based*, dan parametrik [52]. Metode *intuitive* didasarkan pada pengalaman orang yang memperkirakan biaya, khususnya dari produk dan interpretasi yang mirip. Metode *analogical* melibatkan perbandingan dari suatu produk baru dengan produk mirip yang telah ada. Metode *analytical* melibatkan penguraian menjadi bagian-bagian dan tugas-tugas dasar untuk setiap bagiannya, dan persamaan empiris digunakan untuk memperkirakan biaya dari berbagai tugas. Metode *feature based* menggunakan fitur geometris dari produk dan peralatan sebagai dasar perkiraan biaya. Metode parametrik melibatkan perumusan hubungan antara karakteristik produk dan biayanya menggunakan data yang tersedia.

Metode perhitungan biaya ini kemudian dikembangkan dengan beberapa cara, yaitu dapat menggunakan bantuan perangkat lunak dan tanpa bantuan perangkat lunak. Salah satu metode perhitungan biaya per unit tanpa bantuan perangkat lunak dapat difokuskan pada komponen biaya tertentu yang terkait langsung. Metode ini dapat dihitung dengan persamaan (2-6) [46].

$$Biaya = \frac{C_T}{N} + C_c + V \cdot C_m + \frac{C_0 t_{siklus}}{Y} + C_s \quad (2-6)$$

Dimana:

C_T = biaya total peralatan (satuan mata uang)

N = jumlah umur dari benda cor yang dihasilkan

C_c = biaya pembuatan inti (satuan mata uang/unit)

V = volume benda cor total (satuan volume)

C_m = biaya paduan (satuan mata uang/satuan volume)

C_0 = biaya peralatan dan tenaga kerja (satuan mata uang/jam)

t_{siklus} = *lead time* pengecoran total (jam)

Y = *yield* (benda cor yang dapat digunakan/ N)

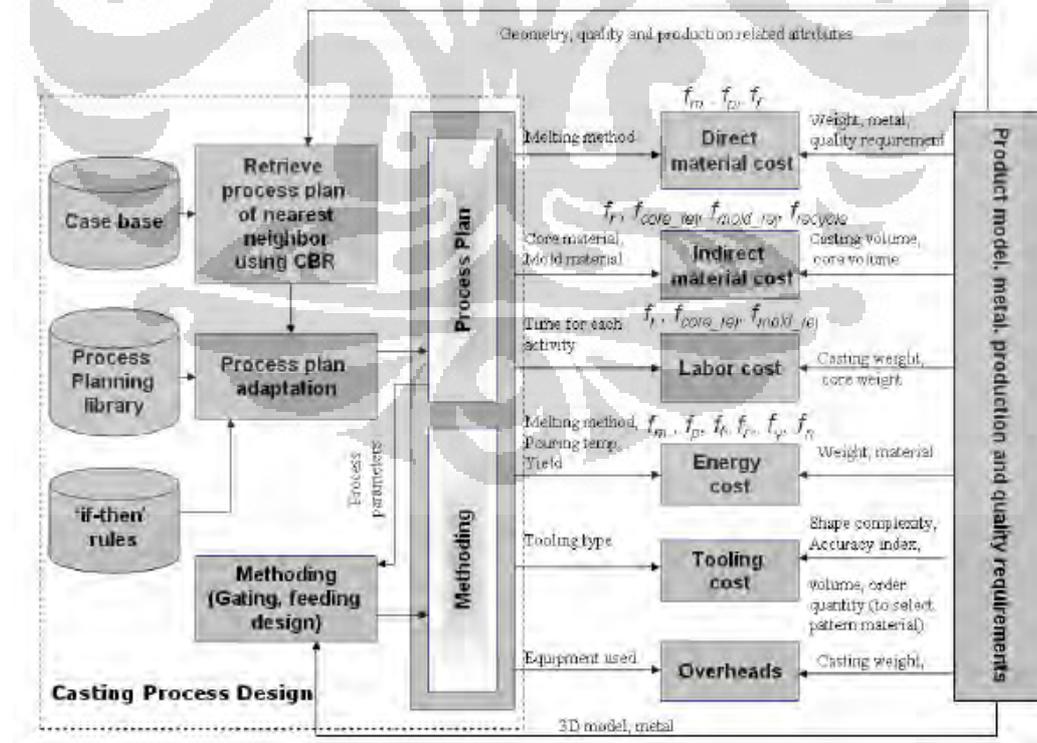
C_s = biaya dari proses sekunder (satuan mata uang/unit)

Biaya total peralatan di atas terkait dengan peralatan termasuk untuk biaya pola dan pembuatan kotak inti (*corebox*), biaya memproduksinya dan inspeksinya, dan biaya modifikasi yang berulang. Volume benda cor ini meliputi *riser* dan *gating system*. Waktu siklus diperhitungkan sebagai penjumlahan semua waktu yang digunakan secara produktif untuk membuat cetakan, penuangan pendinginan, dan menghilangkan *riser* dan *gating system*, maupun waktu yang tidak produktif. Proses sekunder yang diperhitungkan dalam persamaan ini terkait dengan proses pemesinan, perlakuan panas, pengelasan, pengecatan dan pelapisan. Dari persamaan di atas, optimisasi biaya per unitnya dapat dilakukan melalui lima cara, yaitu perbaikan desain untuk meminimalkan biaya peralatan, material, waktu siklus, memaksimalkan *yield*, dan mengurangi jumlah inti dan proses sekunder [52].

Metode lainnya dikembangkan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak biasanya menggunakan data-data yang lebih banyak. Pada dasarnya, perhitungan biaya ini menggunakan komponen yang hampir sama namun menggunakan pendekatan yang berbeda. Model yang dikembangkan dengan perangkat lunak “*Cost Advantages*” menggunakan pengelompokan biaya dikaitkan dengan

sumber daya yang digunakan oleh suatu aktifitas. Pengembangan model ini menggunakan pendekatan pengecoran dengan pasir khususnya untuk produk baja cor. Pengelompok sumber daya ini menggunakan tiga tingkat, yaitu: proses, material, dan fitur. Setiap tingkatan ini memerlukan data yang akan digunakan dalam perhitungan [52].

Metode perhitungan dengan bantuan perangkat lunak juga dikembangkan dengan menjembatani celah dimana biaya terkait dengan peralatan dan parameter proses tidak diperhitungkan dan menerapkan lingkungan desain produk dan proses yang terintegrasi. Perhitungan model matematika yang digunakan didasarkan pada basis data material dan proses yang tergantung faktor-faktor biaya dengan meminimalkan pemasukan data dari pengguna dengan menggunakan metodologi seperti yang digambarkan pada **Gambar 2-17**. Pemasukan data dari pengguna hanya terkait dengan model komponen, material, yang berhubungan dengan kualitas seperti dimensi, dan persyaratan produksi seperti laju produksi, jumlah pesanan [52].



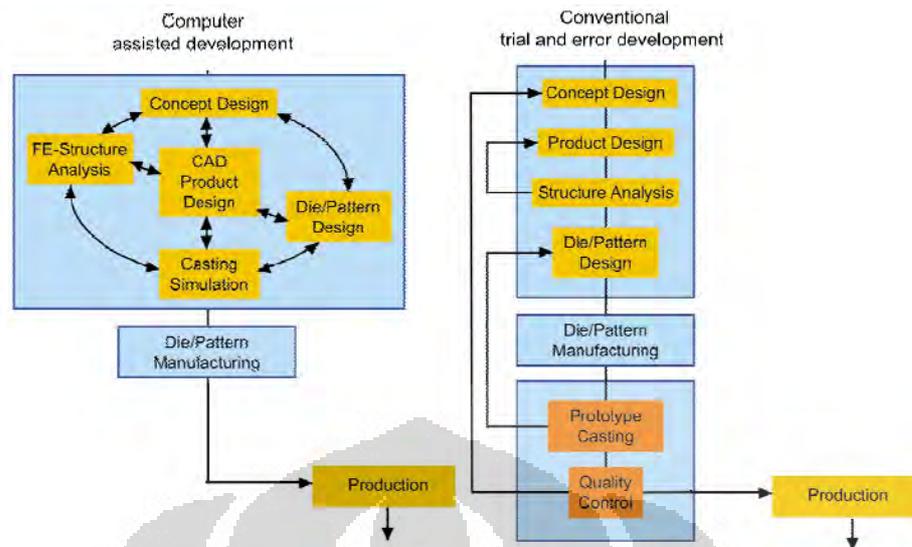
Gambar 2-17. Keseluruhan arsitektur dalam sistem perkiraan biaya [52].

Biaya pengecoran total dihitung sebagai penjumlahan antara biaya terkait dengan material, tenaga kerja, energi, peralatan, dan *overhead*. Biaya material didasarkan pada berat logam yang dicairkan dan berat komponen. Biaya tenaga kerja didasarkan pada data rencana proses terkait dengan proses dan peralatan dan waktu yang digunakan untuk setiap aktifitas. Biaya energi didasarkan pada berat benda cor, *yield*, temperatur tuang, dan peralatan peleburan. Biaya peralatan adalah yang paling sulit diperkirakan dan melibatkan pendekatan parametrik. Biaya *overhead* terkait dengan biaya administratif dan depresiasi ditetapkan berdasarkan pada berat benda cor [52].

2.4 Pemanfaatan Perangkat Lunak dalam Desain Pengecoran

2.4.1. Sistem Perangkat Lunak

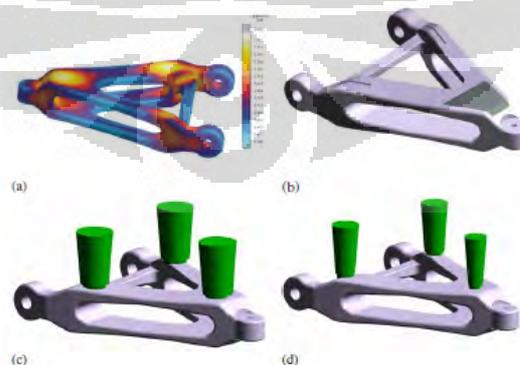
Simulasi casting memiliki peran yang baru dalam daya saing pengecoran telah dikemukakan oleh J. C. Sturm [24]. Dalam tulisannya, dia menyampaikan *state-of-the-art* untuk simulasi proses *casting* dan akan fokus pada kemampuan yang mendukung daya saing dari pengecoran. Perangkat lunak simulasi *casting* baru menjadi peralatan yang diterima untuk *lay-out* proses dan desain oleh industri pengecoran setelah dua puluh tahun. Perangkat lunak ini telah memberikan kemudahan dalam desain dan proses pengecoran. Target sebenarnya dari perangkat simulasi *casting* ini adalah untuk memprediksi mutu dan kinerja dari proses pengecoran. Perbedaan antara pengembangan desain pengecoran secara *trial* dan *error* atau yang disebut konvensional dan desain pengembangan yang dibantu oleh komputer ini diilustrasikan pada **Gambar 2-18**. Dalam perjalanannya, perangkat lunak ini pun juga mengalami perkembangan. Beberapa langkah yang optimasi dari *casting design* tidak dilakukan oleh operator sehingga optimisasi proses pengecoran dapat dilakukan secara otomatis [25].



Gambar 2-18. Perbandingan pengembangan desain pengecoran antara yang konvensional dan yang dibantu dengan komputer [25].

2.4.2. Aplikasi Simulasi Pengecoran

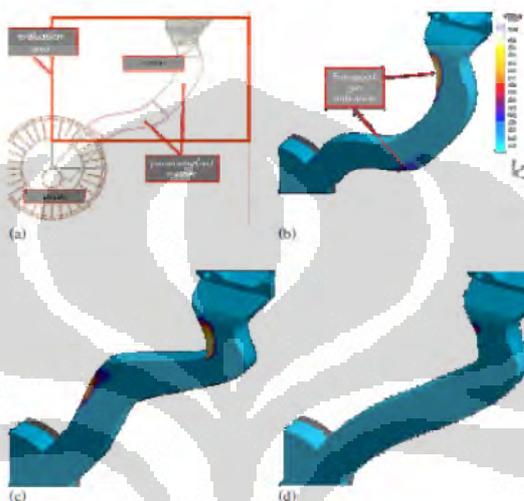
Penuangan dan desain *runner* dapat dioptimisasi dengan bantuan perangkat lunak. **Gambar 2-19** mengilustrasikan bagaimana optimasi penuangan dilakukan untuk komponen suspensi dari aluminium. Optimasi ini dimulai dengan beberapa tahap yaitu: (a) mengevaluasi bagian kritis saat proses pembekuan, (b) menandai model pada area untuk posisi *riser* ditandai dengan warna gelap berdasarkan tahap (a), (c) mendesain *riser* untuk pengecoran awal sebelum optimisasi, dan (d) mengevaluasi dan mengoptimisasi ulang dengan desain yang berbeda oleh perangkat lunak.



Gambar 2-19. Optimisasi pengumpanan komponen suspensi dari aluminium [24].

Gambar 2-20 mengilustrasikan bagaimana optimasi desain *runner* dilakukan oleh perangkat lunak. Optimasi ini dilakukan dalam beberapa tahap yang dimulai dari

(a) menggunakan geometri yang diparameterisasi untuk memudahkan modifikasi di antara area evaluasi yang ditetapkan, (b) mensimulasikan aliran untuk setiap desain memberikan kriteria mutu untuk kondisi pengisian cairan tanpa ada gas terperangkap, (c) dan (d) menunjukkan bagaimana perangkat lunak mengevaluasi berbagai desain dan kemudian mengusulkan desain terbaik tanpa ada gas terperangkap.

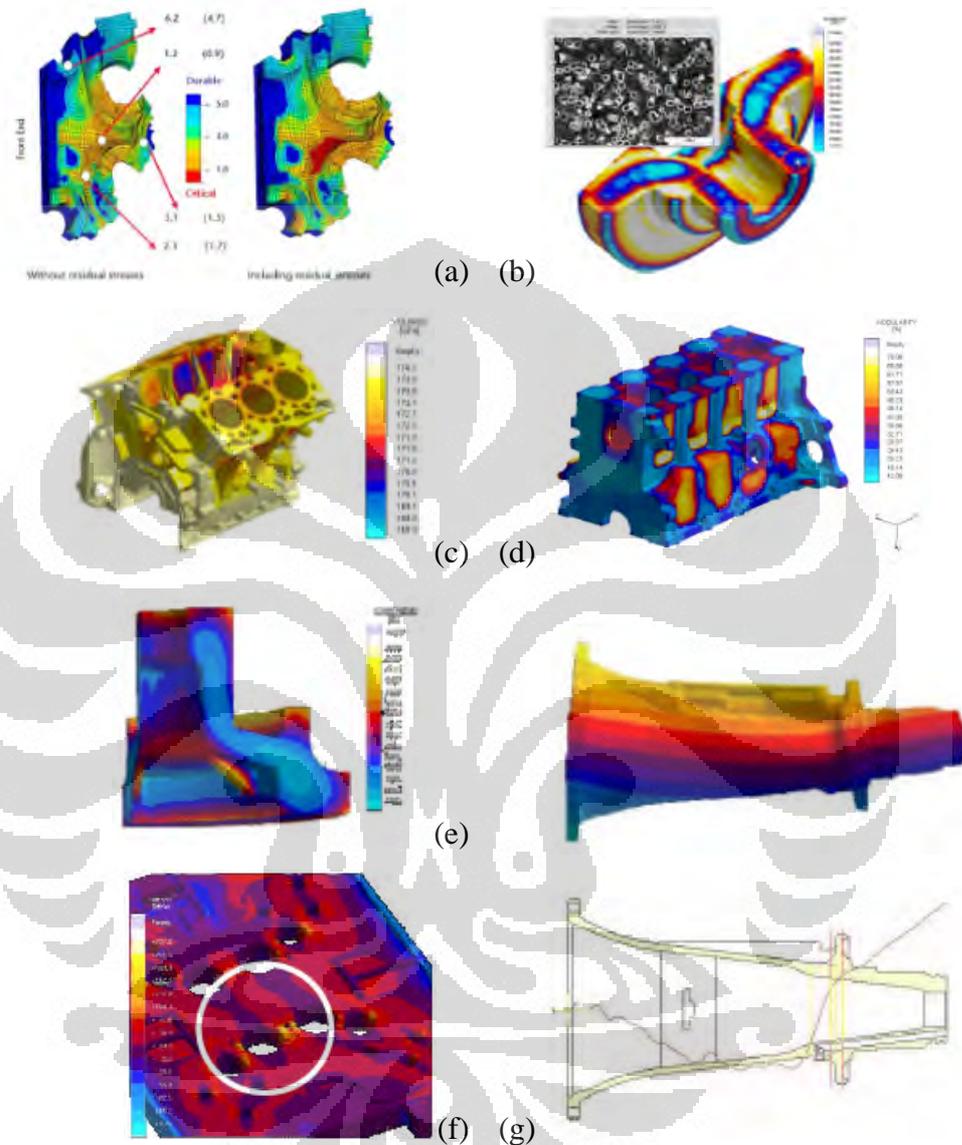


Gambar 2-20. Optimisasi secara otomatis desain runner untuk die casting [24].

Integrasi antara proses pengecoran dan desain komponen sudah dapat dilakukan saat ini. Hal ini diperoleh dari interaksi yang kuat melalui kombinasi penggunaan proses simulasi dan analisis tegangan. Kombinasi ini membuat komponen dapat dilakukan simulasi kelelahan, sebagai contoh, baik pada kondisi *high cycle* dan *low cycle fatigue*. Saat ini simulasi *thermal residual* juga sudah bisa dilakukan dalam perangkat lunak ini. Simulasi ini dapat menunjukkan berbagai permasalahan mutu seperti *hot tearing*, kerentanan *crack*, tingkat tegangan sisa, dan penyimpangan-penyimpangan pengecoran.

Selain itu prediksi terhadap struktur mikro yang terbentuk juga dapat disimulasikan, **Gambar 2-21**. Dengan diketahuinya prediksi terhadap struktur mikro ini maka sifat-sifat mekanisnya pun dapat diprediksi juga. Waktu pembekuan lokal yang dapat diprediksi akan memudahkan untuk mengetahui nilai SDAS secara lebih baik. Hasil berbagai simulasi tersebut akan memberikan masukan kepada pendesain untuk memperbaiki desain. Perbaikan desain ini

membuat proses *casting* juga mengalami perubahan. Namun proses optimisasi ini dilakukan dengan lebih cepat dengan biaya yang rendah karena masih diiterasi di dalam komputer [24,27].



Gambar 2-21. a) Integrasi hasil dari simulasi proses pengecoran menjadi simulasi kinerja, b) Prediksi struktur dan sifat mekanis, c) Prediksi sifat lokal untuk besi tuang, d) Nilai nodularitas disimulasikan untuk suatu mesin block, e) Prediksi struktur dan sifat pengecoran lokal untuk paduan aluminium menggunakan micro-modelling, f) Prediksi kerentanan retak bagian pengecoran setelah pemesinan, dan g) Residual stresses dan penyimpangan [24].

Optimisasi *casting yield* telah dilakukan dalam pembuatan *forging ram* dari material baja oleh P. Kotas dan kawan-kawan [28]. Optimisasi ini dilakukan dengan mempertimbangkan optimisasi *riser* yang dilakukan dengan perangkat

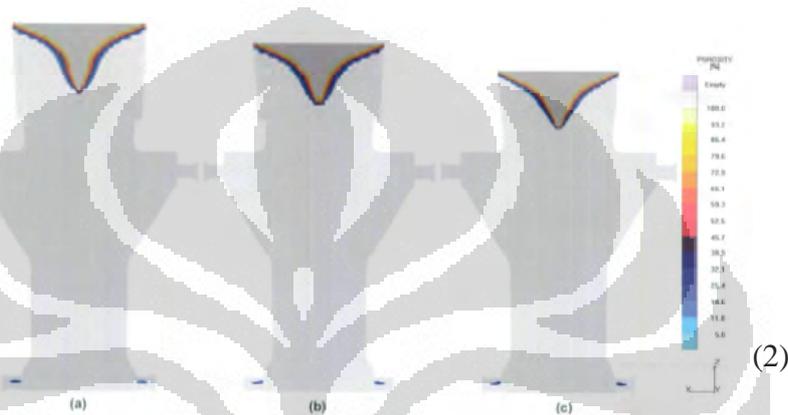
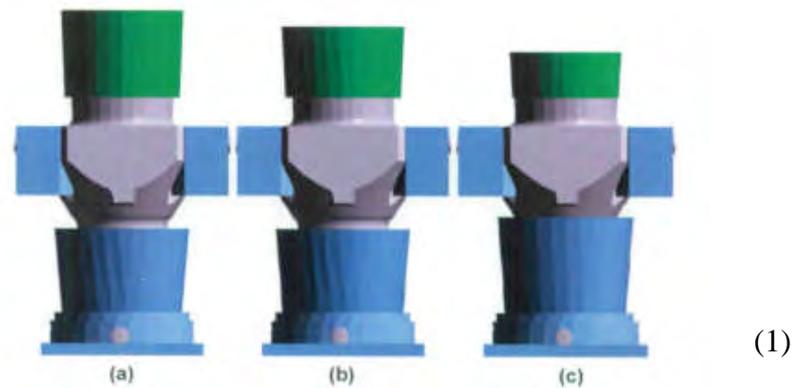
Universitas Indonesia

lunak simulasi *casting*. Analisis penuangan dan pembekuan dilakukan terlebih dahulu pada desain *casting* asli. Berdasarkan hasil tersebut kemudian *gating system* di desain ulang dan *chill* disusun ulang untuk memperbaiki pola pembekuan. Setelah evaluasi terhadap kedua kasus ini dilakukan target dan batasan optimisasi ditetapkan. Suatu kasus optimisasi *multi-objective* dengan tujuan-tujuan yang saling konflik dipertimbangkan dimana meminimalkan volume *top riser* bersamaan dengan meminimalkan porositas penyusutan dan pembatasan porositas *centerline* telah dilakukan. Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah MAGMASOFT® dengan penambahan modul optimisasi MAGMAfrontier.

Tabel 2-4. Perbandingan dari tiga desain yang dioptimisasi [28].

	Original Solution	Optimized Solution 1	Optimized Solution 2	Optimized Solution 3
<i>Total Height</i>	4.337 mm	4.037 mm	3.837 mm	3.537 mm
<i>Total Weight</i>	59.640 kg	48.406.8 kg	45.850 kg	40.968 kg
<i>Height of the bottom cylindrical chills</i>	-	999 mm	999 mm	1149 mm
<i>Thickness of the bottom cylindrical chills</i>	-	160 mm	160 mm	160 mm
<i>Casting Yield</i>	55,36 %	61,76%	72,01 %	80,59 %

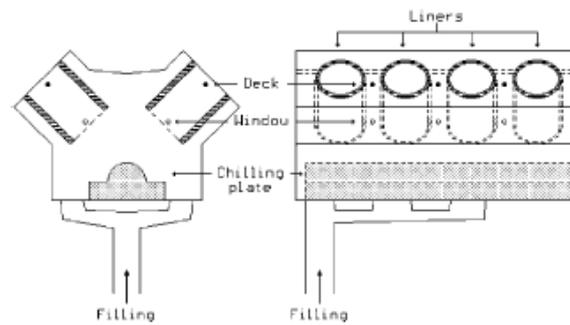
Tabel 2-4 menjelaskan beberapa perbedaan parameter yang dioptimisasi untuk komponen *forging ram* sehingga *casting yield* dapat ditingkatkan dari 55,36% untuk desain asli menjadi 80,59% untuk desain yang dioptimisasi. Sementara model yang dibuat berdasarkan parameter tersebut ditampilkan pada **Gambar 2-22(1)**. Dari model ini terlihat bagaimana tinggi *riser* yang berwarna hijau mengalami penurunan dan ini juga dikompensasi dengan tingginya *chill*, warna biru, yang terletak pada posisi bawah. Penurunan tinggi *riser* yang berarti pengurangan volume *riser* ini dapat dilakukan hingga tinggi tertentu dengan batasan bahwa kualitas produk cor tidak terpengaruh. **Gambar 2-22(2)** menunjukkan bagaimana penyusutan makro yang disimulasikan tidak mempengaruhi kualitas akhir benda cor meski tinggi *riser* sangat minimal pada optimisasi yang ketiga.



Gambar 2-22. (1) Tiga desain berbeda yang diusulkan oleh perangkat optimisasi. Warna hijau adalah *riser* dan warna biru adalah *chill*, dan (2) Terdapatnya penyusutan makro dalam desain yang dioptimisasi [28].

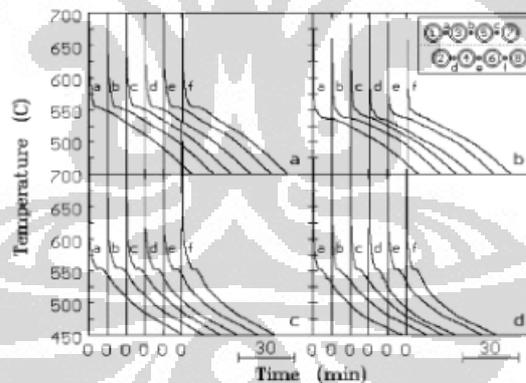
2.5 Studi Proses Pembekuan Aluminium

Analisis pembekuan *engine block* paduan aluminium dengan material B319, telah dilakukan oleh R. Colas dan kawan-kawan [53] pada dua mesin V-8 dengan *liner* dari besi tuang kelabu. Dalam penelitian ini menggunakan 24 buah termokopel tipe-K dan ditempatkan pada beberapa titik saat pengecoran untuk mencatat perubahan temperatur yang terjadi selama pembekuan. Laju pemindaian adalah 1,0 Hz dengan akurasi termokopel $\pm 1,1^{\circ}\text{C}$ dan presisi analog menjadi konversi digital adalah $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$. Penempatan termokopel pada proses pengecoran ini dapat diilustrasikan secara sederhana pada **Gambar 2-23** berikut ini.



Gambar 2-23. Diagram skematis *engine block*. Titik bulat mengindikasikan posisi dimana termokopel ditempatkan, pengumpan, tidak digambarkan, ditempatkan di atas benda cor [53].

Pengecoran *engine block* kemudian dilakukan dengan dua metode yang berbeda yaitu dengan melakukan pemanasan terhadap *liner* selama 35 detik pada temperatur kurang dari 200°C dan tanpa melakukan pemanasan terhadap *liner*. Pembacaan yang terekam oleh termokopel dapat dilihat pada **Gambar 2-24** di bawah ini. Terlihat bahwa reaksi pembekuan yang berbeda dipengaruhi oleh penggunaan pemanas untuk *liner*, dan oleh efek *chilling* yang disebabkan oleh besi tuang kelabu yang ditempatkan di bawah cetakan *engine block*.



Gambar 2-24. Temperatur yang dibaca termokopel di antara liner dimana logam diisikan dari sisi silinder 1 dan 2. a posisi deck dengan melakukan pemanasan awal, b posisi deck tanpa melakukan pemanasan awal, c posisi window dengan melakukan pemanasan awal, dan d posisi window tanpa melakukan pemanasan awal [53].

Berdasarkan pengamatan struktur mikro dapat dilihat bahwa reaksi pembekuan yang terdeteksi adalah pembentukan dendrit Al pre-eutektik primer, dan dua eutektik yang berbeda yang terkait dengan agregat Al-Si dan Al-Si-Mg-Cu kompleks. Pengamatan ini juga menunjukkan bahwa pembekuan dimulai pada

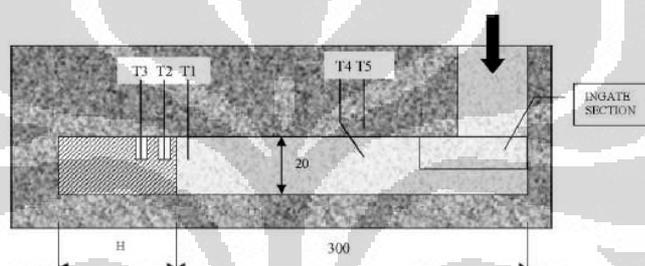
posisi *window* atau *deck* di antara *liner* tergantung pada benda cor dengan atau tanpa pemanasan *liner*. Pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa *dendrite arm spacing* sekunder adalah lebih besar pada *engine block* dengan *liner* yang dipanasi terlebih dahulu. Kondisi ini menunjukkan bahwa daerah tersebut mengalami waktu pembekuan yang lebih lama.

Suatu percobaan untuk memahami *heat transfer coefficient* (HTC) antara *chill* dan benda cor dalam cetakan pasir selama pengecoran aluminium paduan A356 telah dilakukan oleh A. Menegheni dan L. Tomesani [54]. Dengan percobaan ini diharapkan dapat diketahui seberapa cepat proses pembekuan dapat diprediksi dalam suatu proses pengecoran, khususnya melalui proses simulasi. Hingga saat ini belum ada data yang konsisten yang dapat disediakan terhadap HTC ini. Dalam percobaan ini hanya satu macam material yang digunakan sebagai material cornya sementara material *chill* menggunakan tiga macam yaitu besi tuang kelabu, tembaga, dan aluminium. Selain perbedaan material untuk *chill* yang digunakan perbedaan dimensi, H, juga dibedakan menjadi 30, 60, dan 90 mm. Secara lengkap sifat-sifat material tersebut dirangkum dalam **Tabel 2-5** berikut.

Tabel 2-5. Sifat-sifat Material Cor, Chill, dan Pasir Cetak [54].

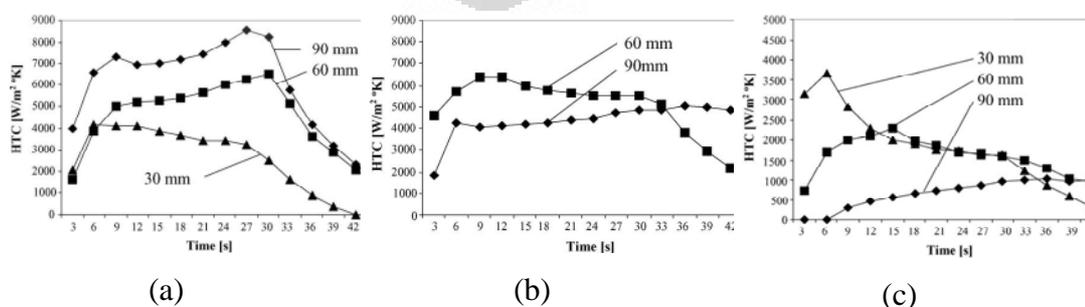
A356 alloy: 7.3% Si, 0.3% Mg, 0.013% Cu, 0.14% Fe, 0.114% Ti		
Thermal conductivity (W/m ^{°C})	<i>k</i>	155
Density (kg/m ³)	ρ	2680
Specific heat (J/kg ^{°C})	<i>c</i>	960
Latent heat of fusion (J/kg)	<i>L</i>	389000
Liquidus temperature (°C)	<i>T</i> _{liq}	610
Solidus temperature (°C)	<i>T</i> _{sol}	560
Cast iron chills		
Thermal conductivity (W/m ^{°C})	<i>k</i>	42
Density (kg/m ³)	ρ	7842
Specific heat (J/kg ^{°C})	<i>c</i>	460
Copper chills		
Thermal conductivity (W/m ^{°C})	<i>k</i>	385
Density (kg/m ³)	ρ	8954
Specific heat (J/kg ^{°C})	<i>c</i>	384
Aluminum chills		
Thermal conductivity (W/m ^{°C})	<i>k</i>	190
Density (kg/m ³)	ρ	2680
Specific heat (J/kg ^{°C})	<i>c</i>	960
Silica sand		
Thermal conductivity (W/m ^{°C})	<i>k</i>	2.09
Real density (kg/m ³)	ρ	2400
Specific heat (J/kg ^{°C})	<i>c</i>	1075

Desain pengujian termasuk pemasangan termokopel dapat ditunjukkan pada **Gambar 2-25**. Dari 5 termokopel tipe-K, 2 buah yang berukuran diameter 1 mm (T2, T3) diletakkan 6 dan 12 mm dari permukaan *chill* yang kontak dengan logam cair. Dua lainnya berdiameter 0,5 mm (T1, T4) dan yang terakhir, T5, diletakkan 6 mm dari permukaan cetakan pasir yang terkena logam cair dan berdekatan dengan T4. Termokopel T1, T2, dan T3 digunakan untuk mengevaluasi antar muka benda cor – *chill* sementara T4 dan T5 untuk mengevaluasi antar muka benda cor – cetakan pasir. Termokopel ini dikalibrasi terlebih dahulu pada temperatur lebur aluminium paduan dan kemudian dihubungkan dengan *data logger* melalui kabel *coaxial* yang dihubungkan dengan komputer. Data yang dibaca kemudian direkam secara otomatis setiap 0,5 detik.



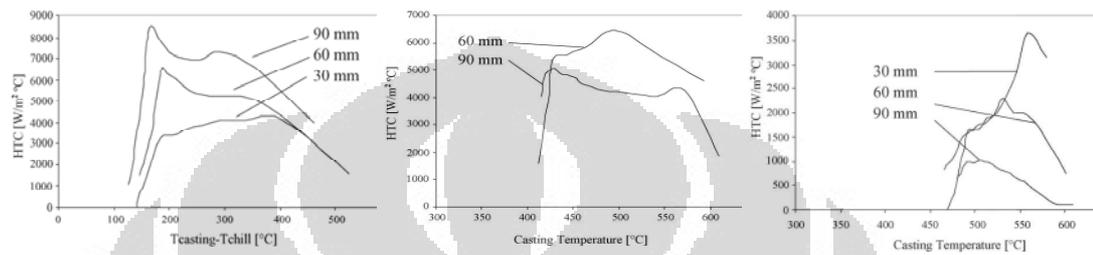
Gambar 2-25. Desain percobaan dan penempatan termokopel [54].

Hasil dari percobaan pada **Gambar 2-26** menunjukkan bahwa *chill* dari tembaga memiliki efek pendinginan yang paling tinggi disusul dengan aluminium dan besi tuang kelabu. Tembaga mampu memberikan kecepatan pembekuan $4 - 8 \text{ kW/m}^2\text{K}$ sementara aluminium $3 - 6 \text{ kW/m}^2\text{K}$ dan besi tuang kelabu 1 hingga $2 \text{ kW/m}^2\text{K}$. Ukuran *chill* yang lebih besar untuk tembaga memberikan nilai HTC yang semakin besar sementara nilai HTC untuk aluminium dan besi tuang kelabu memiliki nilai yang berbanding terbalik.



Gambar 2-26. Pengaruh HTC berbagai *chill* pada kecepatan pendinginan. (a) Tembaga, (b) Aluminium, dan (c) Besi tuang kelabu [54].

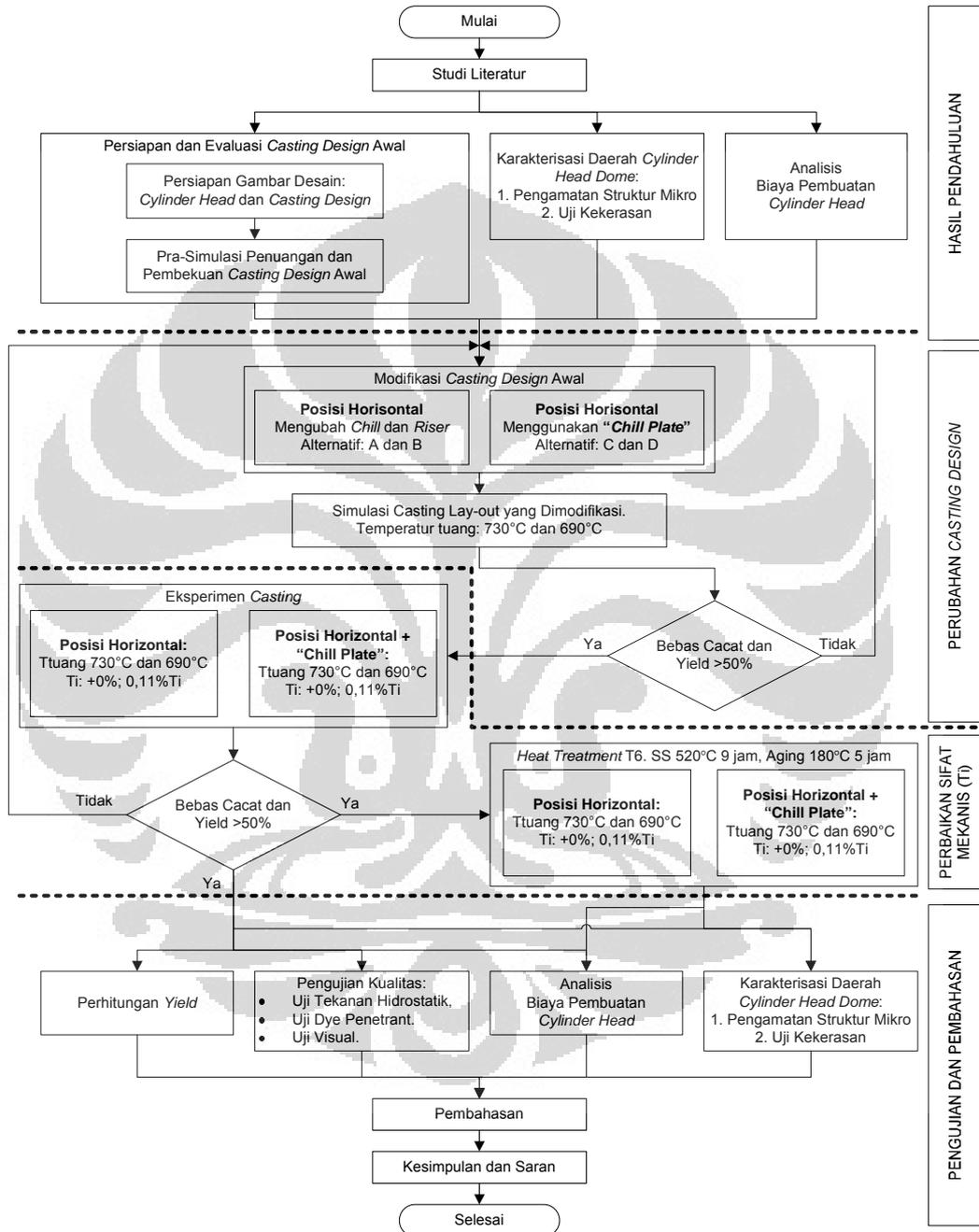
Pada **Gambar 2-27** diperoleh ilustrasi dari pengaruh temperatur benda cor terhadap HTC. Dari sini bisa dilihat bagaimana temperatur efektif *chill* dijumpai pada rentang temperatur tertentu untuk setiap material *chill*. Rentang temperatur ini untuk tembaga adalah 375 – 400°C, aluminium hingga temperatur 400 – 420°C, dan besi tuang kelabu hingga temperatur 490 – 530°C. Di bawah temperatur ini nilai HTC akan turun secara dramatis.



Gambar 2-27. Pengaruh HTC berbagai *chill* pada temperatur efektif benda cor.
(a) Tembaga, (b) Aluminium, dan (c) Besi tuang kelabu [54].

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 3-1**.



Gambar 3-1. Metodologi Penelitian.

Metodologi penelitian ini disusun dengan mengelompokkan setiap kegiatan penelitian tersebut secara garis besar menjadi empat tahap penelitian, yaitu:

1. Hasil Pendahuluan. Tujuan pada tahap ini adalah diperolehnya berbagai data pendahuluan dari *casting design* awal. Data pendahuluan ini diperoleh melalui evaluasi *casting design* awal, karakterisasi daerah *dome* terhadap struktur mikro dan kekerasan, dan analisis biaya. Pada tahap ini juga dilakukan pra-simulasi untuk mendapatkan beberapa nilai parameter untuk digunakan pada tahap berikutnya.
2. Perubahan *casting design*. Tujuan pada tahap ini adalah untuk menghasilkan *casting design* terbaru dengan nilai *yield* yang lebih tinggi dan terhindar dari cacat. Perubahan ini dilakukan dengan melakukan dua macam modifikasi melalui perubahan *riser* dan *chill* dan penggunaan "*chill plate*", mensimulasikannya, dan dievaluasi tingkat keberhasilannya berdasarkan *yield* dan cacat yang muncul.
3. Perbaikan sifat mekanis. Tujuan pada tahap ini adalah untuk memperbaiki sifat mekanis yang dilakukan melalui penambahan Ti pada proses eksperimen. Selain itu, pada tahap ini dapat diuji hasil simulasi dari kedua *casting design* terhadap eksperimen berupa nilai *yield* dan cacatnya.
4. Pengujian dan pembahasan. Tujuan pada tahap ini adalah untuk melakukan pengujian dan pembahasan terhadap hasil yang diperoleh pada Tahap 3. Pada tahap ini akan dilakukan perhitungan *yield*, pengujian kualitas, karakterisasi daerah *dome*, dan analisis biaya pembuatan *cylinder head*.

3.1 Evaluasi *Casting Design* Awal

Tujuan pada tahap ini adalah untuk mengetahui karakteristik dari *casting design* awal yang meliputi: (1) desain rinci, (2) *yield*, (3) cacat yang timbul, dan (4) struktur mikro dan nilai kekerasannya. Pada tahap ini juga dilakukan pra-simulasi yang bertujuan untuk memastikan parameter yang digunakan dan menentukan parameter simulasi yang tidak ada di literatur untuk dipakai pada simulasi berikutnya. Contoh parameter simulasi tersebut adalah *critical solid fraction* dan *volume shrinkage*.

Pemahaman desain awal dilakukan dengan merekonstruksi detail dimensi pola kayu berupa *riser* dan sistem saluran ke perangkat lunak CAD. Dengan

merekonstruksi pola kayu ke dalam CAD maka volume dan luas permukaan setiap komponen tersebut dapat diketahui dengan mudah. Selain itu, hasil rekonstruksi ini akan digunakan sebagai media dalam pra-simulasi untuk menentukan parameter yang sesuai.

Perhitungan nilai *yield* dari desain awal berdasarkan dari data produksi tahun sebelumnya semenjak *casting design* awal ini digunakan. Pengamatan cacat yang timbul pada produk dilakukan secara visual pada permukaan luar dan dalam selain dari data uji hidrostatis dan *dye penetrant*. Pengamatan visual pada permukaan dalam dilakukan dengan memotong *cylinder head* menjadi empat bagian. Sementara data uji hidrostatis dan *dye penetrant* dapat diperoleh dari hasil pengujian sebelumnya.

Pengamatan struktur mikro dan kekerasan pada daerah *dome* dan dasarnya dilakukan pada sampel kondisi pengecoran dan kondisi T6. Pengamatan dan pengujian untuk sampel kondisi pengecoran masih tersedia sementara kondisi T6 tidak memungkinkan dilakukan pengamatan karena sampel tidak tersedia. Penggunaan data-data yang diperoleh dari hasil riset *heat treatment* tahun 2006 ditetapkan sebagai data pendahuluan.

Penentuan parameter-parameter yang akan dipakai pada simulasi berikutnya dilakukan pada tahap pra-simulasi dengan menggunakan *casting design* awal. Berbagai parameter yang dimasukkan dalam pra-simulasi adalah jenis dan temperatur logam yang akan dicor dan cetakan, temperatur lingkungan, *critical solid fraction*, dan *volume shrinkage*. Parameter material yang akan dicor menggunakan dua macam yaitu ADC12 (Al9Si3Cu) dan AC4CH (356) sebagai pembanding. Material cetakan termasuk inti juga menggunakan dua macam yaitu *silica Sand* dan *Furan*. Temperatur lingkungan diasumsikan tetap pada 30°C sama dengan temperatur cetakan. Temperatur tuang dipilih pada 720°C yang masih pada kisaran temperatur 730°C dan 690°C sehingga diasumsikan bisa mewakili kedua temperatur tersebut. Nilai *critical solid fraction* yang dimasukkan ke dalam simulasi dimulai dari 50% hingga 100% dan nilai *volume shrinkage* dimulai dari 1

hingga 8,5% sesuai dengan *shrinkage* pada aluminium. Kedua nilai ini ditentukan oleh masing-masing jenis materialnya dan belum tentu sama antara material satu dan lainnya.

Penentuan nilai parameter yang akan digunakan pada simulasi berikutnya dilihat dengan membandingkan cacat yang terbentuk dengan benda cornya. Semakin sesuai atau lebih kecil cacat yang muncul pada hasil pra-simulasi dibandingkan dengan benda cor maka nilai parameter tersebut dapat dipilih.

Perhitungan analisis biaya produksi yang terkait dengan desain awal digabungkan pada **Bagian 3.8** yang terkait dengan analisis biaya produksi setelah modifikasi. Penggabungan dengan bagian tersebut untuk memudahkan dalam analisisnya.

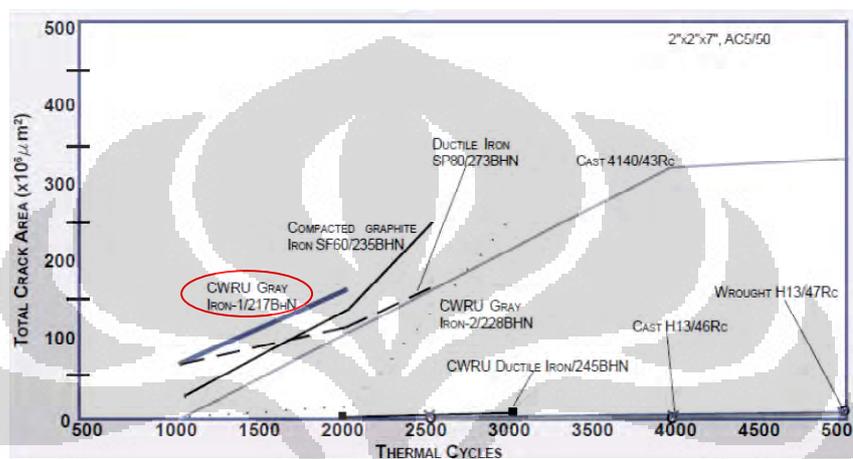
3.2 Modifikasi dan Simulasi *Casting Design*

Tujuan pada tahap ini adalah untuk menghasilkan *casting design* baru dengan nilai *yield* yang lebih besar dan produk yang bebas cacat. Pemahaman terhadap tahap sebelumnya maka modifikasi akan dapat lebih mudah pada tahap ini. Modifikasi *casting design* dilakukan dengan dua cara yaitu:

- (1) Perubahan posisi dan ukuran *chill* dan *riser* pada *casting design* ini diharapkan dapat meningkatkan *yield* hingga lebih dari 50% namun diperkirakan tidak memberikan perbaikan sifat mekanis yang signifikan, dan
- (2) Penggunaan “*chill plate*” pada *casting design* ini diharapkan tidak hanya menaikkan *yield* hingga lebih dari 50% sekaligus sebagai langkah perbaikan produk cor sebelumnya dimana berupa:
 - a. Penyamaan volume *dome* dari *cylinder head* yang selama ini berbeda-beda pada produk cor yang sama.
 - b. Perbaikan sifat mekanis melalui penurunan nilai SDAS dan porositas sehingga dapat meningkatkan ketahanan terhadap *thermomechanical fatigue* (TMF).

Pemilihan material “*chill plate*” didasarkan pada material yang umum digunakan pada cetakan permanen yaitu baja perkakas H13 dan besi tuang. Kerumitan

bentuk *dome* dari *cylinder head* dan kemampuan dalam pengerjaan pemesinannya maka penggunaan besi tuang adalah yang paling memungkinkan untuk dipilih dalam penelitian ini. Besi tuang yang digunakan adalah FC25 yang dibuat dengan cara dicor secara gravitasi pada cetakan pasir. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan seperti yang digambarkan pada **Gambar 3-2**, umur yang bisa dicapai oleh material FC adalah mencapai 1000 kali pemakaian hingga muncul retakan [35,55].



Gambar 3-2. Kinerja kelelahan termal dari berbagai material untuk cetakan permanent [55].

Pelaksanaan modifikasi *casting design* dimulai dalam beberapa tahap, yaitu:

- Menjalankan simulasi pembekuan *cylinder head* tanpa ada sistem saluran *riser*, dan *chill* untuk kedua metode modifikasi *casting design*. Dari hasil simulasi ini maka penempatan *riser* dan *chill* dapat ditentukan dengan lebih mudah.
- Menetapkan dimensi dan volume *riser* dan leher *riser* dengan memperhatikan hasil evaluasi dan menghitung ulang modulus *casting* dari *riser* dan benda cor. Dalam penelitian ini menggunakan dua metode yang diawali dengan *modulus method* kemudian diperbaiki secara simultan melalui simulasi sebagai bentuk dari *computerized method*. *Modulus method* dimulai dengan menghitung modulus *cylinder head* dengan membandingkan volume benda cor terhadap luas permukaan benda cor, sementara *computerized method* dilakukan dengan menjalankan simulasi pembekuan dengan parameter yang diperoleh pada tahap sebelumnya. Hasil simulasi ini digunakan untuk mengevaluasi dimensi

riser yang telah dipilih tersebut sesuai dan perubahan dimensi *riser* terus dilakukan hingga diperoleh *riser* yang sesuai.

- c. Menetapkan posisi dan ukuran *chill* pada daerah-daerah yang rawan terhadap timbulnya *hotspot* dan cacat. Hasil Tahap a digunakan untuk mendesain ulang susunan dan dimensi *chill*. Keefektifan dari desain *chill* yang baru dievaluasi kembali dengan menggunakan simulasi *casting* hingga diperoleh hasil yang optimal. Tahap b dan c dilakukan secara bersama-sama dengan menggunakan simulasi pembekuan.
- d. Menentukan dimensi dan sistem saluran yang akan digunakan dengan terlebih dahulu menentukan waktu dan laju penuangan, dimensi bawah *sprue*, dimensi *runner* dan *ingate* dengan memperhatikan kecepatan kritis dari cairan yang tidak melebihi 0,5 cm/detik.
- e. Menghitung nilai *yield* dilakukan setelah Tahap d diselesaikan. Jika *yield* masih belum optimal maka *casting design* ini kemudian dioptimisasi kembali hingga dicapai *yield* yang optimal. Namun jika persentase berat produk cor telah mencapai *yield* yang optimal maka Tahap e dapat dilakukan.
- f. Melakukan simulasi penuangan dari *casting design* yang telah ditetapkan. Simulasi pembekuan yang telah dilakukan terlebih dahulu adalah untuk mengetahui area *hotspot* dan cacat secara cepat dan hasil ini dievaluasi dengan menjalankan simulasi penuangan. Jika cacat sudah tidak ditemukan maka *casting design* diambil data-data mengenai penuangan dan pembekuan.
- g. Mengambil data-data selama simulasi penuangan dan pembekuan. Data-data penuangan meliputi: aliran penuangan dan proses pembekuan, perubahan dan distribusi temperatur, pembentukan fraksi padatan, kecepatan aliran, dan tingkat pengisian rongga cetakan selama penuangan. Data-data pembekuan meliputi perubahan dan distribusi temperatur, *hotspots*, dan Niyama selama pembekuan.

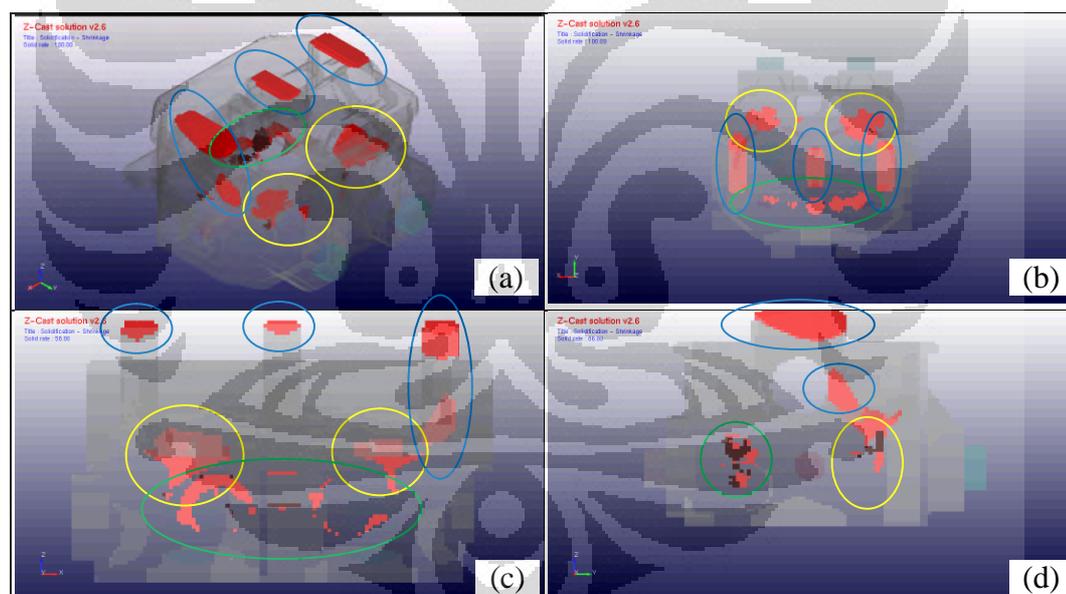
3.2.1. Modifikasi melalui Perubahan Posisi dan Ukuran dari *Chill* dan *Riser*

Perubahan *casting design* yang dilakukan pada tahap ini akan menghasilkan dua macam desain dengan nama *Casting Design A* dan *Casting Design B*. Pada *Casting Design A*, modifikasi dilakukan dengan mengurangi volume *riser* atas

dan samping serta mengurangi *chill* yang telah ditetapkan pada desain awal. Pada *Casting Design B*, modifikasi dilakukan dengan membatasi penggunaan *riser* yang hanya menempatkan *riser* atas. Susunan dan dimensi *chill* diubah total dengan mempertimbangkan pembentukan cacat. Metode yang dilakukan untuk menghasilkan kedua *casting design* tersebut serupa secara garis besar dengan perbedaan pada tahap penentuan *riser* samping dan sistem saluran.

a. Simulasi pembekuan *cylinder head*

Pelaksanaan simulasi pembekuan dilakukan untuk kedua *Casting Design A* dan *Casting Design B* dan kondisinya adalah sama untuk keduanya. Hasil simulasi pembekuan *cylinder head* tanpa penambahan *riser*, *chill*, dan *gating system* dilakukan untuk melihat kemungkinan lokasi cacat yang muncul. Cacat yang terbentuk dari simulasi proses pembekuan *cylinder head* pada temperatur 720°C ditunjukkan pada **Gambar 3-3**.



Gambar 3-3. Cacat dari hasil simulasi pembekuan *cylinder head* tanpa *riser*, *chill*, dan *gating system*, (a) tampak isometris, (b) tampak atas, (c) tampak depan, dan (d) tampak kanan.

Hasil simulasi menunjukkan tiga daerah yang menjadi tempat munculnya cacat. Daerah tersebut adalah:

- (1) Lubang katup *intake* (lingkaran kuning). Lubang katup ini adalah salah satu bagian yang tebal dan diikuti oleh bagian yang tebal di bawahnya pada sisi

luar. Bagian yang tebal ini merupakan bagian yang digunakan untuk tempat baut dan lubang *water jacket* yang terhubung dengan lubang *intake* namun sudah tidak digunakan lagi tetapi belum dihilangkan dari desain. Dengan demikian, kondisi ini sangat memungkinkan cacat terbentuk.

- (2) Lubang exhaust di bagian dalam *water jacket* (lingkaran hijau). Pada daerah ini terjadi pertemuan antara lubang katup exhaust, lubang exhaust, dan lubang busi dengan ketebalan yang berbeda-beda. Berbeda dengan lubang katup *intake* yang mengalami penyusutan di sebelah atas yang tidak dijumpai pada lubang katup exhaust di sebelah atas karena bagian ini lebih dahulu membeku akibat berhimpitan dengan bagian yang tipis. Bagian bawahnya pun membeku lebih cepat sementara bagian di antaranya ini membeku lebih lambat sehingga memungkinkan cacat itu terjadi.
- (3) Pemegang *camshaft* berbentuk seperti tiang dengan jumlah 3 unit (lingkaran biru). Penyusutan yang terjadi pada bagian ini di sebelah atas disebabkan oleh penyusutan cairan akibat proses pembekuan. Cairan tersebut turun mengisi rongga cetakan yang ada di bawahnya sehingga bagian yang tertinggi seperti bagian pemegang *camshaft* ini akan mengalami kekurangan cairan. Untuk itu, pada bagian yang memiliki posisi seperti ini mengharuskan penggunaan *riser* dalam pengecoran gravitasi.

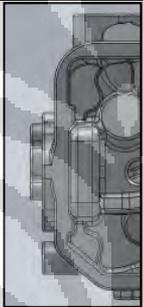
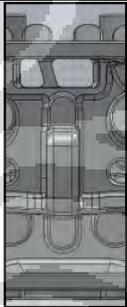
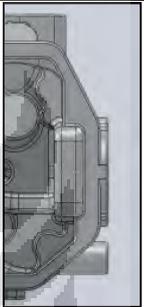
b. Riser terbuka (atas)

Berdasarkan tahap di atas maka dapat diketahui lokasi penempatan *riser*. *Riser* akan ditempatkan pada tiga puncak tertinggi dari *cylinder head* dimana pada posisi ini penyusutan terjadi akibat dari cairan yang turun untuk mengisi rongga cetakan di bawahnya. *Casting Design A* dan *Casting Design B* memerlukan tahap ini dan desain awalnya adalah sama untuk keduanya. Perbedaan tujuan dari kedua desain ini menyebabkan hasil akhir yang diperoleh akan berbeda.

Pendekatan dengan menggunakan metode modulus digunakan untuk menentukan volume *riser* awal. Dalam menentukan modulus, *cylinder head* ini dibagi menjadi tiga bagian untuk menghitung penyusutan yang akan terjadi pada setiap *riser*-nya akibat turunnya cairan mengisi rongga cetakan di bawahnya [56]. Dari setiap

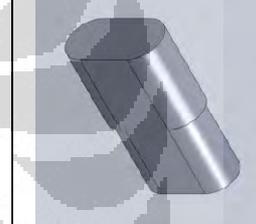
bagian ini pada **Tabel 3-1** kemudian dihitung modulus dari *cylinder head* dengan bantuan perangkat lunak untuk desain (CAD), Solidworks®. Perhitungan modulus ini menunjukkan bahwa bagian kanan dan kiri *intake* memiliki nilai modulus yang lebih besar sementara bagian tengah memiliki modulus yang lebih kecil. Sehingga bagian tengah akan membeku lebih cepat dari pada bagian kanan dan kiri *intake*. Selain itu volume *riser* pada posisi ini bisa lebih kecil dari pada posisi lainnya. Modulus pada sisi kanan dan kiri dengan nilai yang tidak terlalu besar perbedaannya memungkinkan bagian ini untuk membeku pada waktu yang hampir bersamaan.

Tabel 3-1. Menghitung modulus *cylinder head* pada tiga posisi.

Potongan <i>cylinder head</i>			
Posisi	Kanan <i>Intake</i>	Tengah	Kiri <i>Intake</i>
Dimensi Lokasi <i>Riser</i> (p x l), mm	43,01 x 10,00	35,67 x 12,00	43,01 x 10,00
Volume, mm ³	638.277,67	748.469,51	599.312,04
Luas Area, mm ²	119.892,21	162.260,74	111.848,77
Modulus CH	5,32	4,61	5,36
Modulus <i>Riser</i> (1,2 x Modulus CH)	6,39	5,54	6,43
Modulus Leher <i>Riser</i> (1,1 x Modulus CH)	5,86	5,07	5,89

Dengan diperolehnya nilai modulus *cylinder head* maka nilai modulus *riser* ditetapkan sebagai $M_R = 1,2 \times M_C$, dan modulus leher *riser* ditetapkan sebagai $M_L = 1,1 \times M_C$. Dari perhitungan tersebut diperoleh nilai kedua modulus pada **Tabel 3-1**. Dalam penelitian ini berdasarkan pertimbangan luas penempatan *riser* maka ditetapkan desain pada **Tabel 3-2** sebagai awal penentuan volume *riser*. Dengan menggambarannya pada perangkat lunak desain maka akan dapat dianalisis kesesuaian nilai modulus, M_R , hasil gambar ini sesuai dengan nilai yang telah ditetapkan di awal dan kesesuaian dimensinya untuk pembuatan *cylinder head*.

Tabel 3-2. Penentuan awal dimensi *riser* dan leher *riser* (dalam mm).

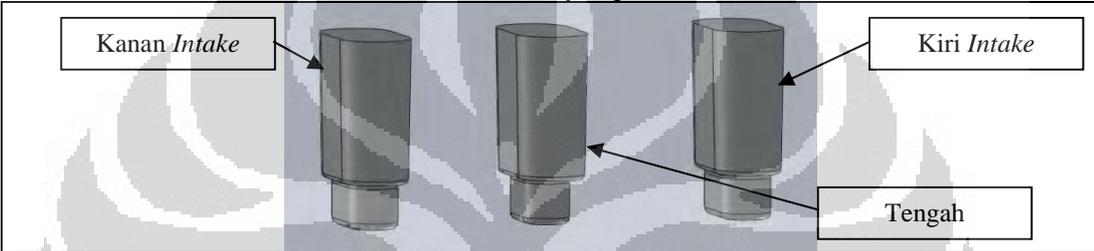
	Kanan Intake	Tengah	Kiri Intake
<i>Riser</i>			
A	23,93	20,73	24,08
B	47,85	41,46	48,16
H	41,87	36,28	42,14
<i>Leher Riser</i>			
A	21,93	19,00	22,08
B	43,87	38,01	44,15
H	38,38	33,26	38,63
ΣH	80,25	69,54	80,77
Gambar dari perangkat lunak desain			
Volume, mm ³	81.918,41	49.300,22	77.266,51
Luas Area, mm ²	12.213,56	8.610,12	11.624,33
Modulus <i>Riser</i>	6,71	5,73	6,65

Berdasarkan **Tabel 3-2**, nilai modulus dari gambar desain sudah memenuhi nilai modulus yang telah ditetapkan. Kesesuaian dimensi yang perlu dipertimbangkan adalah terhadap faktor lain seperti *cylinder head* dan cetakan yang akan dibuat. Pertimbangan terhadap *cylinder head* terkait dengan kesesuaian dimensi leher *riser* dan lokasi *riser* tersebut akan diletakkan, dan kemudahan pembuatan cetakan nantinya. Dimensi lokasi *riser* yang lebih kecil pada **Tabel 3-1** membuat leher *riser* terlalu lebar untuk dipasangkan pada permukaan atas *cylinder head*.

Penyesuaian perlu dilakukan dengan mengecilkan ukurannya dan membuat *fillet* atau *chamfer* pada bagian leher *riser* yang berhubungan dengan *cylinder head*. Kesesuaian dimensi untuk cetakan yang akan dibuat akan memberikan kemudahan dalam pembuatan cetakan yang dimulai dari pembuatan pola kayu

untuk cetakan. Tinggi total *riser* (ΣH) yang bervariasi dapat menyulitkan pembuatan cetakan. Kesulitan ini akan muncul ketika proses pemasangan pola kayu dan pemadatan pasir cetak ketika menghasilkan *riser* yang terbuka. Dengan bantuan perangkat lunak desain, modifikasi dilakukan sehingga diperoleh *riser* pada **Tabel 3-3**. Desain kanan dan kiri *intake* dibuat sama sedangkan untuk yang tengah dibuat lebih kecil volumenya. Tinggi ketiga *riser* ini dibuat sama menjadi 83 mm. Perubahan desain ini menghasilkan nilai modulus yang lebih besar akibat dari penyesuaian ini. Desain ini kemudian disimulasikan pada perangkat lunak *Z-cast* untuk dievaluasi.

Tabel 3-3. Dimensi *riser* yang telah disesuaikan.



	Kanan Intake	Tengah	Kiri Intake
Volume, mm ³	115.554,02	111.768,47	115.554,02
Luas Area, mm ²	14.571,35	14.314,58	14.571,35
Modulus Riser	7,93	7,81	7,93

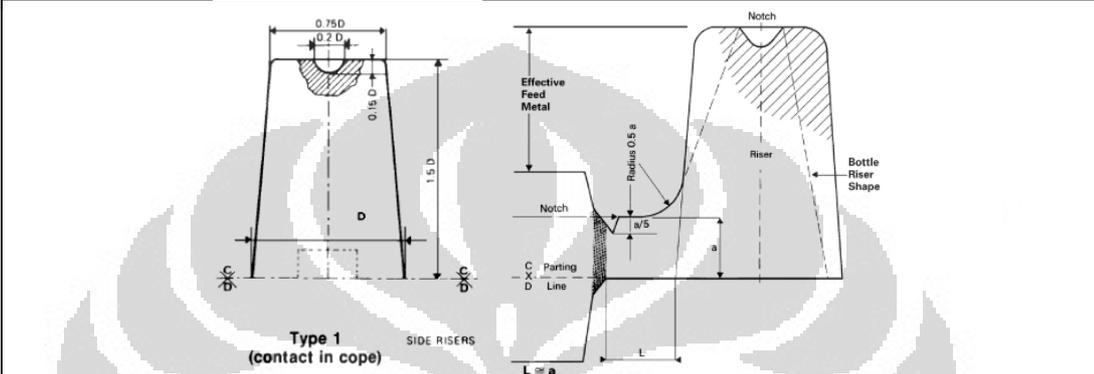
Hasil simulasi secara bertahap dievaluasi dengan mengamati perubahan lokasi dan besar dari cacat melalui simulasi pembekuan. Peningkatan nilai modulus dengan menjaga dimensi *riser* sekecil mungkin dari desain awal berpotensi menghasilkan cacat yang lebih rendah. Nilai modulus yang lebih besar dapat menjaga pembekuan terarah akibat dari *riser* yang tetap mempertahankan kondisi cairnya. Dimensi dari leher *riser* juga berperan dalam menjaga fungsi dari *riser* sehingga perlu dijaga leher *riser* ini tidak membeku terlebih dahulu [57].

c. Riser tertutup (samping)

Casting Design A memerlukan tahap ini sesuai dengan tujuan desain awalnya dan *Casting Design B* tidak memerlukan tahap ini. Penentuan awal *riser* samping dengan menggunakan perhitungan pada **Tabel 3-4**. Dengan menggambarkannya pada perangkat lunak desain maka akan dapat dianalisis kesesuaian nilai modulus, M_R , hasil gambar ini sesuai dengan nilai yang telah ditetapkan di awal dan

keseuaian dimensinya. Berdasarkan **Tabel 3-4** terlihat modulus dari hasil gambar menunjukkan nilai yang lebih rendah dari yang ditetapkan sebelumnya. Dimensi *riser* ini kemudian perlu disesuaikan sehingga memenuhi nilai modulus minimal 6,39. Posisi *riser* samping yang ditempatkan pada kedua lubang *intake* perlu dipertimbangkan bentuknya karena berdekatan dengan penempatan inti lubang *intake*.

Tabel 3-4. Perhitungan awal *riser* samping (dalam mm) [56].



D	$5,68M_R$	0,75D	27	L ~ a	13,2
M_R	6,39	0,2D	7	A	12
D	36	0,15D	5	a/5	2
1,5D	54			R=0,5a	5
		Volume, mm ³		41.326,02	
		Luas Area, mm ²		7.476,10	
		Modulus <i>Riser</i>		5,53	
		Massa, kg		0,1145	

d. Menetapkan posisi dan ukuran *chill*

Casting Design A dan *Casting Design B* memerlukan tahap ini dan desain awalnya adalah sama untuk keduanya. Perbedaan tujuan dari kedua desain ini menyebabkan hasil akhir yang diperoleh akan berbeda. Penentuan *chill* pada kedua desain dilakukan dengan menggunakan dua pendekatan yang berbeda dan dilakukan dengan bantuan simulasi “Z-cast”. Pada *Casting Design A* pendekatan yang dilakukan dimulai dengan menggunakan susunan *chill* yang telah digunakan pada *casting design* awal dan kemudian secara bertahap dihilangkan hingga titik *hotspots* tersebut tidak bertambah. Pada *Casting Design B* pendekatan yang

dilakukan dimulai dengan menggunakan *chill* sebatas pada daerah yang menampilkan titik *hotspots* yang kemudian secara bertahap *chill-chill* tersebut ditambahkan hingga titik *hotspots* tersebut menghilang.

Penggunaan simulasi dalam menentukan susunan *chill* menunjukkan bahwa penggunaan *chill* memberikan dua macam efek yang tidak mudah dipahami [49]. Efek pertama menunjukkan bahwa *chill* dapat menghilangkan titik-titik *hotspot* pada daerah tertentu dan efek kedua titik-titik *hotspot* tersebut bergeser ke daerah yang lain. Bergesernya titik-titik *hotspot* dimungkinkan oleh keterbatasan *chill* dalam menyerap panas baik karena volumenya yang kurang atau telah mencapai titik jenuhnya. Jika telah mencapai titik jenuhnya, *chill* yang telah menyerap panas setelah beberapa waktu akan menjadi berkurang kemampuannya. Titik-titik *hotspot* yang muncul diperkirakan berada pada daerah yang sudah tidak dipengaruhi oleh *chill*. Dengan demikian, pemasangan *chill* harus dilakukan secara menyeluruh untuk meminimalkan *hotspot*.

e. Menentukan dimensi dan sistem saluran

Casting Design A dan *Casting Design B* memerlukan tahap ini dan desain awalnya adalah sama untuk keduanya. Pertama yang perlu dihitung adalah massa (W) yang digunakan adalah massa total *cylinder head* dan *riser* yang digunakan untuk menghitung laju penuangan dengan rincian kedua desain tersebut pada **Tabel 3-5**.

Tabel 3-5. Penjumlahan massa (W) *cylinder head* dan *riser*.

Berat	<i>Casting Design A</i>		<i>Casting Design B</i>	
	kg	lb	kg	Lb
Cylinder Head	5,501	12,13	5,501	12,13
Riser Atas	1,385	3,05	1,049	2,31
Riser Samping	0,561	1,24	-	-
Massa (W)	7,447	16,42	6,550	14,44

1. *Casting Design A*

Penentuan sistem saluran dimulai dengan menghitung laju penuangan berdasarkan persamaan (3-1) karena ketebalan benda cor kurang dari 0,25 inci. Laju penuangan (lb/detik):

$$Laju_{tuang} = 1,48 \times \sqrt{W} \quad (3-1)$$

$$Laju_{tuang} = 1,48 \times \sqrt{16,42} = 6,00$$

Penentuan dimensi bawah *sprue* untuk berbentuk bulat tirus dihitung dengan menggunakan persamaan (3-2) dan diameternya dihitung dengan persamaan (3-3).

$$A = \frac{W}{d.t.c.\sqrt{2gH}} \quad (3-2)$$

$$A = \frac{16,42}{(0,0867) \cdot \left(\frac{16,42}{6}\right) \cdot (0,88) \cdot \sqrt{2 \cdot (386) \cdot (6,62)}} = 1,10 \text{ inci}^2$$

$$D = \sqrt{4A/3,14} \quad (3-3)$$

$$D = \sqrt{4 \cdot 1,10 / 3,14} = 1,18 \text{ inci} = 30,04 \text{ mm} \sim 30 \text{ mm}$$

Penentuan rasio antara *sprue:runner:ingate* dihitung dengan memperhatikan kecepatan kritis dari aliran aluminium yang memasuki rongga cetakan dan bentuk dari *cylinder head*. Persamaan (2-3) digunakan dalam menghitung kecepatan ini dalam berbagai waktu tuang yang berbeda. Rasio *sprue:runner:ingate* juga dimasukkan secara *trial and error* untuk menghasilkan waktu tuang yang optimal.

Tabel 3-6. Penentuan rasio *sprue:runner:ingate* terhadap waktu tuang yang optimal *Casting Design A*.

Keterangan	Satuan	Waktu Tuang						
		1	2	3	7	8	9	10
W	kg	7,447	7,447	7,447	7,447	7,447	7,447	7,447
Q	kg/dtk	7,447	3,724	2,482	1,064	0,931	0,827	0,745
Densitas	kg/m ³	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
V	m ³ /dtk	0,003	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
D _{Sprue}		0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
Rasio A _{Sprue}		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
A _{Sprue}	m ²	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
v _{Sprue}	m/dtk	4,39	2,19	1,46	0,63	0,55	0,49	0,44
Rasio A _{Runner}		1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24
A _{Runner}	m ²	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
v _{Runner}	m/dtk	3,54	1,77	1,18	0,51	0,44	0,39	0,35
Rasio A _{Ingate}		1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
A _{Ingate}	m ²	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
v _{Ingate}	m/dtk	4,18	2,09	1,39	0,60	0,52	0,46	0,42

Hasil perhitungan pada **Tabel 3-6** ditetapkan sebagai rasio *sprue:runner:ingate* untuk menetapkan penampang *runner* dan *ingate* yang akan digunakan dengan waktu tuang optimal pada 9 detik. Penentuan waktu ini dengan mempertimbangkan kecepatan kritisnya pada setiap bagian yang ditandai dengan kotak tabel berwarna kuning. Waktu tuang yang optimal ini juga dengan mempertimbangkan faktor geometri yang ada pada *cylinder head*. Geometri *cylinder head* untuk menentukan lokasi penempatan *ingate* yang besar cukup sulit untuk membuat waktu tuang menjadi 2,74 detik tanpa melebihi kecepatan aliran kritisnya.

2. Casting Design B

Penentuan sistem saluran dimulai dengan menghitung laju penuangan berdasarkan persamaan (3-1) karena ketebalan benda cor kurang dari 0,25 inci. Laju penuangan (lb/detik):

$$\text{Laju}_{\text{tuang}} = 1,48 \times \sqrt{14,44} = 5,62$$

Penentuan dimensi bawah *sprue* untuk berbentuk bulat tirus dihitung dengan menggunakan persamaan (3-2) dan (3-3):

$$A = \frac{14,44}{(0,0867) \cdot \left(\frac{14,44}{5,62}\right) \cdot (0,88) \cdot \sqrt{2} \cdot (386) \cdot (7,31)} = 0,85 \text{ inci}^2$$

$$D = \sqrt{4 \cdot 1,10 / 3,14} = 1,08 \text{ inci} = 27,48 \text{ mm} \sim 28 \text{ mm}$$

Penentuan rasio antara *sprue:runner:ingate* dihitung dengan memperhatikan kecepatan kritis dari aliran aluminium yang memasuki rongga cetakan dan bentuk dari *cylinder head*. Persamaan (2-3) digunakan dalam menghitung kecepatan ini dalam berbagai waktu tuang yang berbeda. Rasio *sprue:runner:ingate* juga dimasukkan secara *trial* dan *error* untuk menghasilkan waktu tuang yang optimal.

Tabel 3-7. Penentuan rasio *sprue:runner:ingate* terhadap waktu tuang yang optimal *Casting Design B*.

Keterangan	Satuan	Waktu Tuang						
	dtk	3	5	6	8	9	10	11
W	kg	6,550	6,550	6,550	6,550	6,550	6,550	6,550
Q	kg/dtk	2,183	1,310	1,092	0,819	0,728	0,655	0,595
Densitas	kg/m ³	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
V	m ³ /dtk	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D _{Sprue}		0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
Rasio A _{Sprue}		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
A _{Sprue}	m ²	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
v _{Sprue}	m/dtk	1,48	0,89	0,74	0,55	0,49	0,44	0,40
Rasio A _{Runner}		1,623	1,623	1,623	1,623	1,623	1,623	1,623
A _{Runner}	m ²	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
v _{Runner}	m/dtk	0,91	0,55	0,45	0,34	0,30	0,27	0,25
Rasio A _{Ingate}		0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818	0,818
A _{Ingate}	m ²	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
v _{Ingate}	m/dtk	1,81	1,08	0,90	0,68	0,60	0,54	0,49

Hasil perhitungan pada **Tabel 3-7** ditetapkan sebagai rasio *sprue:runner:ingate* untuk menetapkan penampang *runner* dan *ingate* yang akan digunakan dengan waktu tuang optimal pada 11 detik. Waktu tuang yang optimal ini juga dengan mempertimbangkan faktor geometri yang ada pada *cylinder head*. Geometri *cylinder head* untuk menentukan lokasi penempatan *ingate* yang besar cukup sulit untuk membuat waktu tuang menjadi 2,57 detik tanpa melebihi kecepatan aliran kritisnya.

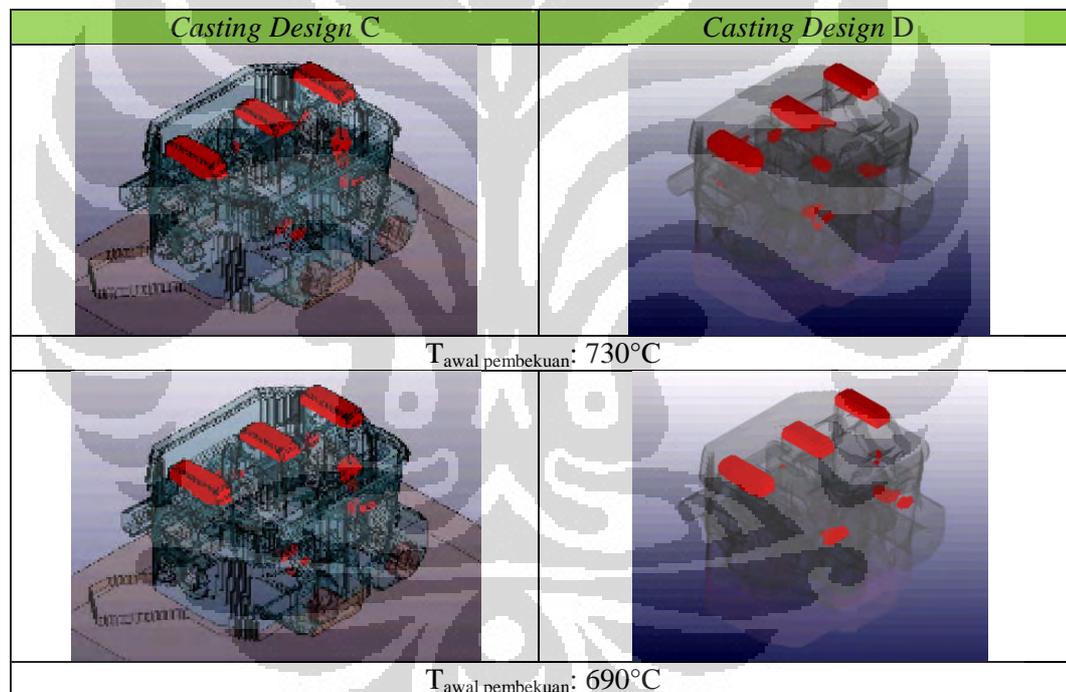
3.2.2. Modifikasi melalui Penggunaan “Chill Plate”

Modifikasi yang dilakukan pada tahap ini akan menghasilkan dua macam desain dengan nama *Casting Design C* dan *Casting Design D*. Pada *Casting Design C*, modifikasi dilakukan dengan menggunakan “*chill plate*” dengan ukuran sebesar cetakan pasir bagian bawah. Tujuannya adalah untuk menggantikan penggunaan cetakan pasir bagian bawah. Pada *Casting Design D*, modifikasi dilakukan menggunakan “*chill plate*” dengan ukuran hanya sebesar permukaan bawah *cylinder head*. Tujuannya adalah hanya sebatas meningkatkan karakteristik

permukaan bawah *cylinder head* tanpa mempertimbangkan untuk penggantian cetakan pasir bagian bawah.

Metode yang dilakukan untuk menghasilkan kedua *casting design* tersebut serupa secara garis besar dengan perbedaan pada tahap penentuan *riser* samping dan sistem saluran. Sementara, penentuan dimensi awal “*chill plate*” berdasarkan daerah bawah *cylinder head* dengan bentuk *dome* yang unik tersebut. Ketebalan “*chill plate*” 50 mm ditentukan dengan mempertimbangkan kesamaan dengan tebal cetakan bawah sehingga memudahkan dalam pembuatan dan perangkaian cetakan.

a. Simulasi pembekuan *cylinder head*



Gambar 3-4. Cacat dari hasil simulasi pembekuan *cylinder head* saja untuk *Casting Design C* dan *D* pada temperatur tuang 690 °C dan 730°C.

Hasil simulasi awal pada kedua *casting design* yang diperlihatkan pada **Gambar 3-4** menunjukkan bahwa daerah tengah di sekitar *water jacket* dapat bebas dari titik-titik *hotspot*. Dari sini terlihat kebutuhan *riser* hanya diperlukan pada bagian atas. *Riser* samping yang ditempatkan pada bagian tengah seperti pada *casting design* awal tidak diperlukan. Hal ini karena tidak dijumpai cacat atau daerah yang diperkirakan akan membutuhkan suplai dari *riser* samping. Selain itu,

diperkirakan dengan melihat titik-titik *hotspots* kebutuhan *chill* juga tidak akan sebanyak dari pada dua *casting design* sebelumnya.

Pada kedua *casting design* tersebut terlihat bahwa cacat akan muncul pada daerah tengah ke atas yaitu dimulai dari rantai tengah untuk tempat *camshaft* dan penampungan oli atas (sistem pelumas). Cacat terbentuk pada saluran untuk EFI di sebelah luar pada kiri dan kanan sisi *intake*. Cacat lain yang muncul adalah pada bagian kanan sisi *intake* dengan kecenderungan lebih besar pada *Casting Design C*. Sementara pada *Casting Design D* terlihat bahwa cacat muncul pada lubang baut atas bagian tengah. Posisi cacat ini tidak terlalu berbahaya terhadap produk *cylinder head* karena bagian ini tidak menyebabkan kebocoran antara sistem pelumas dan sistem pendingin atau tidak keluar dari dinding mesin.

b. Riser terbuka (atas)

Pada *Casting Design C* dan *Casting Design D* keperluan *riser* atas hanya pada bagian atas sesuai dengan hasil pada Tahap a. Penentuan *riser* atas ini sama seperti halnya dengan *Casting Design A* dan B. Modifikasi terhadap *casting design* awal ini dimulai dengan menghitung ulang volume *riser* atas sama dengan **Bagian 3.2.1**. *Riser* akan ditempatkan pada tiga puncak tertinggi dari *cylinder head* dimana pada posisi ini penyusutan terjadi akibat dari cairan yang turun untuk mengisi rongga cetakan di bawahnya. Dengan cara yang sama dengan *Casting Design A* dan B, pendekatan dengan metode modulus yang diikuti dengan metode komputerisasi dilakukan.

c. Menetapkan posisi dan ukuran *chill*

Casting Design C dan *Casting Design D* memerlukan tahap ini. Desain awal penempatan *chill* disesuaikan dengan pembentukan *hotspot* yang muncul pada Tahap a. Penggunaan simulasi “Z-cast” dalam menentukan susunan *chill* menjadi sangat penting. Hasil dari Tahap a cukup memberikan gambaran bahwa *chill* begitu dibutuhkan pada kedua lubang EFI yang berada di posisi paling kiri dan kanan.

d. Menentukan dimensi dan sistem saluran

Casting Design C dan *Casting Design D* memerlukan tahap ini dan desain awalnya adalah sama untuk keduanya. Pertama yang perlu dihitung adalah massa (W) yang digunakan adalah massa total *cylinder head* dan *riser* yang digunakan untuk menghitung laju penuangan dengan rincian kedua desain tersebut pada **Tabel 3-8**.

Tabel 3-8. Penjumlahan massa (W) *cylinder head* dan *riser*.

Berat	<i>Casting Design C</i>		<i>Casting Design D</i>	
	kg	lb	kg	lb
Cylinder Head	5,501	12,13	5,501	12,13
Riser Atas	1,049	2,31	1,385	3,05
Massa (W)	6,550	14,44	6,886	15,18

1. *Casting Design C*

Penentuan sistem saluran dimulai dengan menghitung laju penuangan berdasarkan persamaan (3-1) karena ketebalan benda cor kurang dari 0,25 inci. Laju penuangan (lb/detik):

$$Laju_{uang} = 1,48 \times \sqrt{14,44} = 5,62$$

Penentuan dimensi bawah *sprue* untuk berbentuk bulat tirus dihitung dengan menggunakan persamaan (3-2) dan (3-3):

$$A = \frac{14,44}{(0,0867) \cdot \left(\frac{14,44}{5,62}\right) \cdot (0,88) \cdot \sqrt{2 \cdot (386) \cdot (6,62)}} = 0,98 \text{ inci}^2$$

$$D = \sqrt{4 \cdot 1,01 / 3,14} = 1,12 \text{ inci} = 28,38 \text{ mm} \sim 29 \text{ mm}$$

Penentuan rasio antara *sprue:runner:ingate* dihitung dengan memperhatikan kecepatan kritis dari aliran aluminium yang memasuki rongga cetakan dan bentuk dari *cylinder head*. Persamaan (2-3) digunakan dalam menghitung kecepatan ini dalam berbagai waktu tuang yang berbeda. Rasio *sprue:runner:ingate* juga dimasukkan secara *trial* dan *error* untuk menghasilkan waktu tuang yang optimal.

Tabel 3-9. Penentuan rasio *sprue:runner:ingate* terhadap waktu tuang yang optimal.

Keterangan	Satuan	Waktu Tuang						
	dtk	1	2	3	8	9	10	11
W	kg	6,550	6,550	6,550	6,550	6,550	6,550	6,550
Q	kg/dtk	6,550	3,275	2,183	0,819	0,728	0,655	0,595
Densitas	kg/m ³	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
V	m ³ /dtk	0,003	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
D_{Sprue}		0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029
Rasio A_{Sprue}		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
A_{Sprue}	m ²	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
V_{Sprue}	m/dtk	4,13	2,07	1,38	0,52	0,46	0,41	0,38
Rasio A_{Runner}		0,795	0,795	0,795	0,795	0,795	0,795	0,795
A_{Runner}	m ²	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
V_{Runner}	m/dtk	5,20	2,60	1,73	0,65	0,58	0,52	0,47
Rasio A_{Ingate}		0,763	0,763	0,763	0,763	0,763	0,763	0,763
A_{Ingate}	m ²	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
V_{Ingate}	m/dtk	5,42	2,71	1,81	0,68	0,60	0,54	0,49

Hasil perhitungan pada **Tabel 3-9** ditetapkan sebagai rasio *sprue:runner:ingate* untuk menetapkan penampang *runner* dan *ingate* yang akan digunakan dengan waktu tuang optimal pada 11 detik. Waktu tuang yang optimal ini juga dengan mempertimbangkan faktor geometri yang ada pada *cylinder head*. Geometri *cylinder head* untuk menentukan lokasi penempatan *ingate* yang besar cukup sulit untuk membuat waktu tuang menjadi 2,57 detik tanpa melebihi kecepatan aliran kritisnya. Waktu tuang 11 detik dicapai dengan perbandingan saluran 1 : 0,79 : 0,76.

2. Casting Design D

Penentuan sistem saluran dimulai dengan menghitung laju penuangan berdasarkan persamaan (3-1) karena ketebalan benda cor kurang dari 0,25 inci. Laju penuangan (lb/detik):

$$Laju_{tuang} = 1,48 \times \sqrt{15,18} = 5,77$$

Penentuan dimensi bawah *sprue* untuk berbentuk bulat tirus dihitung dengan menggunakan persamaan (3-2) dan (3-3):

$$A = \frac{15,18}{(0,0867) \cdot \left(\frac{15,18}{5,77}\right) \cdot (0,88) \cdot \sqrt{2 \cdot (386) \cdot (6,62)}} = 1,01 \text{ inci}^2$$

$$D = \sqrt{4 \cdot 1,01 / 3,14} = 1,13 \text{ inci} = 28,74 \text{ mm} \sim 29 \text{ mm}$$

Dalam prakteknya, diameter penampang *sprue* disesuaikan dengan kondisi di lapangan dengan diameter 35 mm. Namun tidak banyak mempengaruhi penentuan rasio. Penentuan rasio antara *sprue:runner:ingate* dihitung dengan memperhatikan kecepatan kritis dari aliran aluminium yang memasuki rongga cetakan dan bentuk dari *cylinder head*. Persamaan (2-3) digunakan dalam menghitung kecepatan ini dalam berbagai waktu tuang yang berbeda. Rasio *sprue:runner:ingate* juga dimasukkan secara *trial and error* untuk menghasilkan waktu tuang yang optimal.

Tabel 3-10. Penentuan rasio *sprue:runner:ingate* terhadap waktu tuang yang optimal.

Keterangan	Satuan	Waktu Tuang						
	dtk	2	3	5	6	7	8	9
W	kg	6,886	6,886	6,886	6,886	6,886	6,886	6,886
Q	kg/dtk	3,443	2,295	1,377	1,148	0,984	0,861	0,765
Densitas	kg/m ³	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
V	m ³ /dtk	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
D _{Sprue}		0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
Rasio A _{Sprue}		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
A _{Sprue}	m ²	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
V _{Sprue}	m/dtk	1,49	0,99	0,60	0,50	0,43	0,37	0,33
Rasio A _{Runner}		1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
A _{Runner}	m ²	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
V _{Runner}	m/dtk	1,45	0,97	0,58	0,48	0,41	0,36	0,32
Rasio A _{Ingate}		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
A _{Ingate}	m ²	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
V _{Ingate}	m/dtk	1,49	1,00	0,60	0,50	0,43	0,37	0,33

Hasil perhitungan pada **Tabel 3-10** ditetapkan sebagai rasio *sprue:runner:ingate* untuk menetapkan penampang *runner* dan *ingate* yang akan digunakan dengan waktu tuang optimal pada 7 detik. Waktu tuang yang optimal ini juga dengan mempertimbangkan faktor geometri yang ada pada *cylinder head*. Geometri *cylinder head* untuk menentukan lokasi penempatan *ingate* yang besar cukup sulit

untuk membuat waktu tuang menjadi 2,63 detik tanpa melebihi kecepatan aliran kritisnya. Waktu tuang 7 detik dicapai dengan perbandingan saluran 1 : 1,03 : 1.

3.3 Eksperimen Pengecoran

Tahap eksperimen bertujuan untuk mengkonfirmasi hasil simulasi dengan proses pengecoran sesungguhnya. Pada tahap ini, *casting design* yang digunakan adalah pilihan terbaik dari setiap jenis modifikasi, yaitu *Casting Design A* dan *D*. Untuk menjalankan tahap ini maka pola *casting design* awal diperbaiki dan dimodifikasi atau bahkan dibuat baru sehingga diperoleh *casting design* terbaru yang sama dengan tahap simulasi. Selanjutnya cetakan pasir dengan pengerasan CO₂ dan *furane* untuk cetakan inti disiapkan. Persiapan cetakan dan cairan dilakukan sesuai standar yang telah ditetapkan dalam proses manufaktur ini (SOP Pengecoran Aluminium untuk *Engine Rusnas 500cc*).

Tabel 3-11. Cetakan dan proses pembuatannya untuk modifikasi *Casting Design A* dan *Casting Design D*.

No.	Bagian Cetakan	Proses Pembuatan	Dimensi <i>Casting Design A</i> (mm)	Dimensi <i>Casting Design D</i> (mm)
1	Atas	CO ₂	430 x 370 x 105	505 x 370 x 105
2	Bawah	CO ₂	425 x 340 x 50	485 x 450 x 50
3	Dinding Kanan <i>Intake</i>	CO ₂	330 x 130 x 195	330 x 130 x 195
4	Dinding Kiri <i>Intake</i>	CO ₂	330 x 130 x 135	435 x 195 x 135
5	Dinding <i>Intake</i> Atas	CO ₂	235 x 200 x 85	235 x 145 x 110
6	Dinding <i>Intake</i> Bawah	CO ₂	240 x 205 x 45	240 x 100 x 45
7	Lubang Busi Kiri	CO ₂	60 x 60 x 50	60 x 60 x 50
8	Lubang Busi Kanan	CO ₂	60 x 60 x 50	60 x 60 x 50
9	Dinding <i>Exhaust</i> Atas	CO ₂	200 x 140 x 90	200 x 140 x 90
10	Dinding <i>Exhaust</i> Bawah	CO ₂	195 x 70 x 45	195 x 70 x 45
11	Inti <i>Water Jacket</i>	Furane	190 x 100 x 50	190 x 100 x 50
12	Inti <i>Intake</i>	Furane	120 x Ø30	120 x Ø30
13	Inti <i>Exhaust</i>	Furane	100 x Ø26	100 x Ø26
14	Inti Oli Turun	CO ₂	125 x 60 x 20	125 x 60 x 20
15	Inti antara <i>Exhaust</i>	CO ₂	40 x 40 x 50	40 x 40 x 50
16	Inti lubang <i>Camshaft</i>	CO ₂	45 x 45 x 30	45 x 45 x 30

3.3.1. Cetakan

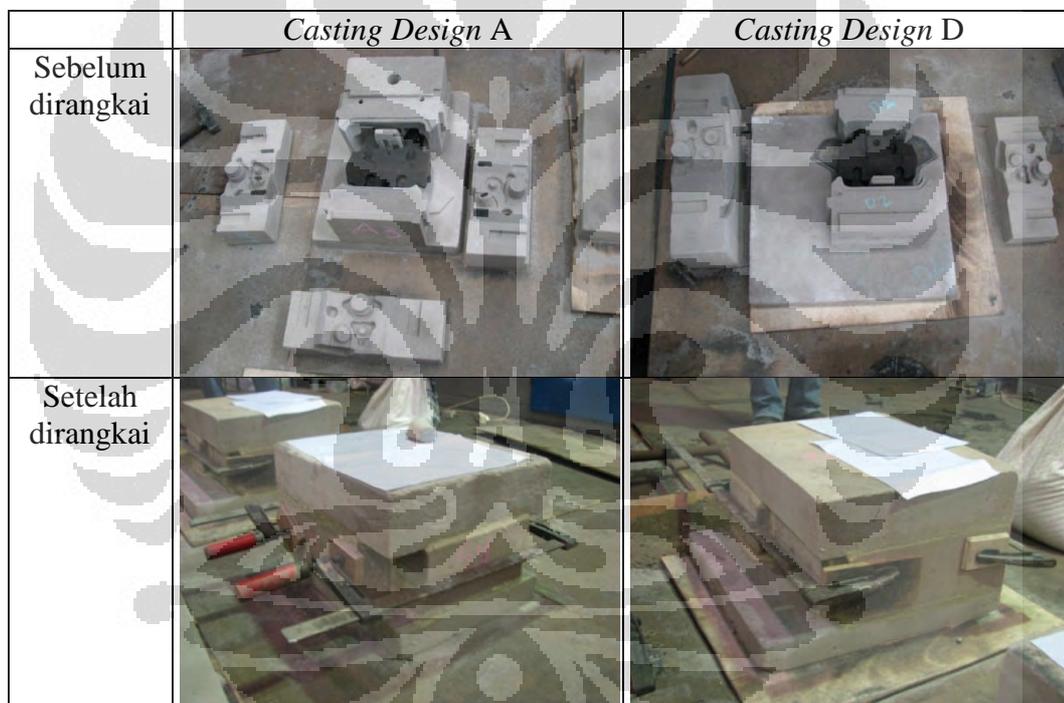
Pembuatan *cylinder head* ini menggunakan 16 potong cetakan untuk dirangkai menjadi satu. Cetakan yang digunakan dibedakan menjadi dua macam proses pembuatannya, yaitu proses dengan CO₂ dan *furane*.

Detail cetakan dan dimensinya untuk *Casting Design A* dan *Casting Design D* dirinci dalam **Tabel 3-11**. Perubahan cetakan yang dilakukan dari desain awal meliputi: cetakan atas, bawah, dinding *intake* atas, dinding *intake* bawah, dinding *exhaust* bawah, dan dinding kanan *intake*. Cetakan atas mengalami penyesuaian tinggi akibat dari berkurangnya tinggi *riser* menjadi 83 mm dari semula 122 mm. Pada *Casting Design A* dan *D* perubahan cetakan dilakukan untuk menyesuaikan dengan adanya sistem saluran baru, dan *riser* samping baru. Pola *Casting Design A* tidak banyak perubahan dimensi totalnya, kecuali cetakan atasnya yang mengalami perubahan dimensi total. Pola *Casting Design D* yang mengalami perubahan tersebut mengharuskan dimensi totalnya berubah. Kondisi ini diakibatkan dari perubahan sistem salurannya dimana dari awalnya penuangan dari sisi *intake* menjadi sisi kiri *intake*.

Tabel 3-12. Perbandingan jumlah dan berat *chill* sebelum dan setelah modifikasi *casting design*.

No.	Bagian Cetakan	Casting Design Awal		Casting Design A		Casting Design D	
		Jumlah	Berat, kg	Jumlah	Berat, kg	Jumlah	Berat, kg
1	Atas	11	0,95	10	0,93	-	-
2	Bawah	7	0,25	7	0,25	1	18,00
3	Dinding Kanan <i>Intake</i>	3	0,23	3	0,23	-	-
4	Dinding Kiri <i>Intake</i>	3	0,20	3	0,20	-	-
5	Dinding <i>Intake</i> Atas	4	0,20	4	0,20	2	0,16
6	Dinding <i>Intake</i> Bawah	-	-	-	-	-	-
7	Lubang Busi Kiri	1	0,04	1	0,04	-	-
8	Lubang Busi Kanan	1	0,04	1	0,04	-	-
9	Dinding <i>Exhaust</i> Atas	-	-	-	-	-	-
10	Dinding <i>Exhaust</i> Bawah	-	-	-	-	-	-
11	Inti <i>Water Jacket</i>	-	-	-	-	-	-
12	Inti <i>Intake</i>	2	0,01	2	0,01	-	-
13	Inti <i>Exhaust</i>	2	0,01	2	0,01	-	-
14	Inti Oli Turun	3	0,05	3	0,05	-	-
15	Inti antara <i>Exhaust</i>	1	0,03	1	0,03	-	-
16	Inti lubang <i>Camshaft</i>		-		-	-	-
Total		38	2,01	37	1,99	3	18,16

Perubahan desain tidak banyak merubah pemasangan *chill* untuk *Casting Design A* dibandingkan *Casting Design Awal* yang dirinci pada **Tabel 3-12**. Berdasarkan hasil simulasi, susunan *chill* yang mengalami perubahan terdapat pada cetakan atas yang tidak menggunakan *chill* No. 14. Berkurangnya satu *chill* masih belum mengurangi kesulitan dalam pembuatan cetakan sehingga tetap memerlukan ketelitian dan kehati-hatian yang tinggi. Perubahan yang besar dalam pemasangan *chill* pada *Casting Design D* sangat memudahkan dalam pembuatan cetakan. Hal ini karena hanya dua potong cetakan saja yang perlu ketelitian dan kehati-hatian dalam pemasangan *chill*. Meski demikian penanganan cetakan bawah perlu diperhatikan karena rentan terhadap kerusakan.



Gambar 3-5. Cetakan hasil modifikasi sebelum dan setelah dirangkai untuk hasil *Casting Design A* dan *Casting Design D*.

Cetakan yang dihasilkan untuk *Casting Design A* lebih rapi dari pada *Casting Design D*, **Gambar 3-5**. Hal ini karena dimensi pola cetakan yang tidak mengalami perubahan yang banyak dari desain awal. Desain awal cetakan telah diperhitungkan dan dicoba berkali-kali sehingga penggunaan pasir sudah dapat dihemat. Pada *Casting Design D*, penggunaan pasir secara hemat masih belum

bisa dilakukan dengan baik. Optimalisasi cetakan ini ke depan masih terbuka sehingga penghematan pasir bisa tercapai.

3.3.2. Proses Pengecoran

Pengecoran ini dilakukan dengan menggunakan dapur induksi “Inductotherm” kapasitas 150 kg seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3-6** berikut ini. Material yang digunakan adalah ingot AC4B 100% tanpa ada penyesuaian komposisi kimia lagi dan dilakukan dengan dua tahap. Tahap I hanya menggunakan ingot AC4B dan Tahap II menggunakan ingot AC4B yang ditambahkan titanium.



Gambar 3-6. Dapur induksi Inductotherm yang akan digunakan.

Tabel 3-13. Rincian variasi yang digunakan pada saat eksperimen.

Tahap	I				II			
Variasi	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Casting Design</i>	A	D	A	D	A	D	A	D
Temp. Tuang (°C)	730±5	690±5	730±5	690±5	730±5	690±5	730±5	690±5
Perlakuan Cairan	Ingot AC4B				Ingot AC4B + Ti			

Pada setiap tahap tersebut digunakan dua macam cetakan yaitu *Casting Design A* dan *Casting Design D* dan dua macam temperatur tuang pada 690°C dan 730°C. Dengan demikian maka akan diperoleh delapan variasi dalam penelitian ini yang seperti yang dijelaskan pada **Tabel 3-13**. Penelitian ini akan menghasilkan satu komponen *cylinder head* untuk setiap variasi tersebut.

Pemilihan berat dari Ti dilakukan berdasarkan dari hasil penghalusan butir yang optimal pada paduan Al9Si3Cu adalah 0,13%. Nilai ini diperoleh dari kajian dan

Universitas Indonesia

percobaan yang dilakukan oleh Jelena Pavlovic-Krstic [14] yang digunakan pada cetakan permanen dimana persentase berat Ti. Penggunaan Ti sebesar ini pada cetakan pasir ini diharapkan tetap dapat lebih memperbaiki sifat mekanis dalam menghasilkan produk *cylinder head*.

Tabel 3-14. Perhitungan material balance untuk mendapatkan berat titanium *flux* GR 2815 yang ditambahkan.

Unsur	Sebelum Penambahan				Setelah Penambahan	
	Ingot	56.000 gr	Al5TiB	1.260 gr	Total	57.260 gr
	Komposisi Kimia	Berat	Komposisi Kimia	Berat	Berat	Komposisi Kimia
	%	gr	%	gr	gr	%
Al	87,071	48.759,76	92,970	1.171,42	49.931,18	87,222
Si	8,379	4.692,24	0,200	2,52	4.694,76	8,201
Cu	2,445	1.369,20	0,030	0,38	1.369,58	2,392
Zn	0,710	397,60	0,030	0,38	397,98	0,695
Fe	0,676	378,56	0,300	3,78	382,34	0,668
Mn	0,194	108,64	0,030	0,38	109,02	0,190
Mg	0,369	206,64	0,030	0,38	207,02	0,362
Pb	0,021	11,76	0,030	0,38	12,14	0,021
Ni	0,022	12,32	0,030	0,38	12,70	0,022
Cr	0,049	27,44	0,030	0,38	27,82	0,049
Ca	0,002	1,12	0,030	0,38	1,50	0,003
Cd	0,002	1,12	0,030	0,38	1,50	0,003
Bi	0,003	1,68	0,030	0,38	2,06	0,004
V	0,007	3,92	0,200	2,52	6,44	0,011
Ti	0,023	12,88	5,000	63,00	75,88	0,133
B	-	-	1,000	12,60	12,60	0,022
Sn	0,002	1,12	0,030	0,38	1,50	0,003
Σ	99,975	55.986,00	100,000	1.260,00	57.246,00	100,000

Penambahan *grain refinement* pada cairan aluminium menggunakan GR 2815. Jumlah Ti target pada cairan aluminium sebesar 0,13% berat dihitung dengan menggunakan metode *material balance* seperti pada **Tabel 3-14**. Dalam pengecoran *cylinder head* Tahap II, ingot yang digunakan sebanyak 56 kg. Komposisi ingot yang dimasukkan diperoleh dari analisis kimia yang dilakukan oleh supplier. Mengingat komposisi GR 2815 kadar Ti tidak diketahui dan besarnya penambahan GR 2815 ini hanya setengah dari penambahan Al5Ti1B maka dalam *material balance* ini komposisi GR 2815 disamakan dengan

Universitas Indonesia

komposisi Al5Ti1B. Mengingat berat Al5Ti1B yang dicari maka metode ini dilakukan dengan memasukkan besarnya berat Al5Ti1B secara manual hingga diperoleh persen berat Ti sesuai dengan target 0,13%. Al5Ti1B diperoleh berdasarkan perhitungan ini adalah sebesar 1.260 gr maka berat dari GR 2815 yang diperlukan adalah sebesar 630 gr. Dengan menghitung berat GR 2815 ini terhadap total *charging* sebesar 56 gr maka persentase berat GR 2815 ini adalah 1,12%.

Berdasarkan perhitungan di atas maka dapat diketahui persentase Ti dalam GR 2815 adalah 10 % sehingga berat titanium dalam GR 2815 dihitung dengan persamaan (3-4).

$$Massa .Ti = \% \text{ berat } .Ti \times Berat_{GR\ 2815} \quad (3-4)$$

$$Massa.Ti = 10\% \times 630\text{ gr} = 63\text{ gr}$$

Maka kandungan Ti (% berat) dalam cairan aluminium dihitung dengan menggunakan persamaan (3-5).

$$\% \text{ berat } .Ti = \frac{Massa.Ti}{Massa.CairanAl} \times 100\% \quad (3-5)$$

$$\% \text{ berat } .Ti = \frac{63\text{ gr}}{56.000\text{ gr}} \times 100\% = 0,1125\%$$

Beberapa data yang digunakan sebagai parameter simulasi dicatat sebagai acuan dalam membandingkan proses simulasi dan eksperimen. Bentuk cetakan yang rumit menyebabkan tidak semua parameter simulasi yang terkait temperatur dapat diukur. Pengukuran secara tepat pada dinding cetakan, *chill*, dan “*chill plate*” tidak bisa dilakukan. Pengukuran temperatur pada cetakan hanya dilakukan pada bagian dalam dan luar cetakan secara umum dalam waktu 1 jam sebelum proses penuangan untuk setiap tahapnya. Pengukuran temperatur lingkungan dilakukan juga dalam waktu 1 jam sebelum proses penuangan pada posisi sekitar 1 m di atas cetakan. Berbagai parameter yang diukur selama eksperimen pengecoran dijelaskan dalam

Tabel 3-15.

Universitas Indonesia

Tabel 3-15. Parameter berbagai temperatur pada saat eksperimen.

Parameter Temperatur (°C)	Tahap I		Tahap II	
	A	D	A	D
<i>Casting Design</i>	A	D	A	D
Temp. Lingkungan	30,6		28,0	
Temp. Cetakan Dalam	35,7	34,0	42,1	68,2
Temp. Cetakan Luar	36,4	36,0	36,9	37,3

Pelaksanaan pengecoran mengikuti SOP yang telah ditetapkan. Modifikasi SOP ini akan dilakukan ketika dilakukan penambahan *grain refinement* (Ti flux) yang ditambahkan setelah proses *fluxing*. Beberapa hal penting dalam SOP pengecoran *cylinder head* ini adalah:

1. Proses *fluxing* ($T = 700 - 730^{\circ}\text{C}$) untuk mengangkat *slag*. Jumlah *flux* yang ditambahkan sebesar 0,2% dari berat cairan dan diaduk selama 15 – 20 menit.
2. Proses penambahan *grain refinement* dilakukan 10 menit setelah *fluxing*. Jumlah GR 2815 yang ditambahkan sebesar 1,12% dari berat cairan dan diaduk selama 15 – 20 menit. Tahap ini ditambahkan hanya ketika *grain refinement* diperlukan.
3. Proses *degassing* ($T = 730 - 750^{\circ}\text{C}$) untuk mengeluarkan gas hidrogen yang larut dalam cairan. Tinggi gelembung yang keluar dari cairan adalah sekitar 7 cm dan dilakukan selama 60 menit.
4. Proses penuangan ($T = 730^{\circ}\text{C}$) dengan batas waktu penuangan 1 jam setelah proses *degassing*, lebih itu harus di *degassing* ulang.
5. Sebelum proses penuangan, untuk menjaga cetakan pasir tidak lembab maka *pre-heating* dilakukan terlebih dahulu. Setelah *pre-heating* temperatur cetakan minimal adalah sekitar 40°C atau cukup hangat.

3.4 Eksperimen *Heat Treatment T6*

Sebanyak delapan set potongan sampel dari setiap *cylinder head* pada bagian *dome* dan dasar ini kemudian dilakukan *heat treatment* dengan menggunakan SOP yang telah ditetapkan dalam proses manufaktur ini melalui proses *heat treatment T6*. Perlakuan T6 ini melalui tahapan *solution treatment* pada temperatur 520°C

selama 9 jam kemudian di*quenched* dalam air bertemperatur 70°C. Proses *aging* dilakukan pada temperatur 180°C selama 5 jam [10].

Proses *solution treatment* dilakukan di dapur induksi *Nabertherm* LHT 04/17 dimana sampel dimasukkan ke dalam dapur pada temperatur 40°C. Temperatur *solution treatment* 520°C dicapai dengan menggunakan *heating rate* sebesar 10°C per menit. Setelah ditahan selama 9 jam sampel di-*quench* di media air dengan temperatur 70°C yang ditampung pada wadah *stainless steel*. *Aging* dilakukan dengan menggunakan dapur yang sama pada temperatur 180°C. Sampel dimasukkan sebelum temperatur *aging* tercapai pada 130°C dan temperatur dinaikkan dengan *heating rate* sebesar 10°C per menit.

3.5 Perhitungan Yield

Pembongkaran cetakan dilakukan setelah cairan membeku dengan sempurna untuk mengeluarkan produk cor beserta *gating system*nya. Setelah dibersihkan dari pasir bagian luar dan bagian dalam (inti), benda cor yang masih utuh ditimbang dengan menggunakan timbangan berkapasitas 10 kg seperti pada **Gambar 3-7**. Penimbangan berikutnya adalah bagian saluran dan *riser* setelah dipisahkan dari benda cor. *Cylinder head* yang sudah dipisahkan ini kemudian ditimbang juga untuk mengetahui besar material yang akan terbuang saat pemesinan. Hasil penimbangan ini digunakan untuk menghitung nilai *yield* dimana dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu *gross-yield* dan *net-yield*. Dalam *gross-yield*, berat produk masih memiliki cacat pengecoran seperti sirip sementara *net-yield*, berat produk dihitung berdasarkan berat sesuai desainnya. Rumus untuk mengetahui nilai *yield* ini masih sama dimana dihitung dengan menggunakan persamaan (3-6).

$$\% Yield = \frac{M_P}{M_P + M_{RS}} \times 100 \quad (3-6)$$

Dimana:

M_P adalah berat produk, M_{RS} adalah berat saluran, *riser*, dan lainnya seperti sirip-sirip yang terbentuk dan cairan yang meluap. Penjumlahan M_P dan M_{RS} akan menghasilkan berat cairan yang dituangkan ke cetakan.



Gambar 3-7. Penimbangan berat tuangan untuk menghitung *yield* dengan timbangan kapasitas 10 kg.

3.6 Pengujian Kualitas

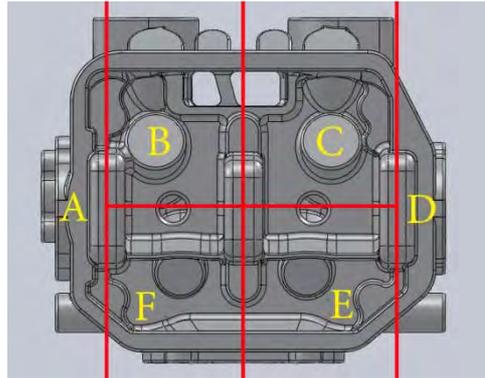
Komponen *cylinder head* yang dihasilkan dari proses pengecoran kemudian dilakukan pengujian kualitas. Pengujian kualitasnya dengan 3 metode yaitu pengamatan visual, pengujian kebocoran, dan pengujian NDT.

3.6.1. Pengamatan Visual Bagian Luar

Pengamatan pada bagian luar dilakukan pada keenam sisi *cylinder head* pada bagian atas, bagian bawah, bagian *intake*, bagian *exhaust*, bagian sisi kiri *intake*, dan bagian sisi kanan *intake*. Setiap bagian ini diamati dari berbagai cacat yang mungkin terbentuk selama pengecoran seperti kehalusan permukaan, keretakan, dan porositas.

3.6.2. Pengamatan Visual Bagian Dalam

Pengamatan pada bagian dalam dilakukan dengan memotong *cylinder head* menjadi enam bagian dengan pembagiannya pada **Gambar 3-8**. Pemotongan dilakukan setelah pengujian hidrostatis dan pengujian dengan *dye penetrant*. Melalui pemotongan menjadi enam bagian ini maka akan diamati cacat-cacat yang mungkin terbentuk pada bagian dalam *cylinder head*. Pengamatan visual ini juga dibandingkan dengan perkiraan cacat dengan menggunakan kriteria Niyama yang diperoleh dari hasil simulasi.



Gambar 3-8. Daerah pemotongan untuk pengamatan visual pada bagian dalam.

3.6.3. Pengujian Hidrostatik dan NDT

Pengujian kebocoran pada **Gambar 3-9(a)** dilakukan dengan memberikan tekanan hidrostatik pada tekanan 3 bar selama 15 menit yang didasarkan pada uji produk sejenis di PT NISDEMI [10]. Pada pengujian ini media air yang digunakan dipompakan ke rongga *water jacket* hingga tekanan di dalam rongga ini mencapai 3 bar. Setelah tekanan tercapai, air tidak dipompa lagi dan kemudian ditunggu hingga selama 15 menit. Jika tekanan berkurang selama waktu ini menandakan adanya kebocoran pada bagian *water jacket*. Kebocoran juga dapat dideteksi lebih awal ketika tekanan air sedang dinaikkan hingga 3 bar. Penahanan tekanan air yang kurang dari tekanan dan waktu tersebut menandakan kegagalan dari produk ini.



(a)



(b)

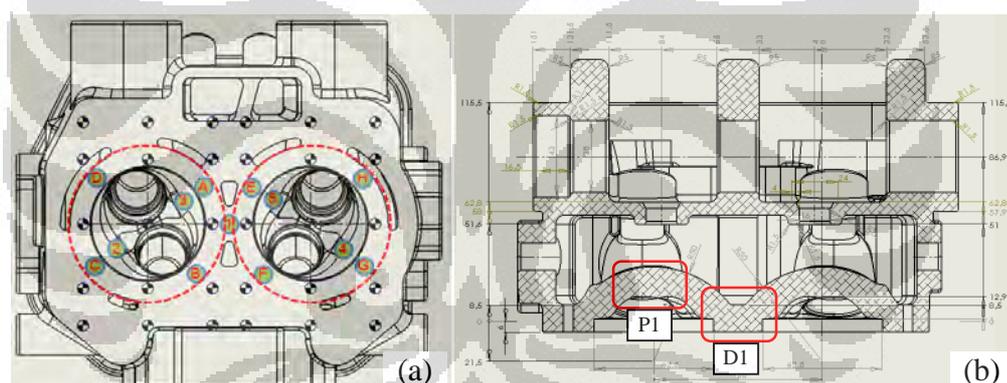
Gambar 3-9. (a) Peralatan pengujian kebocoran, dan (b) *dye penetrant* untuk mengecek cacat pada permukaan *cylinder head*.

Pengujian NDT dilakukan dengan menggunakan *dye penetrant* Spotcheck® dari Magnaflux pada **Gambar 3-9(b)**. Pengujian ini dilakukan pada seluruh

permukaan *cylinder head* termasuk bagian yang telah dihidrostatik (*water jacket*). Prosedur dalam melakukan *dye penetrant* dimulai dengan melakukan pembersihan permukaan yang dilanjutkan dengan menyemprotkan *cleaner* SKC-5. Tahap berikutnya adalah pemberian *penetrant* SKL-SP1 dan diakhir dengan pemberian SKD-52 yang berfungsi menarik *penetrant* keluar permukaan jika terjadi cacat.

3.7 Karakterisasi Struktur Mikro dan Kekerasan

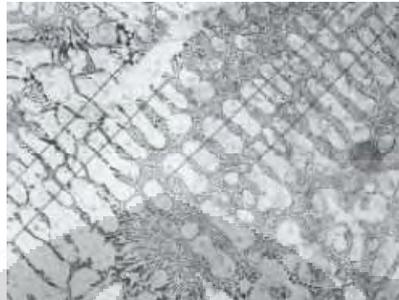
Pengujian kekerasan pada daerah ini dilakukan dalam skala HB ($10D^2$) untuk distribusi kekerasan pada permukaan bawah *cylinder head*. Distribusi kekerasan ini diukur dengan menggunakan *Digital Portable Hardness Tester* jenis DHT-200. Pengujian kekerasan pada penampang P1 dan D1 dilakukan dengan alat uji kekerasan *Vickers* dengan beban 5 kgf. Daerah pengukuran kekerasan pada permukaan bawah dan penampang P1 dan D1 digambarkan pada **Gambar 3-10(a)** dan **(b)**.



Gambar 3-10. Daerah pengamatan struktur mikro dan pengujian kekerasan (a) pengukuran kekerasan pada permukaan bawah *cylinder head* (b) SDAS dan kekerasan diukur pada penampang memanjang dari *cylinder head*, dan [12].

Pengamatan struktur mikro untuk melihat besaran dari SDAS dan pengujian kekerasan dilakukan pada produk cor dari kedua *casting design*. Daerah pengamatan dan pengujian adalah pada daerah puncak *dome* (P1) dan pada dasar *dome* (D1) yang ditunjukkan pada **Gambar 3-10(b)**. Pengamatan struktur mikro pada penampang melintang ini dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik yang diambil pada bagian tengah P1 dan D1 dengan menggunakan etsa *Dix. Keller* (3 ml HCl + 5 ml HNO₃ + 2 ml HF + 190 ml *Aquades*). Pengukuran SDAS dilakukan dengan menghitung jarak total antara garis tengah dendrit dibagi

dengan jumlah lengannya dan dibagi dengan faktor perbesarannya. Beberapa foto perlu diambil untuk menghitung jarak rata-rata dari lima pengukuran seperti pada **Gambar 3-11** [19]. Hasil pengujian kekerasan ini dibandingkan dengan nilai SDASnya sehingga dapat diketahui hubungan antara keduanya.



Gambar 3-11. Metode pengukuran SDAS dengan menghitung panjang segment dibagi dengan jumlah lengan dendrit [19].

3.8 Analisis Biaya Produksi

Analisis biaya produksi dapat memberikan proyeksi perbaikan suatu produk secara keekonomiannya. Perbaikan dari nilai *yield* yang diikuti dengan peningkatan kualitas dapat memberikan keuntungan bagi industri dimana harga jual produknya bisa kompetitif. Analisis biaya produksi per unit yang dihitung mulai dari proses pengecoran hingga *heat treatment* dikelompokkan ke dalam lima komponen berdasarkan pertimbangan dari referensi ASM [46], Nicolas Perry dan kawan-kawan [51] dan R.G. Chougule dan kawan [52]. Komponen-komponen biaya ini adalah material langsung, material tidak langsung, energi, tenaga kerja, dan peralatan.

Perhitungan analisis biaya ini berdasarkan biaya yang diperlukan untuk per *batch*nya. Berdasarkan *yield* yang diperoleh untuk setiap modifikasi *casting design* per *batch* adalah 18 unit. Ini meningkat dari *castng design* awal yang hanya menghasilkan 13 unit per *batch*. Analisis biaya ini menggunakan tiga asumsi pada ketiga komponen biaya yaitu, biaya energi, biaya pekerja, dan biaya peralatan. Asumsi pertama adalah biaya energi yang dipakai dalam analisis ini adalah dengan menggunakan solar untuk proses pengecorannya dan menggunakan dapur *muffle* untuk *heat treatment* T6 secara menyewa. Pada proses produksi terakhir dengan *casting design* awal menunjukkan penggunaan solar sebesar 15

liter untuk menghasilkan 13 unit *cylinder head* dengan total *charging* sekitar 176 kg per *batch*. Biaya sewa dapur untuk proses *heat treatment* adalah Rp 125.000/jam dengan kapasitas dapur hingga 20 unit *cylinder head*.

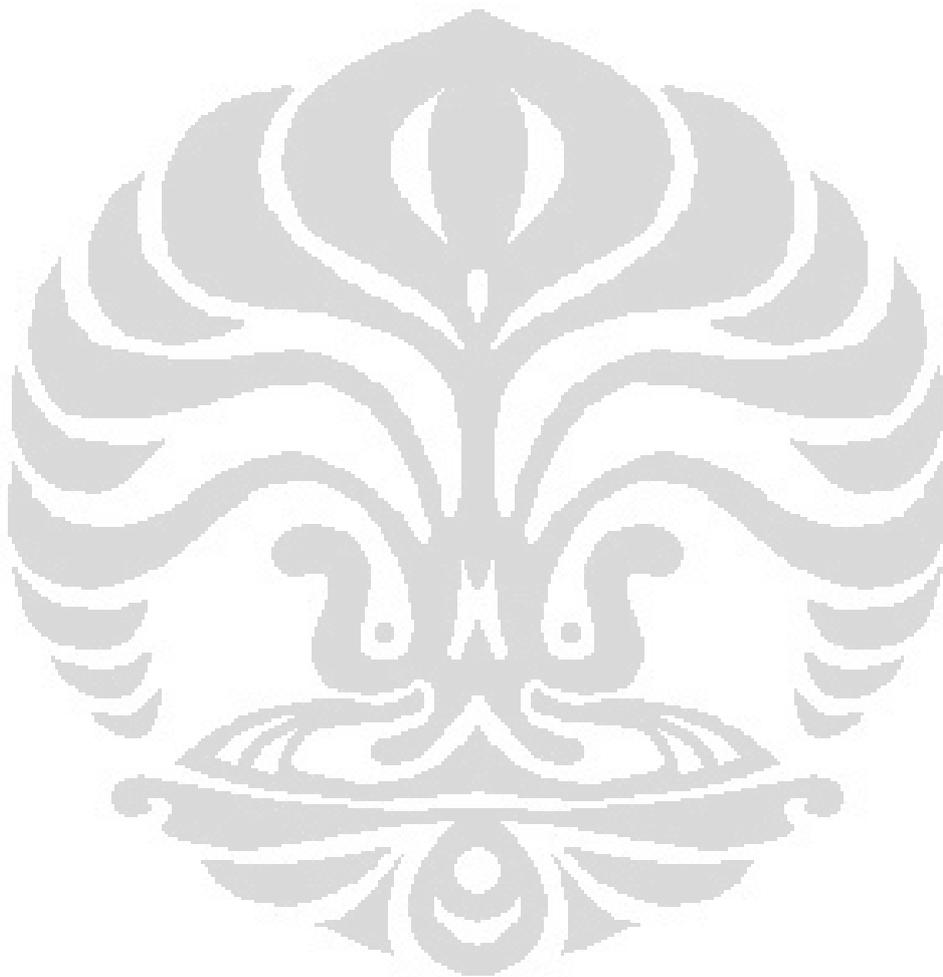
Asumsi kedua adalah penggunaan biaya pekerja yang didasarkan pada UMR di daerah Tegal yang dibagi menjadi 20 hari kerja untuk mendapatkan biaya per harinya. Proses pekerjaan yang melibatkan jumlah pekerja, dan kapasitas produksi dalam setiap tahapnya diasumsikan berjalan pada sistem yang telah stabil. Biaya pekerja ini dibagi ke dalam empat macam kelompok pekerjaan yaitu: pembuatan cetakan, pengecoran, *finishing*, dan *heat treatment*.

Biaya pembuatan cetakan dilakukan berdasarkan asumsi kapasitas pembuatan cetakan per hari adalah 5 unit per hari dengan jumlah pekerja 4 orang. Pada dasarnya perubahan *casting design* dapat mempercepat waktu kerja seperti dengan berkurangnya pemakaian *chill* pada cetakan untuk *Casting Design D*. Kesulitan ini timbul dalam menghitung waktu kerja akibat perubahan manajemen yang menyebabkan sistemnya belum stabil.

Biaya pekerjaan pengecoran dilakukan berdasarkan asumsi kapasitas dapur per *batch* dapat dicapai dalam sekali jalan per hari. Proses pengecoran ini memerlukan enam orang dengan dua orang untuk persiapan dapur dan empat orang untuk persiapan cetakan. Biaya *heat treatment* dihitung dengan mempertimbangkan kapasitas rasio dapur terisi terhadap kapasitas terpasang, waktu prosesnya, dan jumlah orang yang terlibat langsung. Waktu proses untuk *Casting Design D* dan cairan yang menggunakan penghalus butir masih berdasarkan SOP awal. Berdasarkan hasil eksperimen dengan mengamati struktur mikronya maka proses *heat treatment* T6 memungkinkan dilakukan pada waktu yang lebih singkat dengan kualitas yang sama. Oleh karena itu perbaikan SOP ini perlu didahului dengan penelitian *heat treatment* secara cermat.

Asumsi yang ketiga adalah biaya yang terkait dengan penggunaan peralatan dalam eksperimen ini. Penggunaan peralatan secara bersama-sama untuk berbagai proses

produksi yang berjalan di tempat eksperimen menyulitkan dalam memisahkan perhitungan besarnya biaya yang hanya digunakan untuk proses ini. Perbedaan biaya peralatan antara *casting design* awal dan modifikasi dihitung berdasarkan rasio jumlah unit yang dihasilkan per *batch*nya dimana akan mempengaruhi umur dari peralatan.

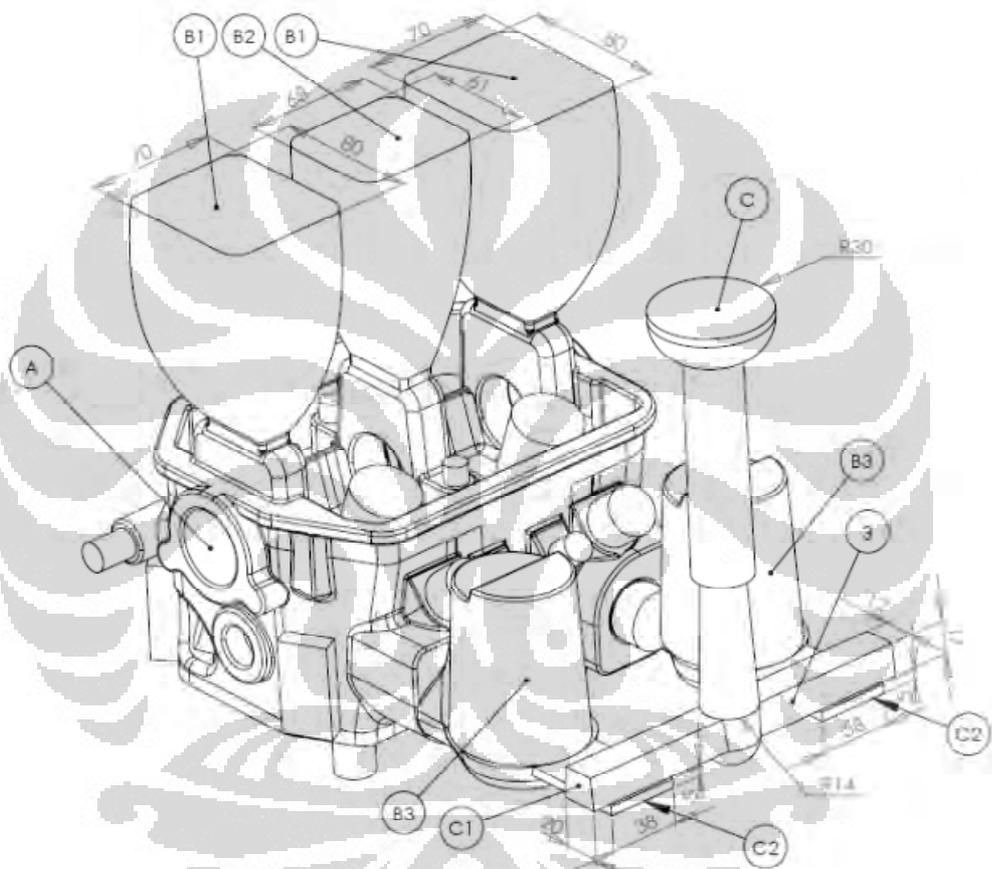


BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Evaluasi *Casting Design* Awal

Hasil dari evaluasi *Casting Design* Awal adalah sebagai berikut.

4.1.1. Desain



Gambar 4-1. *Casting design* dari cylinder head awal [12].

Dalam *casting design* awal yang ditunjukkan pada **Gambar 4-1** dan **Tabel 4-1** diketahui bahwa tiga *riser* atas dan dua *riser* samping digunakan. Kelima *riser* ini memiliki volume yang besar dan ini diikuti dengan modulus *riser* yang besar juga. Dengan menghitung modulus setiap *riser*-nya maka modulusnya jauh lebih besar dari pada modulus (M_C) *cylinder head*. Modulus *riser* telah melebihi nilai minimal pada umumnya sebesar 6,6 yang merupakan 1,2 kali modulus *cylinder*

head [46]. Nilai modulus *riser* ini menunjukkan bahwa *riser* yang didesain dipastikan akan terakhir membeku.

Sementara sistem saluran dengan modulus 5,26 akan lebih dahulu membeku dibandingkan dengan *cylinder head*. Sistem saluran ini tidak akan terlalu berpengaruh terhadap proses pembekuan dari *cylinder head* karena hanya lebih berfungsi sebagai bagian yang menyalurkan cairan ke rongga cetakan. Sistem saluran yang digunakan dalam *Casting Design Awal* ini sedikit bertekanan dengan rasio 1 : 1,13 : 0,77.

Tabel 4-1. Rincian dimensi *Casting Design Awal*.

No.	Nama	Dimensi Total			Volume mm ³	Permukaan mm ²	Modulus Casting M _c	Massa kg
		p, mm	l, mm	t, mm				
A	<i>Cylinder Head</i>	230,00	198,50	144,20	1.985.943,07	357.964,71	5,55	5,501
B1	<i>Top Riser Kanan</i>	80,00	70,00	122,00	527.628,55	37.394,44	14,11	1,462
B2	<i>Top Riser Kiri</i>	80,00	70,00	122,00	527.621,16	37.402,94	14,11	1,462
B3	<i>Top Riser Tengah</i>	68,00	61,00	122,00	337.513,94	29.470,45	11,45	0,935
B4	<i>Side Riser Kiri</i>	67,99	67,99	106,81	332.318,00	27.130,34	11,88	0,893
B5	<i>Side Riser Kanan</i>	67,99	67,99	106,81	322.345,51	27.132,42	11,88	0,893
C	<i>Gating system</i>				254.901,43	48.429,94	5,26	0,706
		Dia. mm	l mm	t mm	Luas Penampang	Jumlah	Luas Penampang Total	Rasio
	A	28			548,45	1	548,45	1,00
	C1 <i>Runner</i>		20/17	15	277,50	2	555,00	1,13
	C2 <i>Ingate</i>		38	5	190,00	2	380,00	0,77

4.1.2. Yield

Perhitungan terhadap berat total *riser* berdasarkan gambar desain yang dijelaskan dalam **Tabel 4-1** menghasilkan berat lebih dari 5,6 kg. Perhitungan terhadap total berat tuangan memperlihatkan bahwa nilai *yield* dari *Castin Design Awal* berdasarkan gambar desain bisa mencapai 46,29%. Berbeda dengan hasil eksperimen yang menunjukkan *yield* yang lebih rendah sebesar 42,31%. Perbedaan ini disebabkan oleh total berat tuangan pada eksperimen yang mencapai 13 kg. Berlebihnya berat tuangan ini disebabkan oleh ditambahkannya cairan aluminium ke rongga *riser* yang sedang membeku karena kekhawatiran kurangnya cairan yang disuplai oleh *riser*. Selain itu, cacat yang ditemukan

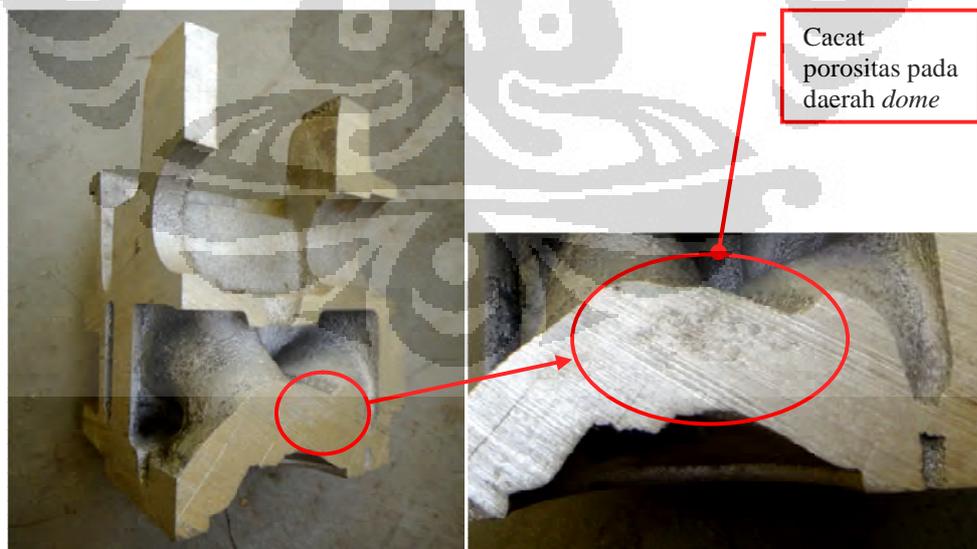
berupa kategori A – *Metallic projection* yang berupa sirip-sirip yang muncul pada sambungan cetakan menyebabkan nilai *yield*-nya menjadi lebih rendah.



Gambar 4-2. Hasil pengecoran dengan *casting design* awal.

4.1.3. Cacat yang Muncul

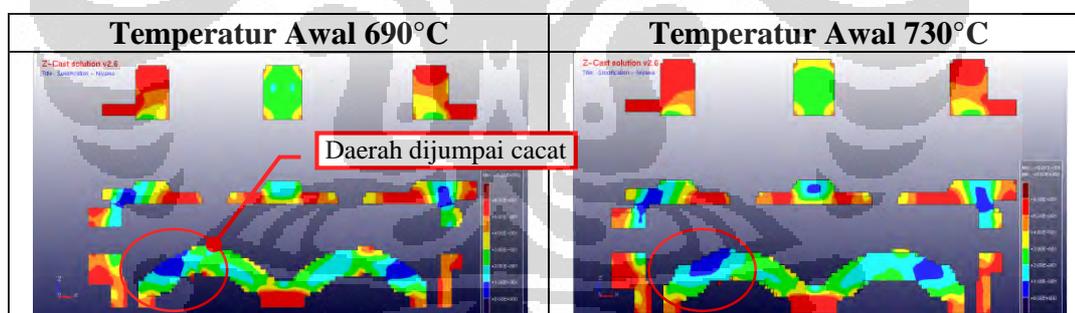
Pengecoran *cylinder head* yang telah dilakukan selama ini menunjukkan hasil yang memuaskan berdasarkan pengamatan visual, pengujian kebocoran dan *dye penetrant*. Pengecoran terakhir kali dengan menggunakan dapur krusibel dengan temperatur tuang yang bervariasi dalam rentang 690 – 730°C tetap menghasilkan *cylinder head* yang lulus dari uji kualitas. Pencapaian ini sama dengan pengecoran sebelumnya yang menggunakan temperatur tuang yang konstan pada 730°C.



Gambar 4-3. Pembelahan terhadap *cylinder head* menunjukkan tidak ditemukannya cacat pada daerah yang diperkirakan dari simulasi. Cacat dijumpai pada daerah lainnya.

Pengamatan visual bagian luar tidak menunjukkan cacat yang berarti selain dari munculnya cacat dalam kategori A – *Metallic projection* yang berupa sirip-sirip yang muncul pada sambungan cetakan. Namun pengamatan visual bagian dalam menunjukkan hasil yang berbeda yaitu ditemukannya cacat porositas pada bagian atas *dome* seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 4-3**. Cacat ini sangat mungkin tidak dapat dideteksi dengan pengujian hidrostatis dan *dye penetrant* karena berada pada daerah yang tebal sebesar 14,5 mm dan hanya berkumpul di tengah.

Munculnya cacat ini dapat disebabkan oleh dua kemungkinan. Kemungkinan pertama terjadi akibat dari gas yang terjebak yang berasal dari cetakan pasir yang kurang kering, waktu *degassing* yang kurang lama, dan aliran yang turbulen. Namun kemungkinan di atas bisa diabaikan karena SOP sudah dijalankan. Jika cacat yang ditimbulkan adalah akibat gas maka pada bagian lain juga dapat dijumpai dalam bentuk cacat *pinholes*. Pertimbangan terhadap gas yang terjebak tersebut akibat kondisi penuangan yang menyebabkan turbulensi dari cairan aluminium maka kondisi tersebut dapat dihindari. Waktu tuang yang lambat dengan kisaran 15 – 20 detik memungkinkan cairan terhindar dari turbulensi.



Gambar 4-4. Kriteria Niyama yang diperoleh dari hasil simulasi pembekuan pada daerah tengah yang memotong kedua *dome*, (A) simulasi pembekuan dan (B) simulasi pembekuan setelah penuangan.

Kemungkinan kedua adalah perkiraan cacat yang dihitung berdasarkan kriteria Niyama [21-23]. Dengan memeriksa silang dengan menjalankan simulasi “Z-cast” maka dapat dilihat kemungkinan daerah yang dapat menghasilkan cacat seperti pada **Gambar 4-4** berdasarkan nilai Niyama yang muncul. Batasan nilai kriteria Niyama untuk memprediksi terjadinya cacat pada pengecoran paduan aluminium adalah kurang dari 0,3. Pada gambar ini, nilai tersebut ditandai dengan warna hijau, biru muda, biru tua, dan ungu tua. Warna-warna ini memang muncul pada

daerah *dome* dan daerah yang dijumpai cacat ditandai dengan lingkaran merah. Kemunculan warna ini juga menunjukkan bahwa daerah *dome* adalah salah satu daerah yang rentan terhadap pembentukan penyusutan porositas dalam *Casting Design Awal*.

4.1.4. Komposisi Kimia

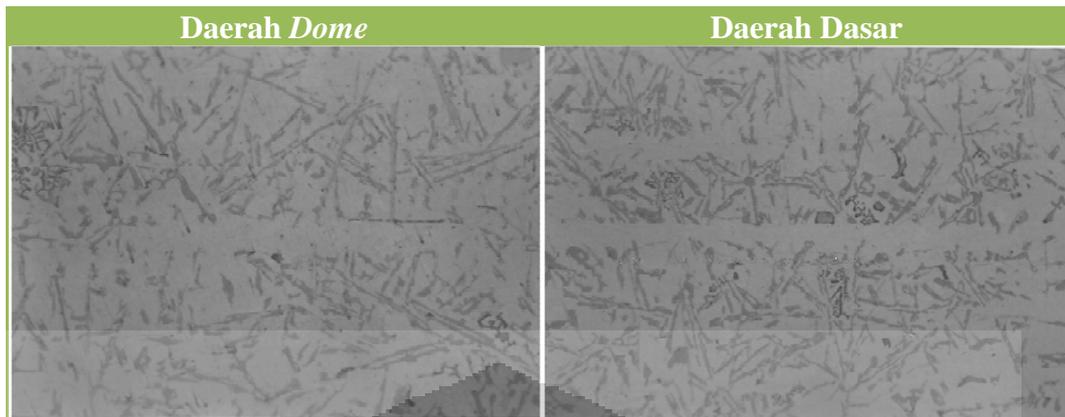
Hasil pengujian komposisi material pada *cylinder head* yang diperlihatkan pada **Tabel 4-2** menunjukkan bahwa secara umum komposisi kimia ini dapat memenuhi standar AC4B. Komposisi tersebut dapat dicapai bahkan ketika menggunakan rasio antara ingot AC4B 60% dan *scrap* AC4B 40%. *Scrap* yang digunakan adalah sisa-sisa dari hasil trial produksi komponen *cylinder head*.

Tabel 4-2. Tabel komposisi kimia desain awal *cylinder head*.

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn
AC4B JIS H5202	7,0- 10,0	≤1,0	2,0- 4,0	≤0,5	≤0,5	≤0,2	≤0,35	≤1,0	≤0,2	≤0,1
<i>Cylinder Head</i>	10,4	1,02	2,60	0,293	0,151	0,027	0,083	0,906	0,026	0,030
Riset <i>Heat Treatment</i> 2006	8,00	0,79	2,35	0,26	-	0,02	0,13	0,71	0,03	0,02

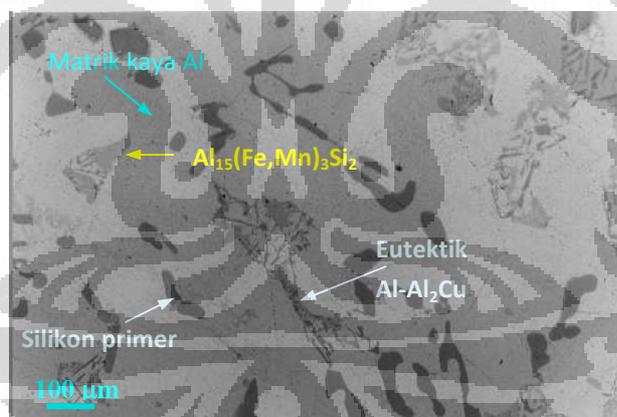
4.1.5. Struktur Mikro

Struktur mikro yang dihasilkan pada **Gambar 4-5** berikut ini merupakan ciri khas dari proses pembekuan yang lambat dimana nilai SDAS-nya besar. Daerah *dome* cenderung lebih lambat membeku dari pada daerah dasar sehingga struktur mikro yang terbentuk menjadi lebih kasar dan menghasilkan kekerasan yang lebih rendah. Struktur mikro yang lebih kasar menyebabkan ukuran dan distribusi fasanya saling berjauhan seperti fasa silikon primer (abu-abu tua), $Al_x(Fe,Mn)_ySi_z$, dan $CuAl_2$ [37,58,59]. Kondisi ini berbeda dengan kondisi struktur mikro pada daerah dasar. Kecepatan pembekuan yang lebih tinggi menyebabkan struktur mikronya lebih halus yang diikuti oleh ukuran dan distribusi fasanya dan porositas yang terbentuk.



Gambar 4-5. Struktur mikro daerah *dome* dan dasar *cylinder head* kondisi pengecoran, 100x.

Proses *heat treatment* T6 yang dilakukan akan merubah struktur dari jarum-jarum fasa silikon primer (abu-abu tua), fasa kaya-Fe seperti $Al_x(Fe,Mn)_ySi_z$, dan fasa kaya-Cu seperti $CuAl_2$ ini menjadi bulat seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4-6**. Kondisi ini menguntungkan karena dapat meningkatkan sifat mekanis dari paduan ini dengan menghilangkan potensi terbentuknya konsentrasi tegangan.



Gambar 4-6. Struktur mikro setelah T6, perbesaran 100x [58,59].

4.1.6. Hasil Uji Kekerasan

Karakterisasi material ini pada daerah *dome* dan dasar *cylinder head* menunjukkan nilai kekerasan yang ditunjukkan pada **Tabel 4-3** berbeda sebagai akibat dari perbedaan kecepatan pendinginan. Sementara itu, nilai kekerasan dari sampel yang diuji ini lebih besar dari pada nilai kekerasan yang diukur pada penelitian *heat treatment* tahun 2006 sebesar 53 BHN dari kondisi pengecoran dan menjadi 61 BHN setelah T6 [58,59]. Nilai kekerasan tersebut menunjukkan angka yang

lebih tinggi dibandingkan kekerasan setelah T6. Namun melihat dari struktur mikronya maka mungkin sifat mekanis lainnya seperti ketangguhan dan keuletan akan berbeda.

Tabel 4-3. Perbandingan kekerasan daerah *dome* dan dasar *cylinder head* kondisi pengecoran.

Daerah <i>Dome</i>	Daerah Dasar
79 HBS (39 HRB)	90 HBS (51 HRB)

Nilai kekerasan yang tinggi pada **Tabel 4-3** dimungkinkan dari sifat paduan aluminium ini yang dapat mengeras sendiri akibat proses *natural aging* hanya dalam hitungan beberapa pekan [60]. Hal ini sejalan dengan sampel yang diuji ini merupakan hasil pengecoran yang dilakukan pada tahun 2010 dan telah melewati waktu lebih dari 60 pekan. Kondisi ini berbeda dengan penelitian tahun 2006 yang tidak membutuhkan waktu selama itu untuk dilakukan pengujian kekerasannya setelah pengecoran. Berdasarkan data dari hasil kedua pengujian ini maka dapat diketahui bahwa kekerasan awal dari *cylinder head* kondisi pengecoran berkisar pada nilai 53 BHN dan kekerasan pada daerah *dome* lebih rendah dari pada daerah dasar.

4.1.7. Pra-Simulasi

Pra-simulasi yang telah dilakukan dengan menggunakan media *Casting Design* Awal menunjukkan nilai parameter yang optimal untuk digunakan pada simulasi berikutnya. Nilai parameter yang ditentukan ini masih menunjukkan cacat pada hasil simulasi namun cacat yang timbul berada dalam kondisi yang paling minim dan mendekati dengan benda cornya. Dengan demikian maka nilai parameter untuk simulasi dengan “*Z-cast versi 2.6*” yang akan digunakan pada proses simulasi hasil modifikasi berikutnya adalah sebagai berikut:

- Material *Cylinder Head*: ADC10/AI9Si3Cu
- Material Cetakan:
 - *Core*: Furan
 - *Mold*: Silica Sand
- Material *Chill*: SCPH1 (0,2%C, 0,65%Mn)
- Temp. Awal Cairan: 690°C dan 730°C

- Temp. Awal Cetakan, *Chill*, dan Lingkungan: 30°C
- *Volume Shrinkage*: 3%
- *Critical Solid Fraction*: 70%

4.2 Modifikasi dan Simulasi *Casting Design*

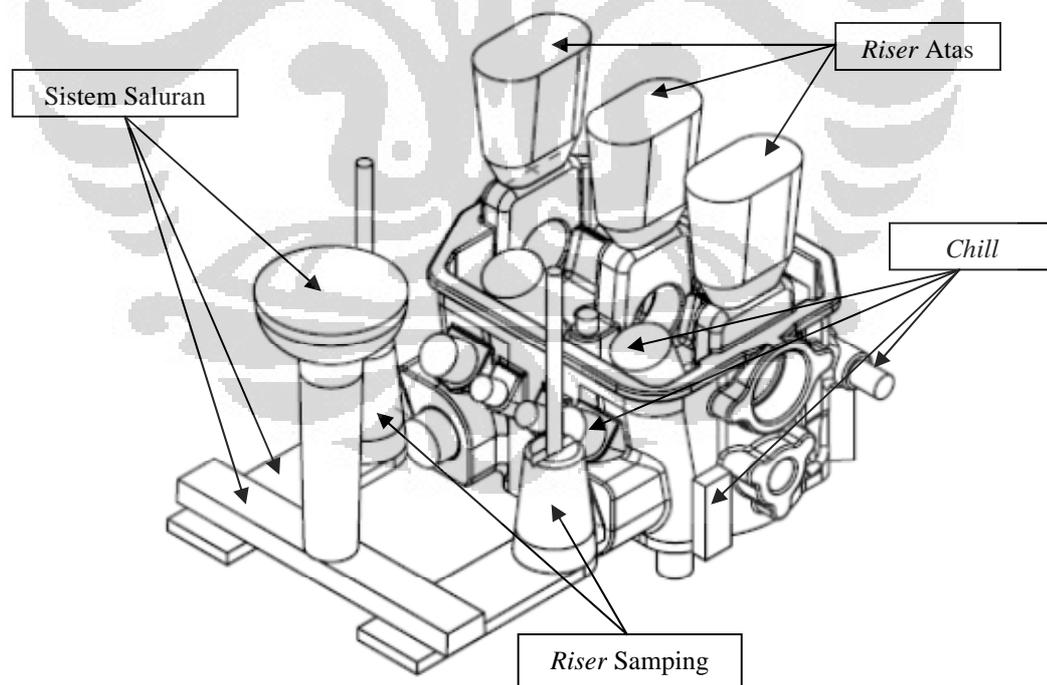
Hasil dari modifikasi *Casting Design* Awal adalah sebagai berikut.

4.2.1 Modifikasi Posisi dan Ukuran dari *Chill* dan *Riser*

Modifikasi melalui perubahan posisi dan ukuran *chill* dan *riser* diperoleh dua macam *casting design* yang dinamakan A dan B.

4.2.1.1 *Casting Design* A

Pada *casting design* ini diperoleh hasil akhir seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4-7**. Desain ini mirip dengan *Casting Design* Awal tetapi memiliki beberapa perbaikan. Perbaikan tersebut adalah berkurangnya volume *riser* atas dan samping dan berkurangnya susunan *chill* yang digunakan.

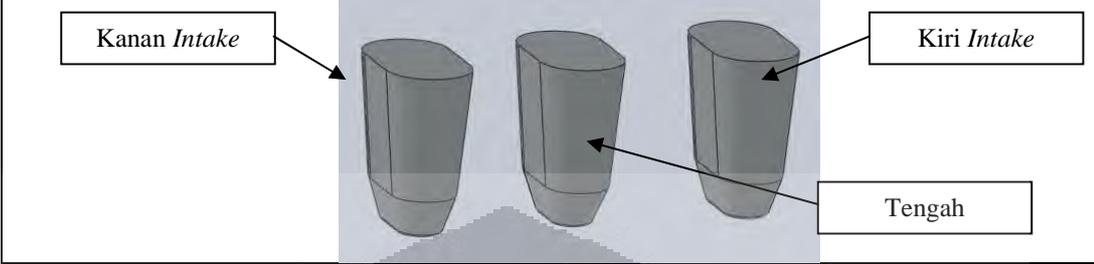


Gambar 4-7. *Casting Design* A terakhir.

Desain *riser* atas terakhir yang dirinci pada **Tabel 4-4** ini memiliki volume hanya sebesar 32,05% dari pada desain *riser* awal untuk sebelah kanan dan kiri *intake*.

Sementara *riser* tengah memiliki besar 47,93% dari pada desain *riser* awal yang memang lebih kecil dari *riser* kanan dan kiri *intake*.

Tabel 4-4. Desain *riser* atas terakhir.



	Kanan <i>Intake</i>	Tengah	Kiri <i>Intake</i>
Volume, mm ³	169.124,75	161.754,71	169.124,75
Luas Area, mm ²	17.921,96	17.363,34	17.921,96
Modulus <i>Riser</i>	9,44	9,32	9,44
Massa, kg	0,4685	0,4481	0,4685

Dimensi *riser* samping yang telah dioptimasi diperoleh pada **Tabel 4-5**. Desain *riser* samping terakhir ini memiliki besar hanya 30,47% dari pada desain *riser* awal untuk masing-masing *riser* samping.

Tabel 4-5. Desain *riser* samping terakhir.



	Kanan <i>Intake</i>	Kiri <i>Intake</i>
Volume, mm ³	101.263,88	101.263,88
Luas Area, mm ²	13.206,86	13.206,86
Modulus <i>Riser</i>	7,67	7,67
Massa, kg	0,2805	0,2805

Susunan *chill* yang ditetapkan pada *Casting Design A* setelah melewati tahapan simulasi tidak berbeda jauh dengan yang telah ditetapkan pada *casting design* awal. Susunan *chill* ini berkurang satu menjadi 37 *chill* seperti yang diperinci

pada **Tabel 4-6**. Susunan ini menunjukkan jumlah titik-titik *hotspot* yang paling sedikit dari simulasi yang telah dilakukan. Modifikasi dilakukan dengan menghilangkan *chill* No. 14 dimana keberadaannya tidak terlalu mempengaruhi titik-titik *hotspot* yang terbentuk pada hasil cor. *Chill* No. 8 tetap dipertahankan meski hasil simulasi menunjukkan ketidakpengaruhannya terhadap pembentukan titik-titik *hotspot*. *Chill* ini tetap dipertahankan dengan mempertimbangkan kekuatan lebih yang akan dihasilkan pada benda cor sebagai tempat pemegang *alternator*.

Tabel 4-6. Susunan *Chill* pada *Casting Design A*.

No	Bentuk	Dia.	P	L	T	Jml
1.	Rod	20			20	4
2.	Rod	12			15	2
3.	Rod	15			15	1
4.	Rod	15			15	2
5.	Rod	25			20	2
6.	Rod	35			40	2
7.	Rod	25			20	2
8.	Rod	20			15	2
9.	Plat		50	25	10	2
10.	Plat		50	20	10	2
11.	Plat		40	10	5	1
12.	Rod	20			15	4
13.	Rod	12			10	2
15.	Rod	8			60	1
16.	Rod	20			15	2
17.	Rod	15			20	1

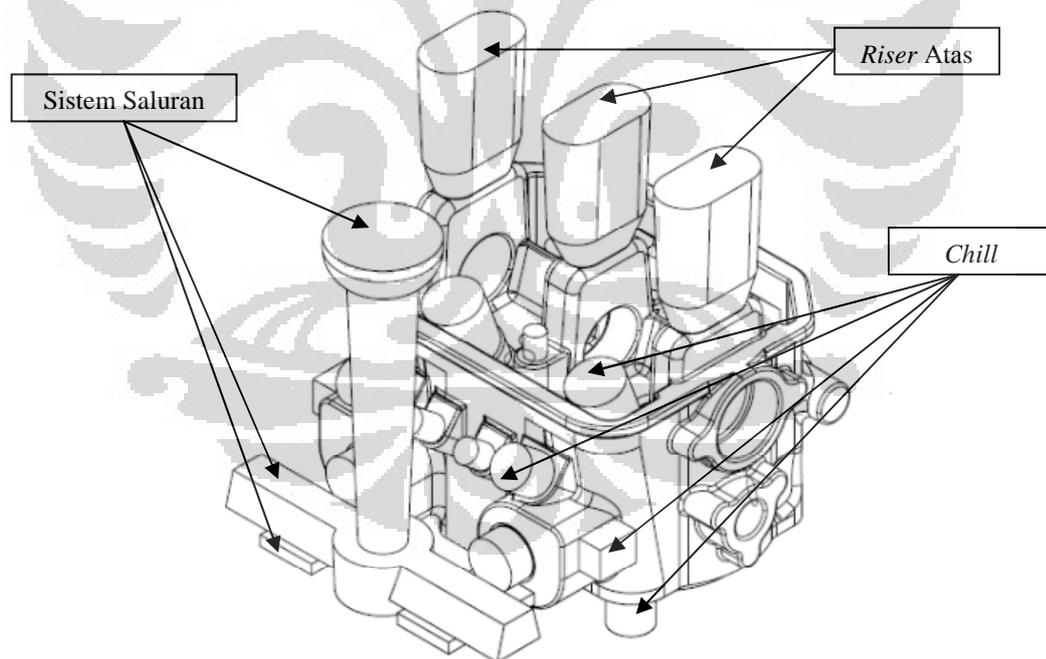
Sistem saluran yang dihasilkan memiliki rasio saluran 1 : 1,24 : 1,05. Dengan rasio tersebut maka waktu tuang 9 detik dicapai sebagai waktu tuang ideal. Dimensi penampang saluran ini kemudian digambarkan dan dirangkai menjadi *casting design* modifikasi A. Dari hasil gambar ini dapat pula diprediksi besarnya *yield* seperti pada **Tabel 4-7** yaitu sebesar 63,01%.

Tabel 4-7. *Casting design A* tanpa pemasangan *chill* dan *yield*-nya.

Komponen	Berat, kg
<i>Cylinder Head</i>	5,501
<i>Riser Atas</i>	1,385
<i>Riser Samping</i>	0,561
Saluran	1,239
Ventilasi	0,043
Tuangan	8,730
Yield, %	63,01

4.2.1.2 Casting Design B

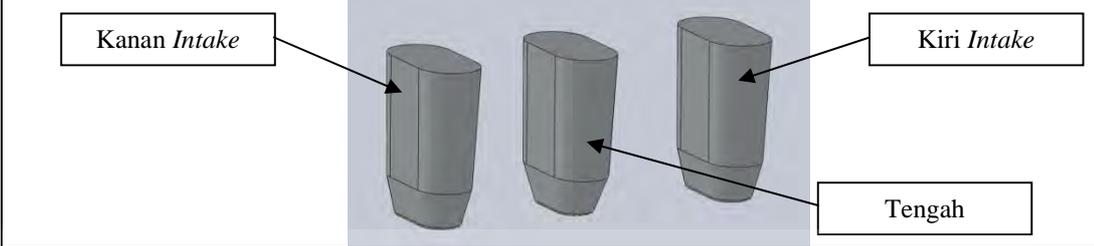
Pada *casting design* ini diperoleh hasil akhir seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4-8**. Desain ini berusaha untuk menghilangkan penggunaan *riser* samping sehingga akan dapat dicapai *yield* yang lebih tinggi. Keberadaan *riser* samping yang dihilangkan dan dikompensasikan dengan menggunakan *chill* pada daerah *intake*.

**Gambar 4-8.** *Casting Design B* terakhir.

Desain *riser* atas terakhir pada **Tabel 4-8** ini memiliki besar hanya 24,07% dari pada desain *riser* awal untuk sebelah kanan dan kiri *intake*. *Riser* tengah memiliki

besar 36,99% dari pada desain *riser* awal yang memang lebih kecil dari *riser* kanan dan kiri *intake*.

Tabel 4-8. Desain *riser* atas terakhir.



	Kanan <i>Intake</i>	Tengah	Kiri <i>Intake</i>
Volume, mm ³	126.991,46	124.860,14	126.991,46
Luas Area, mm ²	15.088,11	14.834,73	15.088,11
Modulus <i>Riser</i>	8,42	8,42	8,42
Massa, kg	0,352	0,346	0,352

Susunan *chill* yang ditetapkan pada *Casting Design B* setelah melewati tahapan simulasi sangat berbeda jauh dengan yang telah ditetapkan pada *Casting Design Awal* dengan rincian pada **Tabel 4-9**. Susunan ini menunjukkan jumlah titik-titik *hotspot* yang paling sedikit dari simulasi yang telah dilakukan. Dengan tidak digunakannya *riser* samping maka modifikasi dilakukan dengan mengoptimalkan penggunaan *chill* pada bagian yang tebal dan yang digunakan sebagai tempat *riser* samping pada desain awal yaitu daerah saluran *intake*.

Tabel 4-9. Susunan *Chill* pada *Casting Design B*.

No	Bentuk	Dia.	P	L	T	Jml
1.	Rod	25			20	2
2.	Rod	20			15	2
3.	Rod	20			20	2
4.	Plat		50	10	10	1
5.	Rod	10			50	2
6.	Rod	25			20	1
7.	Rod	15			15	1
8.	Rod	15			20	1
9.	Rod	25			30	1
10.	Plat		25	20	15	1
11.	Plat		25	20	20	1
12.	Rod	20			15	4
13.	Rod	32			35	2
14.	Rod	20			35	1
15.	Rod	12			15	1
16.	Rod	12			20	1
17.	Plat		40	15	10	1

Sistem saluran yang dihasilkan memiliki rasio saluran 1 : 1,62 : 0,82. Dengan rasio tersebut maka waktu tuang 11 detik sebagai waktu tuang ideal. Dimensi penampang saluran ini kemudian digambarkan dan dirangkai menjadi *casting design* modifikasi B. Dari hasil gambar ini dapat pula diprediksi besarnya *yield* seperti pada **Tabel 4-10** yaitu sebesar 73,47%

Tabel 4-10. *Casting Design B* prediksi *yield*-nya.

Komponen	Berat, kg
<i>Cylinder Head</i>	5,501
<i>Riser Atas</i>	1,049
Saluran	0,937
Tuangan	7,487
Yield, %	73,47

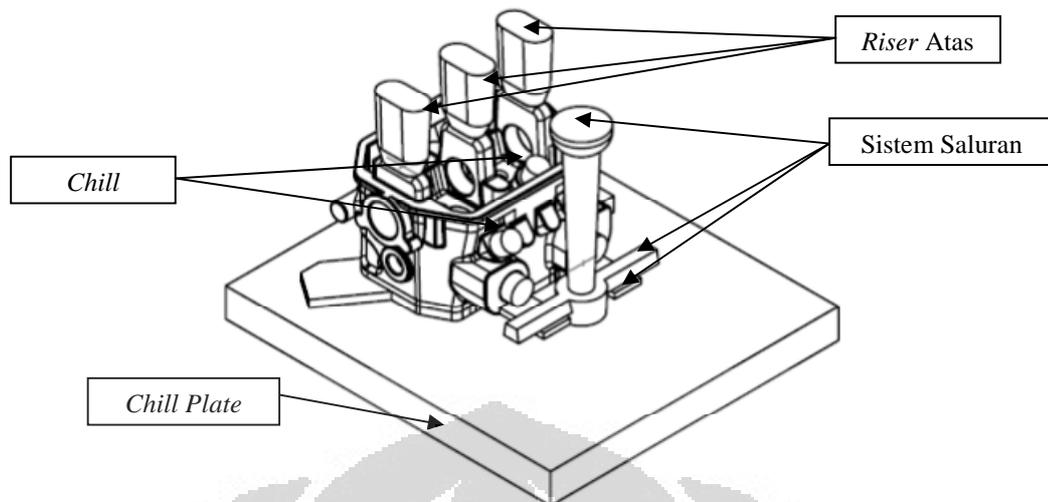
4.2.2 Modifikasi dengan Penggunaan “*Chill Plate*”

Penggunaan utama dari “*chill plate*” adalah sebagai langkah perbaikan terhadap produk cor sebelumnya dimana:

- Volume dari *cylinder head dome* berbeda-beda pada setiap produk cor (*cylinder head*) yang sama.
- Perbaikan sifat mekanis khususnya pada daerah *dome* dari *cylinder head* sehingga diharapkan tidak hanya peningkatan *yield* hingga lebih dari 50%.

4.2.3.1 *Casting Design C*

Pada *casting design* ini diperoleh hasil akhir seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4-9**. Desain ini diharapkan dapat menggantikan cetakan pasir bawah sehingga dalam produksinya nanti bisa dilakukan penghematan biaya produksi.



Gambar 4-9. *Casting Design C* terakhir.

Desain *riser* atas terakhir pada **Tabel 4-11** ini memiliki besar hanya 24,07% dari pada desain *riser* awal untuk sebelah kanan dan kiri *intake*. *Riser* tengah memiliki besar 36,99% dari pada desain *riser* awal yang memang lebih kecil dari *riser* kanan dan kiri *intake*.

Tabel 4-11. Desain *riser* atas terakhir.

	Kanan Intake	Tengah	Kiri Intake
Volume, mm ³	126.991,46	124.860,14	126.991,46
Luas Area, mm ²	15.088,11	14.834,73	15.088,11
Modulus <i>Riser</i>	8,42	8,42	8,42
Massa, kg	0,352	0,346	0,352

Susunan *chill* pada **Tabel 4-12** yang ditetapkan pada *Casting Design C* setelah melewati tahapan simulasi sangat berbeda jauh dengan yang telah ditetapkan pada *Casting Design Awal*. Susunan ini menunjukkan jumlah titik-titik *hotspot* yang paling sedikit dari simulasi yang telah dilakukan. Tidak digunakannya *riser* samping pada desain ini karena tidak munculnya cacat pada bagian tengah ke bawah akibat dari penggunaan “*chill plate*”.

Tabel 4-12. Susunan *Chill* pada *Casting Design C*.

No	Bentuk	Dia.	L	P	T	Jml
1.	Rod	25			20	2
2.	Plate	20			20	1
3.	Rod	25			20	1
4.	Chill Plate					1

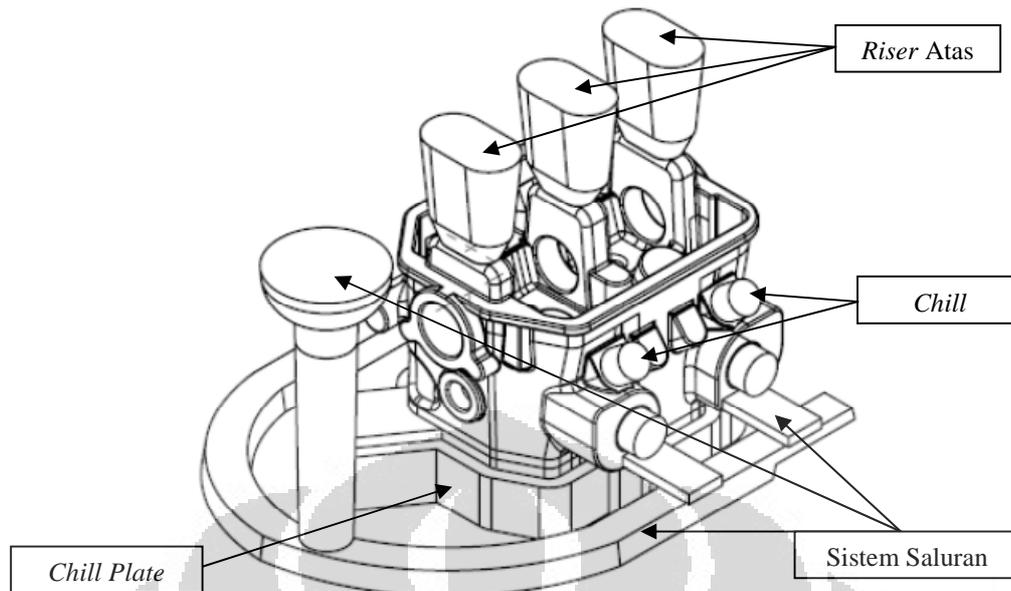
Sistem saluran yang dihasilkan memiliki rasio saluran 1 : 0,79 : 0,76. Dengan rasio tersebut maka waktu tuang 11 detik sebagai waktu tuang ideal. Dimensi penampang saluran ini kemudian digambarkan dan dirangkai menjadi *casting design* modifikasi C. Dari hasil gambar ini dapat pula diprediksi besarnya *yield* seperti pada **Tabel 4-13** yaitu sebesar 74,23%.

Tabel 4-13. *Casting design C* perkiraan *yield*-nya.

Komponen	Berat, kg
<i>Cylinder Head</i>	5,501
<i>Riser Atas</i>	1,049
Saluran	0,861
Tuangan	7,411
Yield, %	74,23

4.2.3.2 *Casting Design D*

Pada *casting design* ini diperoleh hasil akhir seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4-10**. Desain ini berusaha untuk menghantarkan cairan aluminium secepatnya ke dalam rongga cetakan dan menjaga distribusi temperatur relatif homogen ketika proses penuangan selesai. Kondisi ini diperlukan untuk menghasilkan proses pembekuan yang lebih seragam khususnya pada bagian bawah dan secara keseluruhan bagian *cylinder head*.



Gambar 4-10. *Casting Design D terakhir.*

Desain *riser* terakhir ini memiliki besar dimensi yang sama dengan *riser* atas pada *Casting Design A* yang dirinci pada **Tabel 4-14**. Volume *riser* ini hanya 32,05% dari pada desain *riser* awal untuk sebelah kanan dan kiri *intake*. *Riser* tengah memiliki besar 47,93% dari pada desain *riser* awal yang memang lebih kecil dari *riser* kanan dan kiri *intake*.

Tabel 4-14. Desain *riser* atas terakhir.

	Kanan Intake	Tengah	Kiri Intake
Volume, mm ³	169.124,75	161.754,71	169.124,75
Luas Area, mm ²	17.921,96	17.363,34	17.921,96
Modulus <i>Riser</i>	9,44	9,32	9,44
Massa, kg	0,4685	0,4481	0,4685

Susunan *chill* yang ditetapkan pada *Casting Design D* setelah melewati tahapan simulasi sangat berbeda jauh dengan yang telah ditetapkan pada *casting design* awal yang dirinci pada **Tabel 4-15**. Susunan ini menunjukkan jumlah titik-titik *hotspot* yang paling sedikit dari simulasi yang telah dilakukan. Tidak

digunakannya *riser* samping pada desain ini karena tidak munculnya cacat pada bagian tengah ke bawah akibat dari penggunaan “*chill plate*”.

Tabel 4-15. Susunan *Chill* pada *Casting Design D*.

No	Bentuk	Dia.	L	P	T	Jml
1.	Rod	25			20	2
2.	Chill Plate					1

Sistem saluran yang dihasilkan memiliki rasio saluran 1 : 1,03 : 1. Dengan rasio tersebut maka waktu tuang 7 detik dicapai adalah waktu tuang ideal. Dari hasil gambar ini dapat pula diprediksi besarnya *yield* yang akan dihasilkan seperti pada **Tabel 4-16** yaitu sebesar 60,21%.

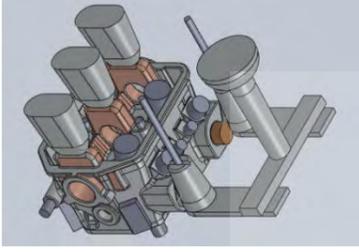
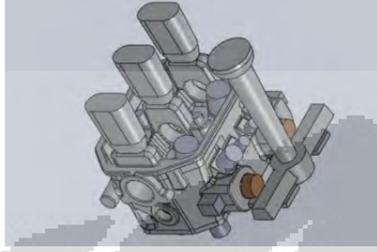
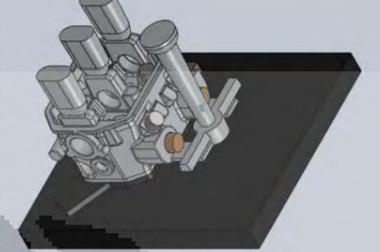
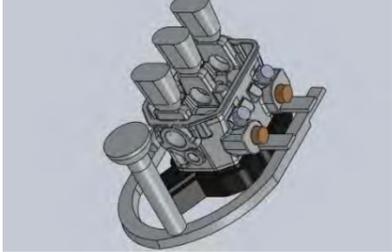
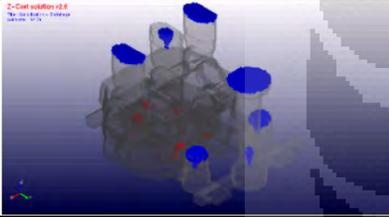
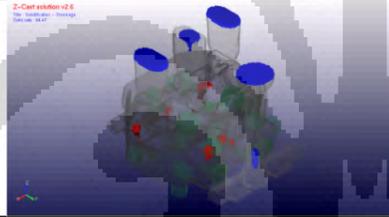
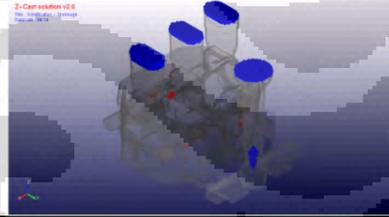
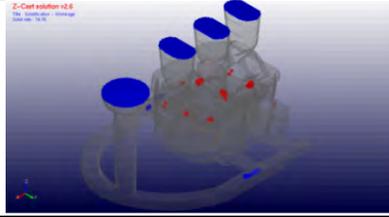
Tabel 4-16. *Casting Design D* perkiraan *yield*-nya.

Komponen	Berat, kg
<i>Cylinder Head</i>	5,501
<i>Riser Atas</i>	1,049
Saluran	2,250
Tuangan	9,136
Yield, %	60,21

Pemilihan Desain

Modifikasi *casting design* awal yang dimulai dengan membuat dua variasi dari setiap rencana modifikasi dilakukan dengan dua cara yaitu: (1) melalui perubahan posisi dan ukuran *chill* dan *riser*, dan (2) melalui penggunaan “*chill plate*” pada bagian bawah *cylinder head*. Dengan dua macam modifikasi tersebut maka terdapat empat macam modifikasi yang akan dipilih satu yang terbaik untuk setiap macam modifikasi yang akan dilanjutkan ke tahap eksperimen. Modifikasi yang terpilih ini masih bisa dioptimasi lagi hingga diperoleh hasil yang terbaik. Kriteria dalam pemilihan desain adalah kesesuaian *yield*, kehadiran *hotspot* yang minim dan kemungkinan tidak menyebabkan cacat yang berbahaya pada benda cor, kecepatan penuangan, dan kemudahan dalam pembuatannya.

Tabel 4-17. Perbandingan *Casting Design* melalui Perubahan Posisi dan Ukuran *Chill* dan *Riser* dan melalui Penggunaan “*Chill Plate*.”

Perbandingan	<i>Casting Design A</i>	<i>Casting Design B</i>	<i>Casting Design C</i>	<i>Casting Design D</i>
Desain				
$M_{\text{Riser Atas}}$	9,40	8,42	8,42	9,40
$M_{\text{Riser Samping}}$	7,67	-	-	-
$W_{\text{Riser Atas, kg}}$	1,385	1,049	1,049	1,385
$W_{\text{Riser Samping, kg}}$	0,561	-	-	-
$W_{\text{Vent, kg}}$	0,043	-	-	-
$W_{\text{Saluran, kg}}$	1,239	0,937	0,860	2,250
Rasio	1 : 1,24 : 1,05	1 : 1,62 : 0,82	1 : 1,07 : 1,03	1 : 1,24 : 1,05
Waktu tuang, dtk	9	11	11	7
Jumlah <i>Chill</i>	37	26	4	2
Jenis <i>Chill</i>	16	17	3	1
<i>Chill plate</i>	-	-	1 (63 kg)	1 (18 kg)
Yield, %	63,01	73,47	74,23	60,21
Hotspots				
	<i>Hotspot</i> terbentuk dalam ukuran yang lebih kecil dan menyebar pada daerah tengah sehingga kemungkinan tidak menyebabkan cacat yang berbahaya pada produk cor.	<i>Hotspot</i> terbentuk dalam ukuran yang cukup besar dan menyebar pada daerah tengah dan sisi dekat dinding sehingga kemungkinan menyebabkan cacat yang berbahaya pada produk cor.	<i>Hotspot</i> terbentuk dalam ukuran yang lebih kecil dan menyebar pada daerah atas sehingga kemungkinan tidak menyebabkan cacat yang berbahaya pada produk cor.	<i>Hotspot</i> terbentuk dalam ukuran yang sedikit lebih besar dan menyebar pada daerah atas sehingga kemungkinan tidak menyebabkan cacat yang berbahaya pada produk cor.
Kemudahan pembuatan	Sama dengan desain awal.	Sedikit lebih mudah dengan berkurangnya <i>chill</i> dan <i>riser</i> samping. Dimensi <i>chill</i> yang tidak seragam perlu ketelitian yang tinggi.	“ <i>Chill plate</i> ” yang terlalu besar menyulitkan penanganan cetakan. Proses pengecoran diperkirakan akan lebih sulit karena kandungan air dari cetakan pasir di atasnya akan membasahi “ <i>chill plate</i> ” dan menghasilkan gas saat penuangan.	“ <i>Chill plate</i> ” yang kecil akan lebih memudahkan penanganan cetakan. Proses pengecoran diperkirakan akan lebih mudah karena kandungan air dari cetakan pasir di atasnya tidak membasahi “ <i>chill plate</i> ” karena mengenai bagian cetakan dari pasir.

Penentuan modifikasi *casting design* dengan perubahan posisi dan ukuran *chill* dan *riser* lebih dikarenakan kehadiran *hotspot* yang minim seperti pada **Tabel 4-17**. *Yield* yang diperoleh dari kedua alternatif desain sudah memenuhi persyaratan dengan memenuhi kriteria lebih dari 50% yaitu 63,01% dan 73,47% untuk masing-masing *Casting Design* A dan B. Sementara, kemudahan pembuatan antara kedua alternatif ini sedikit mudah *Casting Design* B karena jumlah *chill* yang dipasang lebih sedikit namun jenisnya lebih banyak dan tidak perlu pembuatan *riser* samping. Namun kemunculan *hotspots* pada *Casting Design* A lebih kecil dan menyebar pada daerah yang aman dari pada *Casting Design* B. Selain itu, waktu tuang yang terlalu lama cenderung akan menghasilkan distribusi temperatur yang relatif tidak homogen sesaat setelah penuangan yang akan mempengaruhi proses pembekuan. Dengan demikian maka *Casting Design* A dipilih untuk memasuki tahap berikutnya.

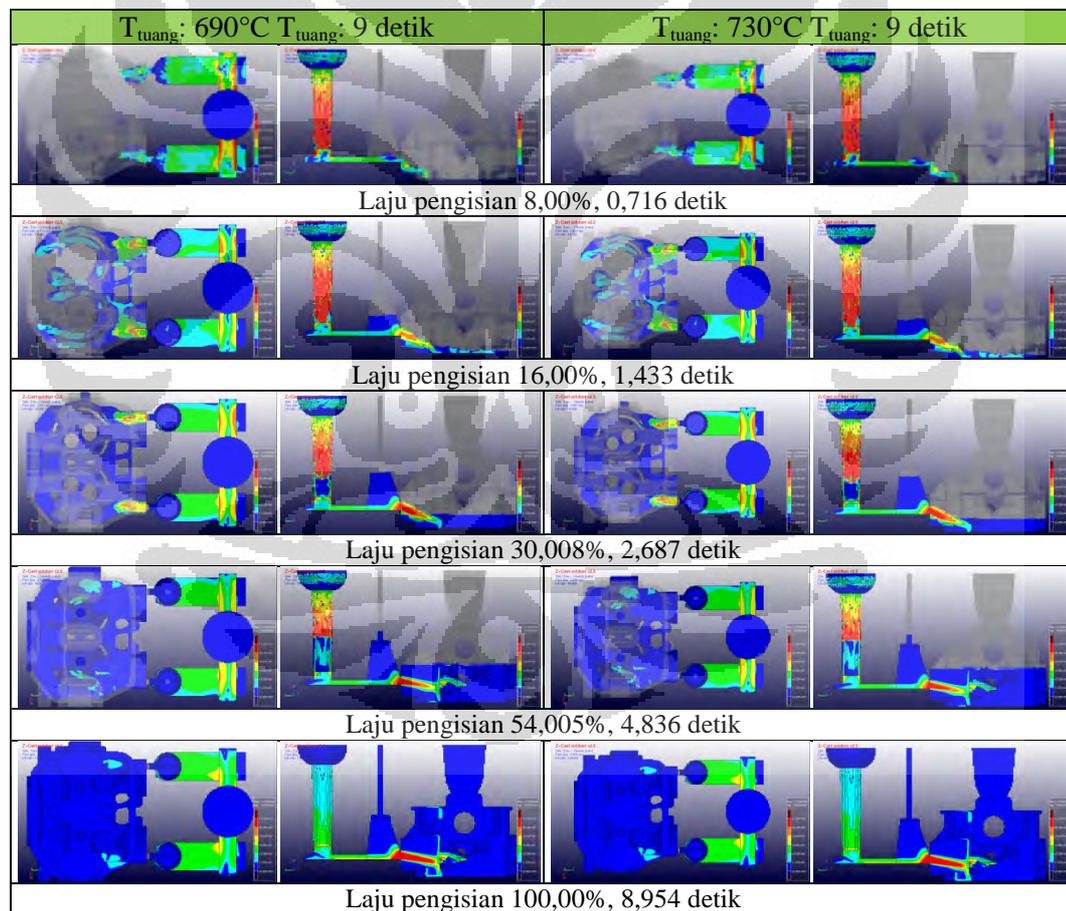
Penentuan modifikasi *casting design* dengan penggunaan “*chill plate*” lebih dikarenakan kemudahan dalam pembuatannya seperti pada **Tabel 4-17**. *Yield* yang diperoleh dari kedua alternatif desain sudah memenuhi persyaratan dengan memenuhi kriteria lebih dari 50% yaitu 74,23% dan 60,21% untuk masing-masing *Casting Design* C dan D. Sementara, kemunculan *hotspots* pada *Casting Design* C lebih kecil dari pada *Casting Design* D dan penyebaran *hotspots* pada kedua alternatif desain masih pada daerah yang aman sehingga mengurangi kemungkinan cacat pada produk coranya. Namun dari kemudahan pembuatan antara kedua alternatif ini *Casting Design* D lebih mudah karena berat “*chill plate*” yang lebih ringan sehingga memudahkan penanganan cetakan. Biaya untuk menyiapkan “*chill plate*” *Casting Design* D juga akan lebih murah karena beratnya yang ringan.

Kemudahan pembuatannya diperkirakan akan ditemui ketika proses pengecoran dilakukan. Proses pengecoran diperkirakan dapat lebih aman karena kandungan air dari cetakan pasir tidak akan membasahi “*chill plate*.” Kandungan air ini akan diserap oleh cetakan pasir yang mengelilinginya. Kandungan air dari cetakan pasir ini perlu mendapatkan penanganan khusus sehingga tidak mempengaruhi kualitas

produk cor baik melalui SOP yang telah ada maupun melalui SOP yang telah dikembangkan. Selain itu, waktu tuang yang terlalu lama pada *Casting Design C* cenderung akan menghasilkan distribusi temperatur yang relatif tidak homogen yang akan mempengaruhi pembentukan *hotspots* saat proses pembekuan. Dengan demikian maka *Casting Design D* dipilih untuk memasuki tahap berikutnya.

4.2.3.3 Simulasi *Casting Design A*

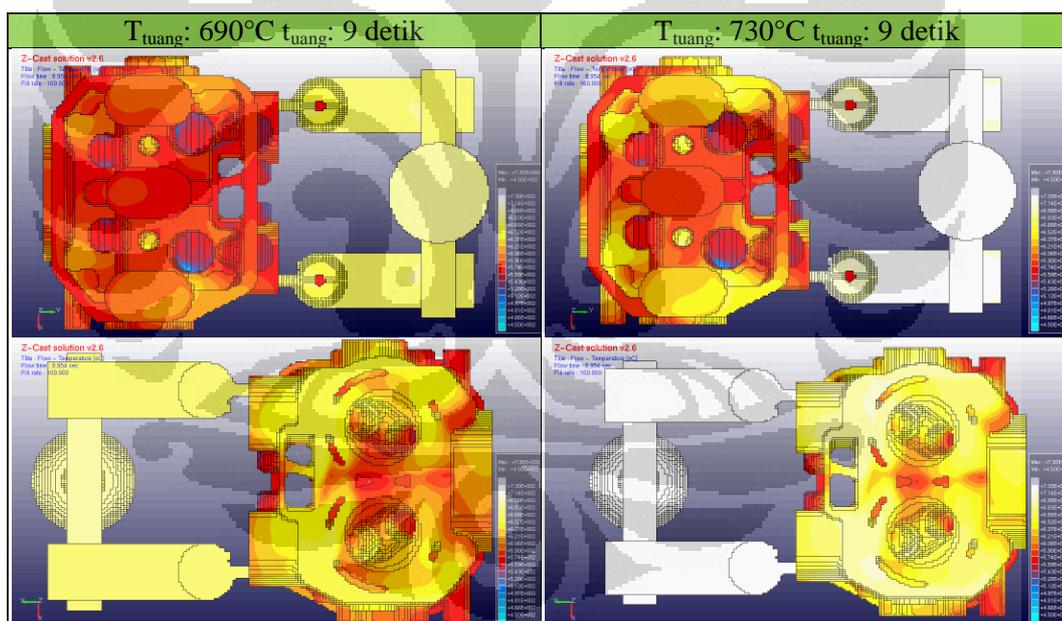
Simulasi *casting design* ini dilakukan dengan menggunakan parameter yang diperoleh dari pra-simulasi. Waktu tuang ditetapkan sesuai dengan desain idealnya pada 9 detik sehingga tidak melebihi kecepatan kritisnya. *Casting design* yang digunakan dalam simulasi ini adalah desain yang sama dengan eksperimen pengecoran.



Gambar 4-11. Simulasi kecepatan penuangan pada *Casting Design A*.

Dalam simulasi kecepatan penuangan pada temperatur tuang 690°C dan 730°C yang ditunjukkan pada **Gambar 4-11**. Perbedaan temperatur tuang tidak

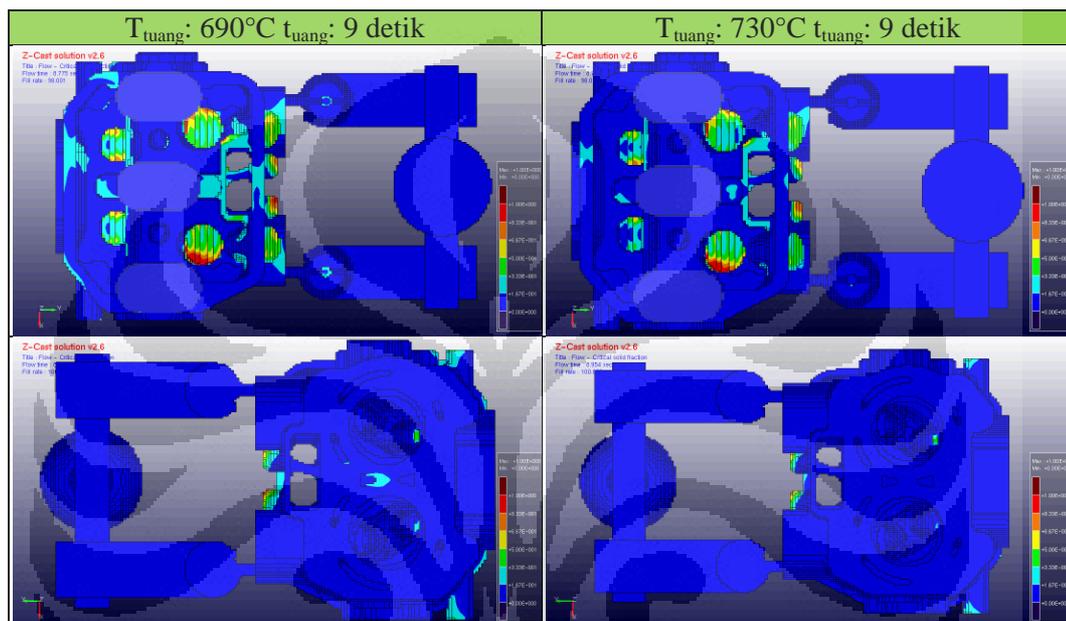
memberikan perbedaan yang signifikan terhadap perilaku kecepatan aliran. Pada simulasi ini juga terlihat bahwa jarak tempuh cairan memasuki rongga cetakan relatif sama yang terlihat jelas pada laju pengisian 8,00%. Kecepatan aliran pada *ingate* hingga memasuki rongga cetakan pada tahap ini masih di bawah kecepatan kritisnya yang dibatasi dengan warna kuning. Secara bertahap, dengan semakin meningkatnya laju pengisian, kecepatan aliran pada *ingate* dan rongga cetakan cenderung tetap di bawah kecepatan kritisnya. Namun kecepatan aliran saat memasuki rongga cetakan telah melebihi kecepatan kritisnya. Kondisi ini diakibatkan dari lebih kecilnya luas penampang leher *riser* dibandingkan dengan luas penampang *ingate*. Kecepatan aliran yang lebih tinggi dari kecepatan kritisnya ini menghantam inti *water jacket* secara langsung. Kondisi ini mungkin menyebabkan terjadinya kerusakan pada inti *water jacket* seperti terjadinya erosi dan patahnya bagian inti yang dapat menyebabkan cacat pada produk *cylinder head*.



Gambar 4-12. Distribusi temperatur setelah penuangan tampak atas dan tampak bawah.

Pada akhir penuangan distribusi temperatur pada *cylinder head* pada **Gambar 4-12** relatif lebih homogen pada sisi kiri dan kanannya dibandingkan dengan *Casting Design Awal*. Distribusi ini terkait dengan perilaku aliran cairan yang memasuki rongga cetakan dimana aliran memiliki jarak tempuh yang relatif sama pada sisi kiri dan kanannya. Lamanya waktu yang dibutuhkan untuk mengisi

rongga cetakan juga berpengaruh meningkatkan desain awal memerlukan waktu yang relatif lebih lama untuk mengisi *riser* yang besar. Distribusi temperatur yang lebih rendah terkonsentrasi di tengah karena aliran memasuki rongga dari sisi kiri dan kanan. Daerah sisi kanan dan kiri selalu menerima cairan dengan temperatur lebih tinggi sehingga cenderung untuk tetap mempertahankan temperaturnya yang relatif lebih tinggi.

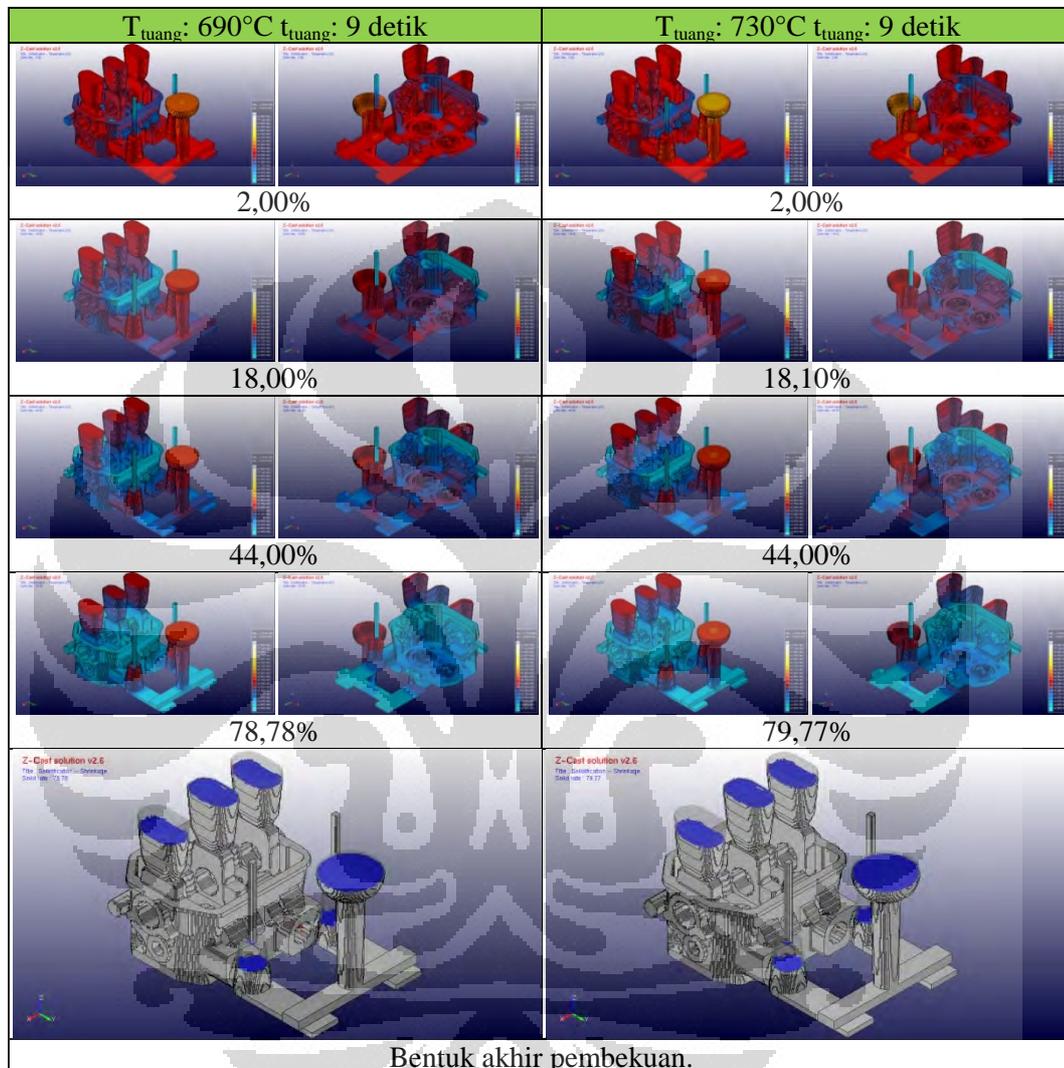


Gambar 4-13. Distribusi fraksi padatan setelah penuangan.

Daerah yang akan mengalami pembekuan terlebih dahulu ini dapat diamati dengan melihat fraksi padatan yang terbentuk pada **Gambar 4-13**. Fraksi padatan yang terbentuk jumlahnya lebih banyak pada temperatur tuang yang lebih rendah karena laju pembekuannya lebih tinggi. Daerah tengah pada bagian atas dengan temperatur yang lebih rendah akan membeku terlebih dahulu. Khususnya pada daerah yang sudah tidak mengalami pergerakan cairan dari aliran aluminium cair yang mengisi rongga. Keberadaan *chill* dan dinding yang tipis pada daerah ini akan mempercepat proses pembekuan.

Pada daerah bawah cenderung tidak dijumpai fraksi padatan karena pada daerah ini alirannya masih mengalami pergerakan. Keberadaan *chill* pada bagian bawah yang jika sempat membentuk fraksi padatan maka tidak bisa mempertahankan

fraksi padatan tersebut tetap di daerah bawah. Aliran cairan yang datang akan menghilangkan fraksi padatan yang sudah terbentuk tersebut kecuali alirannya lambat dan temperatur tuangnya rendah.



Gambar 4-14. Proses pembekuan *Casting Design A* dan bentuk akhir pembekuannya.

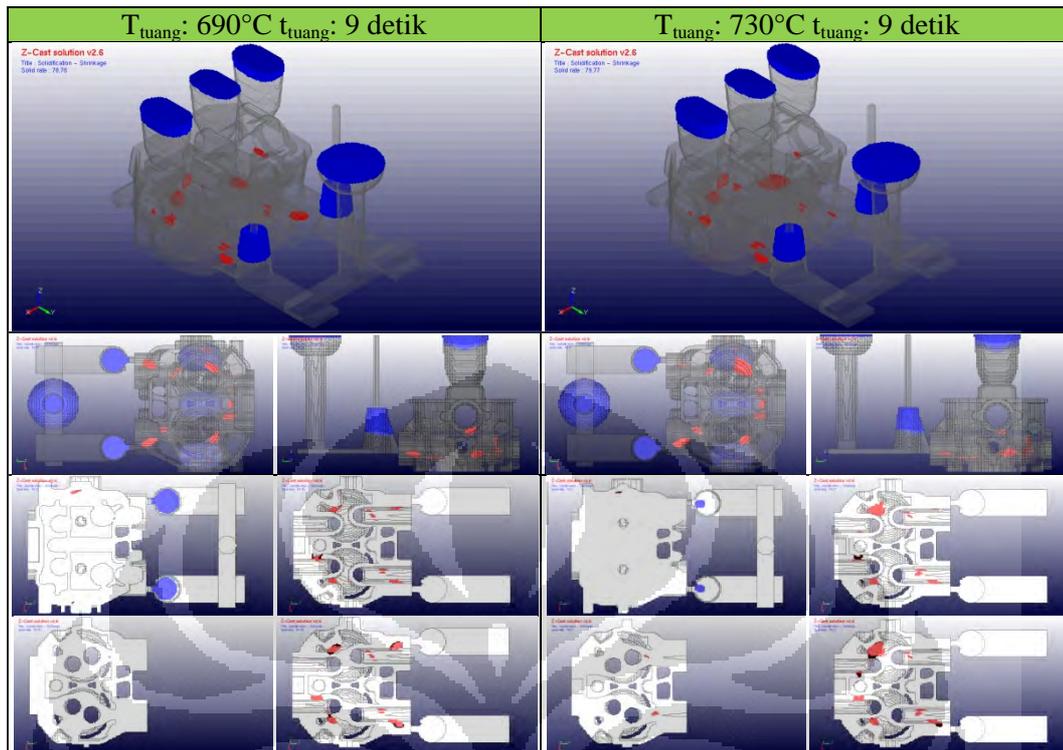
Ketika proses pembekuan dimulai yang ditunjukkan pada **Gambar 4-14**, pembekuan tidak hanya dimulai dari daerah tengah yang telah memiliki fraksi padatan saja. Dinding atas sebelah *intake* dan *exhaust* yang tipis dengan ketebalan sekitar 6 mm, tanpa adanya fraksi padatan ikut membeku hampir secara bersamaan dan terus bergerak ke arah permukaan bawah. Permukaan bawah yang merupakan bagian paling tebal dengan ketebalan 14,5 mm akan cenderung untuk

membeku terakhir. Pada bagian bawah *cylinder head* ini, khususnya bagian *dome*, merupakan bagian yang sangat kritis karena akan mengalami beban kerja *thermomechanical fatigue* dalam masa penggunaan nantinya [14]. Sifat mekanis yang tinggi dengan nilai SDAS yang kecil akan diperlukan pada bagian ini. Penggunaan cetakan dari pasir dengan karakterisasi pembekuan yang lambat akan kurang menghasilkan sifat mekanis yang lebih tinggi. Namun penambahan *grain refinement* di dalam cairan diharapkan dapat meningkatkan sifat mekanisnya.

Ketiga *riser* atas meski bentuknya lebih kecil dari desain awal dapat membeku paling terakhir dibandingkan dengan *cylinder head*. Efek dari pembekuan yang dimulai dari tengah menyebabkan *riser* atas bagian tengah relatif lebih dahulu membeku dibandingkan dengan *riser* atas sebelah kanan dan kiri. Akibatnya volume *riser* atas ini terlihat hanya berkurang sedikit sekali dan bahkan cenderung tidak efektif dibandingkan dengan volumenya. Volume *riser* atas yang paling efektif adalah pada sisi kiri *intake* dimana suplai cairan yang diberikan paling besar.

Kedua *riser* samping yang berada di dekat kedua lubang *intake* juga membeku terakhir. Volume kedua *riser* samping cukup efektif dimana dapat mensuplai cairan hampir setengah dari volumenya. Dengan kelima *riser* tersebut membeku belakangan yang sesuai dengan perhitungan modulusnya maka fungsinya sebagai tempat penampungan cairan dapat terpenuhi. Volume seluruh *riser* terlihat cukup untuk menyediakan cairan bagi *cylinder head* dengan posisinya tepat pada daerah yang membutuhkan.

Pengamatan titik-titik *hotspot* pada hasil simulasi **Gambar 4-15** menunjukkan bahwa cacat yang timbul ini berada pada bagian tengah. Bagian tengah ini meliputi bagian *water jacket*, lubang *intake* dan *exhaust*. Seperti halnya pada *Casting Design Awal*, cacat yang terbentuk muncul pada ketiga daerah yang sama.



Gambar 4-15. Simulasi pembekuan setelah simulasi penuangan dari *Casting Design A* menunjukkan titik-titik *hotspot*.

Daerah pertama berada pada bagian dalam *water jacket* yang merupakan pertemuan antara lubang busi, lubang *exhaust* dan *dome*. *Riser* yang berada di atasnya tidak cukup mensuplai cairan ke daerah ini. *Riser* atas kanan *intake* terlihat tidak terlalu banyak turunnya yang menandakan tidak banyak cairan yang disuplai ke bagian bawahnya. Hal ini disebabkan berbedanya bentuk geometris dari *cylinder head* antara sisi kanan dan kiri. Penyusutan yang terbentuk memang luas tetapi dangkal sehingga tidak membentuk lubang. Kondisi ini juga akibat dari ketebalan bagian ini yang cukup besar. Pada temperatur tuang yang lebih tinggi ditemukan cacat penyusutan yang lebih besar. Hal ini disebabkan temperatur tuang ini memiliki *liquid shrinkage* yang lebih besar sehingga daerah yang tidak bisa mendapat suplai cairan dari *riser* akan rawan membentuk penyusutan [40].

Daerah kedua dengan lokasi cacat yang mirip dengan *casting design* awal adalah pada daerah saluran *intake*. Cacat ini dangkal sehingga tidak membentuk lubang pada saluran *intake*. Cacat terlihat juga muncul pada daerah yang dekat *riser*

samping dengan kecenderungan menjadi lebih besar pada temperatur tuang yang lebih rendah. Kondisi ini dimungkinkan dari kurang sempurnanya dimensi dan posisi leher *riser* samping sehingga panas masih tertahan di ujung masuk lubang *intake*. Ukuran leher *riser* yang kecil juga dapat menyebabkan tertutupnya saluran untuk mensuplai cairan [56]. Meskipun demikian cacat ini tidak menyebabkan munculnya lubang yang dapat menyebabkan kebocoran.

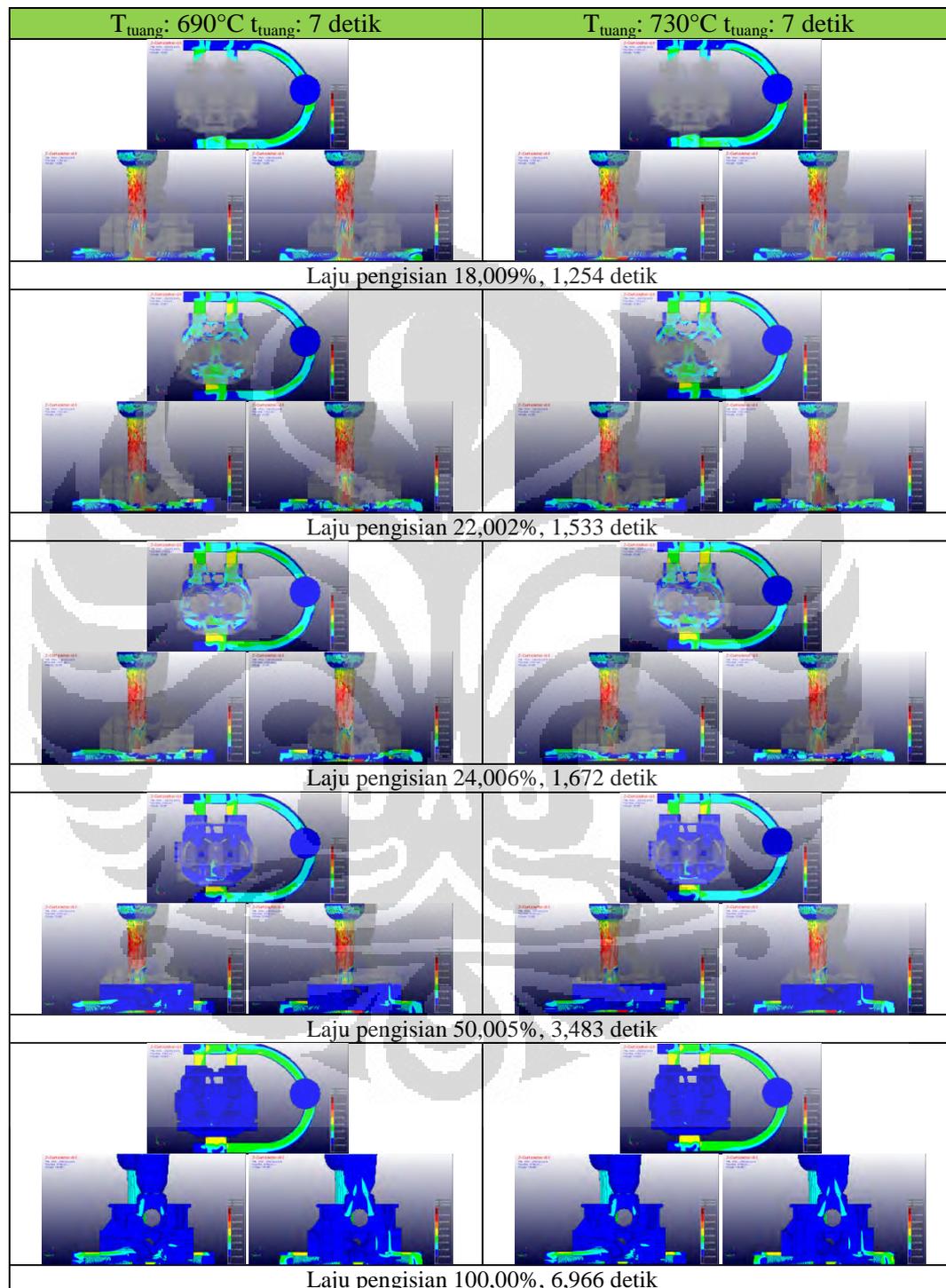
Daerah ketiga berada pada kedua lubang *exhaust* yang muncul pada sisi bagian tengah *cylinder head*. Cacat ini cukup besar dan dalam sehingga menyebabkan terjadinya lubang pada kedua saluran *exhaust*. Cacat ini muncul ketika *chill* No. 14 yang berada di atas daerah ini dihilangkan. *Chill* yang dihilangkan menyebabkan cacat tersebut bergeser ke sisi lain. Pada desain awal, cacat tidak terbentuk di sini dalam ukuran yang besar dan lebih terkonsentrasi di lubang baut yang berada di antara saluran *exhaust*.

4.2.3.4 Simulasi *Casting Design D*

Simulasi *casting design* ini dilakukan dengan menggunakan parameter yang diperoleh dari pra-simulasi. Waktu tuang ditetapkan sesuai dengan desain idealnya pada 7 detik sehingga tidak melebihi kecepatan kritisnya. *Casting design* yang digunakan dalam simulasi ini adalah desain yang sama dengan eksperimen pengecoran.

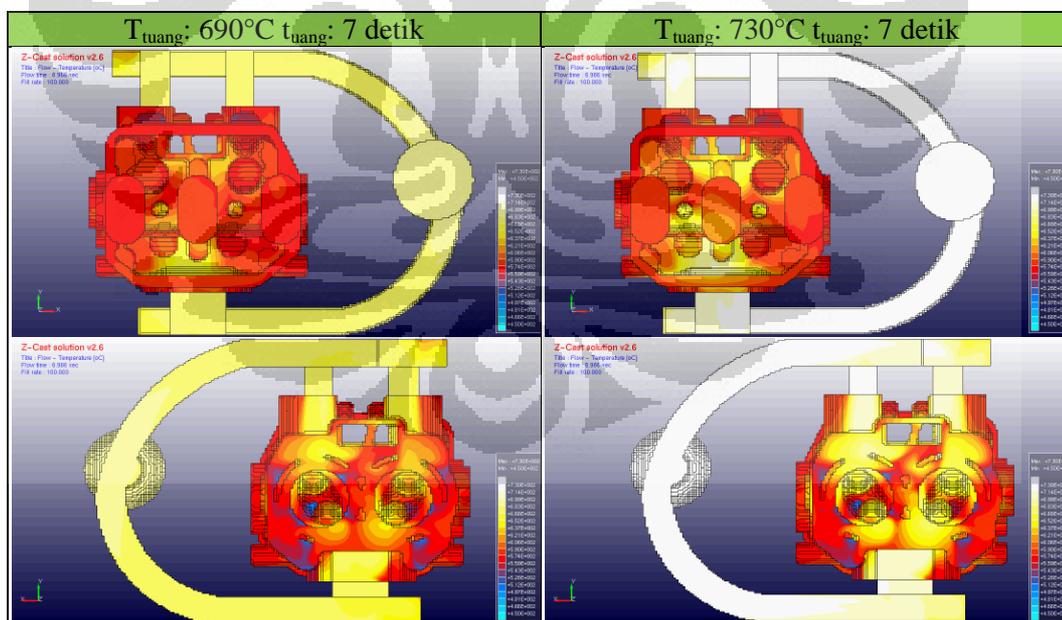
Dalam simulasi kecepatan penuangan pada temperatur tuang 690°C dan 730°C, perbedaan temperatur tuang tidak memberikan perbedaan yang signifikan terhadap perilaku kecepatan aliran seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4-16**. Pada simulasi ini juga terlihat bahwa jarak tempuh cairan memasuki rongga cetakan relatif sama yang terlihat jelas pada laju pengisian 18,009%. Kecepatan aliran pada *ingate* hingga memasuki rongga cetakan pada tahap ini masih di bawah kecepatan kritisnya yang dibatasi dengan warna kuning, jingga, dan merah. Secara bertahap, dengan semakin meningkatnya laju pengisian, kecepatan aliran pada *ingate* sebagian berada di atas kecepatan kritisnya. Sebagian aliran yang berada di atas kecepatan kritisnya berada pada dinding yang memantulkan aliran.

Namun kecepatan aliran yang melewati *ingate* dan memasuki rongga cetakan cenderung tetap di bawah kecepatan kritisnya.



Gambar 4-16. Simulasi kecepatan penuangan pada *Casting Design D*.

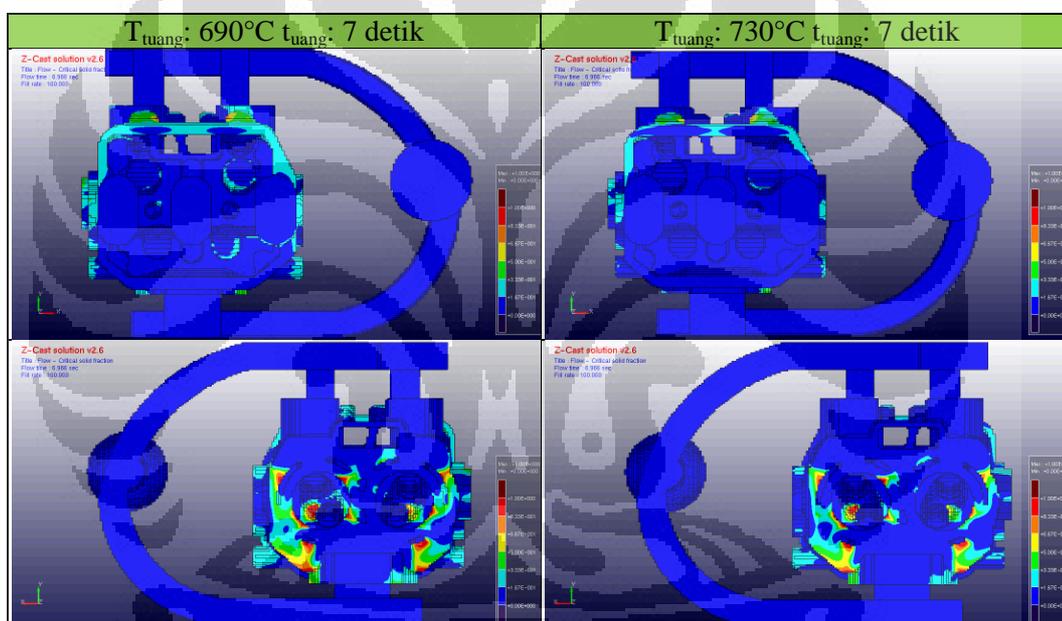
Pada akhir penuangan distribusi temperatur pada bagian atas *cylinder head* relatif lebih homogen dengan temperatur pada bagian tengahnya relatif lebih tinggi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4-17**. Distribusi ini terkait dengan perilaku aliran cairan yang memasuki rongga cetakan dimana aliran memiliki jarak tempuh yang relatif sama pada kedua sisi *intake* dan sisi *exhaust*. Relatif lebih tingginya temperatur pada bagian tengah dipengaruhi oleh *ingate* pada sisi *exhaust* yang digabung sehingga volume aliran yang panas cukup besar terkonsentrasi di sini. Pada bagian bawah, distribusi temperatur yang relatif lebih rendah berada pada dinding sisi kanan dan kiri yang dekat dengan dinding *exhaust*. Pada daerah ini aliran tidak dapat bergerak dengan leluasa karena aliran yang datang dari sisi kanan dan kiri *intake* terhambat oleh aliran dari sisi *exhaust*. Bentuk geometri *cylinder head* juga menyebabkan sisi kanan *intake* memiliki konsentrasi temperatur yang rendah lebih sedikit dari pada kiri *intake*. Kondisi ini dapat mempengaruhi pembentukan fraksi padatnya. Berbeda dengan *Casting Design A*, pada desain ini distribusi temperatur pada bagian bawah dan atas *cylinder head* relatif lebih sama.



Gambar 4-17. Distribusi temperatur setelah penuangan tampak atas dan tampak bawah pada *Casting Design D*.

Daerah yang akan mengalami pembekuan terlebih dahulu ini dapat diamati dengan melihat fraksi padatan yang terbentuk pada **Gambar 4-18**. Fraksi padatan

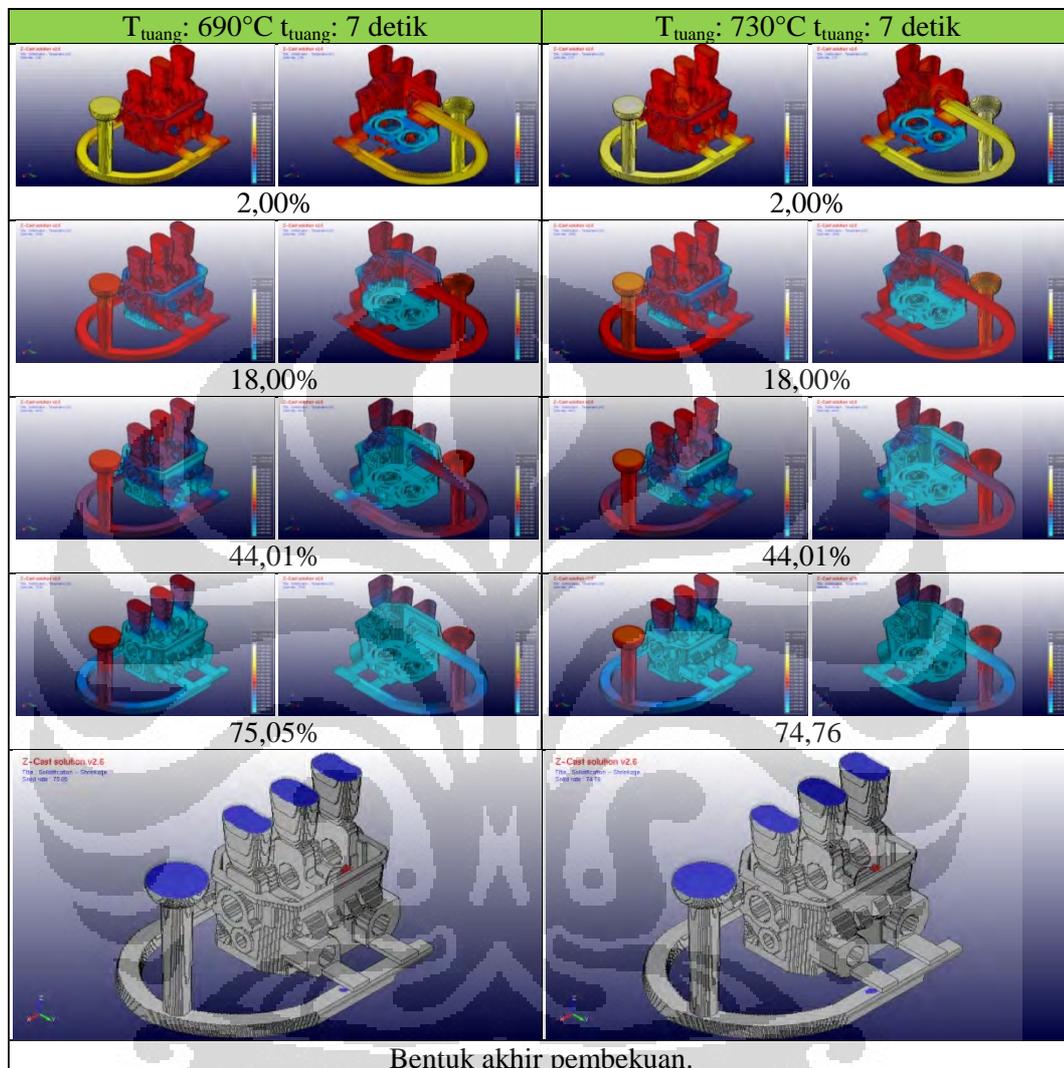
yang terbentuk jumlahnya lebih banyak pada temperatur tuang yang lebih rendah karena memiliki laju pembekuan yang lebih tinggi. Pada bagian atas, fraksi padatan terbentuk pada daerah dinding atas *intake* yang sudah tidak mengalami pergerakan akibat aliran cairan yang mengisi rongga. Keberadaan *chill* dan dinding yang tipis pada daerah ini akan mempercepat pembentukan fraksi padatan. Pada daerah bawah, fraksi padatan dapat terbentuk meski pada daerah ini alirannya masih mengalami pergerakan. Keberadaan “*chill plate*” pada bagian bawah menyebabkan fraksi padatan mudah terbentuk. “*Chill plate*” yang cukup besar ini memberikan kekuatan untuk mendinginkan cairan yang cukup besar meski cairan tersebut masih mengalir mengisi rongga cetakan.



Gambar 4-18. Distribusi fraksi padatan setelah penuangan tampak atas dan tampak bawah pada *Casting Design D*.

Ketika proses pembekuan dimulai yang ditunjukkan pada **Gambar 4-19**, perilaku pembekuan ini berbeda dari pada *Casting Design A*. Dinding atas sebelah *intake* dan *exhaust* yang tipis, 6 mm, tidak terlalu cepat membeku dibandingkan dengan permukaan bawahnya. Permukaan bawah ini merupakan bagian yang paling tebal dengan ketebalan 14,5 mm lebih cepat membeku karena adanya “*chill plate*”. Pada *cylinder head* bagian bawah ini, sifat mekanis yang tinggi dengan nilai SDAS yang kecil diperkirakan akan dapat terpenuhi. Dengan demikian pembekuan pada *Casting Design D* terarah dari permukaan bawah hingga ke atas

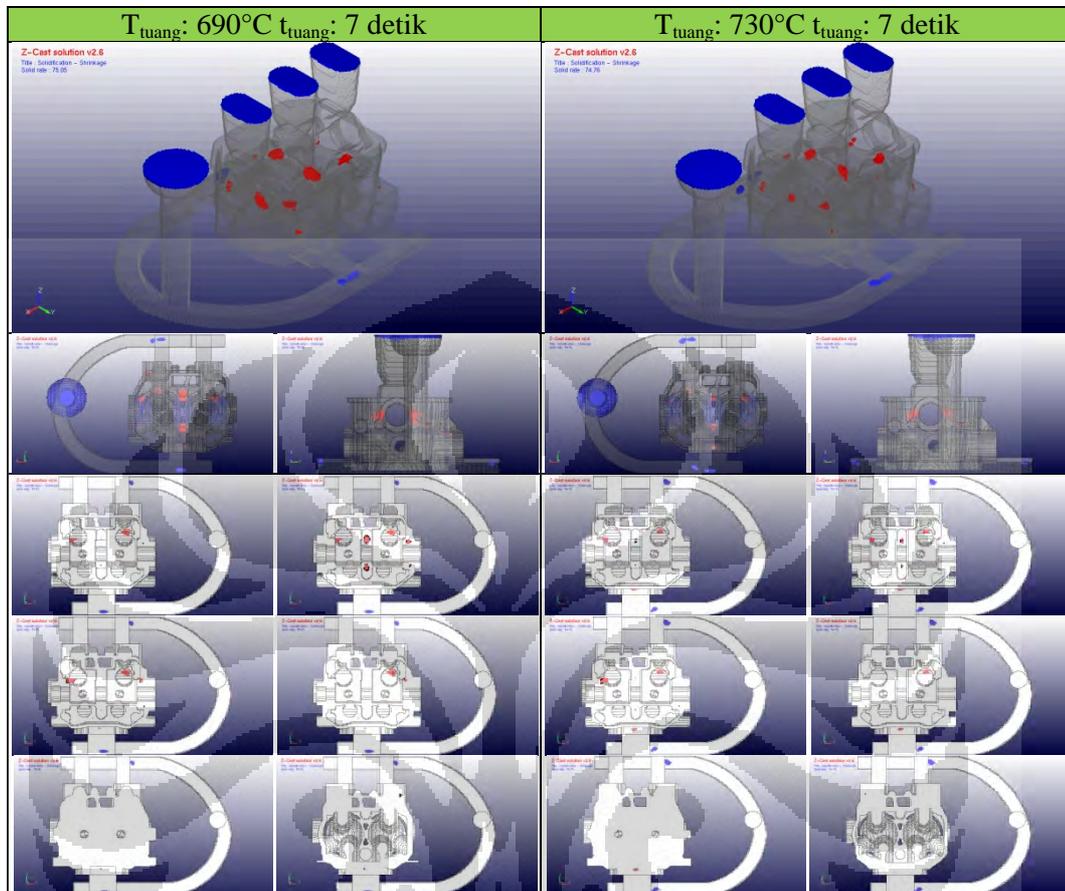
dan pada dinding atas bertemu pada kecepatan pembekuan yang hampir sama. Pembekuan ini diakhiri dengan pembekuan yang mengarah ke arah *riser* atas.



Gambar 4-19. Proses pembekuan *Casting Design D* dan bentuk akhir pembekuannya.

Ketiga *riser* atas dapat membeku paling terakhir dibandingkan dengan *cylinder head*. Distribusi temperatur dengan sisi kanan dan kiri memiliki temperatur yang lebih rendah menyebabkan *riser* kanan dan kiri cenderung untuk membeku terlebih dahulu. Volume ketiga *riser* atas terlihat hanya berkurang sedikit sekali dan bahkan cenderung tidak efektif dibandingkan dengan volumenya. Hal ini dipengaruhi oleh efek dari *chill* yang biasa digunakan untuk mengurangi volume *riser* yang diperlukan [46]. Volume seluruh *riser* terlihat lebih dari cukup untuk

menyediakan cairan bagi *cylinder head* dengan posisinya tepat pada daerah yang membutuhkan.



Gambar 4-20. Simulasi pembekuan setelah simulasi penuangan dari *Casting Design D* menunjukkan titik-titik *hotspot*.

Pengamatan titik-titik *hotspot* pada simulasi menunjukkan bahwa cacat yang timbul ini menyebar pada bagian atas. Bagian atas ini meliputi saluran *intake* dan *exhaust* sedikit di bagian atasnya hingga bagian tengah dudukan *camshaft*. Pada temperatur tuang yang lebih rendah, cacat-cacat tersebut terlihat lebih besar. Kondisi ini cenderung disebabkan karena *riser* tidak sempat mengisi ke bagian yang membutuhkan akibat dari ketiga dudukan *camshaft* telah membeku terlebih dahulu.

Daerah yang menunjukkan cacat pada dasarnya masih dapat memenuhi persyaratan karena tidak akan menyebabkan kebocoran. Daerah ini adalah pada kaki-kaki ketiga dudukan *camshaft* dimana di atasnya *riser* dipasang. Daerah

sebelah kiri *intake* cenderung memiliki cacat yang lebih besar. Daerah ini pada *Casting Design A* akan membutuhkan cairan yang disuplai lebih banyak dari pada bagian yang lain. Daerah tengah menunjukkan cacat pada lubang baut. Meski daerah ini pada awal pembekuan memiliki temperatur yang relatif tinggi, daerah ini juga membeku dengan kecepatan yang hampir sama dengan bagian kiri dan kanannya.

4.3 Eksperimen Pengecoran

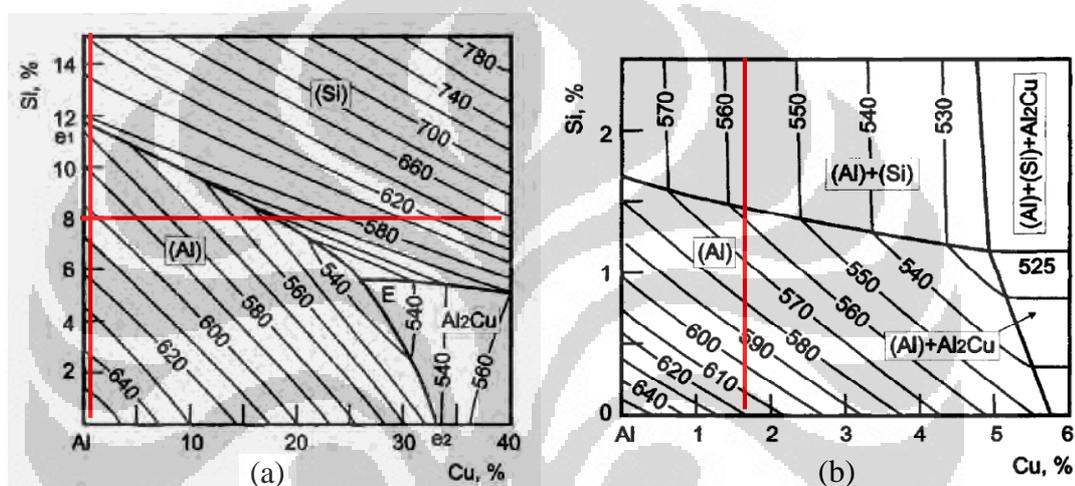
Proses pengecoran yang dilakukan dengan menggunakan ingot AC4B yang dibagi menjadi dua tahap, yaitu: Tahap I menggunakan ingot AC4B 100% tanpa ada penambahan unsur paduan lainnya. Tahap II menggunakan ingot AC4B 100% dengan penambahan Ti menggunakan GR 2815 sebanyak 0,11% menunjukkan komposisi kimia ingot AC4B pada **Tabel 4-18** berikut:

Tabel 4-18. Tabel komposisi kimia ingot AC4B, Pengecoran Tahap I dan Tahap II.

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn
AC4B JIS H5202	7,0- 10,0	≤1,0	2,0- 4,0	≤0,5	≤0,5	≤0,2	≤0,35	≤1,0	≤0,2	≤0,1
Ingot	7,866	0,642	1,689	0,214	0,439	0,017	0,072	0,441	0,027	0,011
Tahap I	8,085	0,782	1,777	0,223	0,314	0,019	0,074	0,421	0,028	0,010
Tahap II	7,990	0,846	1,698	0,219	0,232	0,020	0,068	0,430	0,147	0,010
Standar 328.0	7,5- 8,5	<1,0	1,0- 2,0	0,2- 0,6	0,2- 0,6	<0,35	<0,25	<1,5	0,25	-

Komposisi kimia ingot AC4B ini mengandung Cu yang lebih rendah dari standarnya. Nilai Cu yang lebih rendah ini dapat menurunkan kekuatan dan kekerasannya yang sesuai standar dari AC4B. Komposisi kimia ini menunjukkan kesesuaiannya dengan paduan aluminium seri 328.0 [30]. Paduan ini biasa dicor dengan menggunakan cetakan pasir dengan ketahanan retak panas dan fluiditasnya yang luar biasa. Kekerasan paduan ini dari proses pengecoran berkisar antara 45 – 75 HB dan dapat meningkat setelah T6 menjadi 65 – 95 HB. Nilai kekerasan ini dibandingkan dengan 333.0 masih relatif lebih rendah dimana 333.0 minimal memiliki kekerasan 90 HB setelah pengecoran dan 105 HB setelah T6.

Kadar Fe dari bentuk ingot hingga dilebur melalui Tahap I dan Tahap II menunjukkan peningkatan. Hal ini dimungkinkan akibat dari penggunaan pelapis baja pada tungku peleburannya. Panas yang terjadi selama peleburan aluminium menyebabkan unsur Fe ikut terlarut ke dalam cairan aluminium. Dengan semakin lamanya tungku tersebut digunakan maka akan semakin banyak pula unsur Fe yang terlarut. Kadar Mg berkelakuan sebaliknya dimana kadarnya semakin berkurang dari kadar awal di ingot. Titik lebur Mg yang lebih rendah dari Al menyebabkan Mg akan hilang terlebih dahulu dengan semakin lama dan tingginya temperatur cairan ketika peleburan.

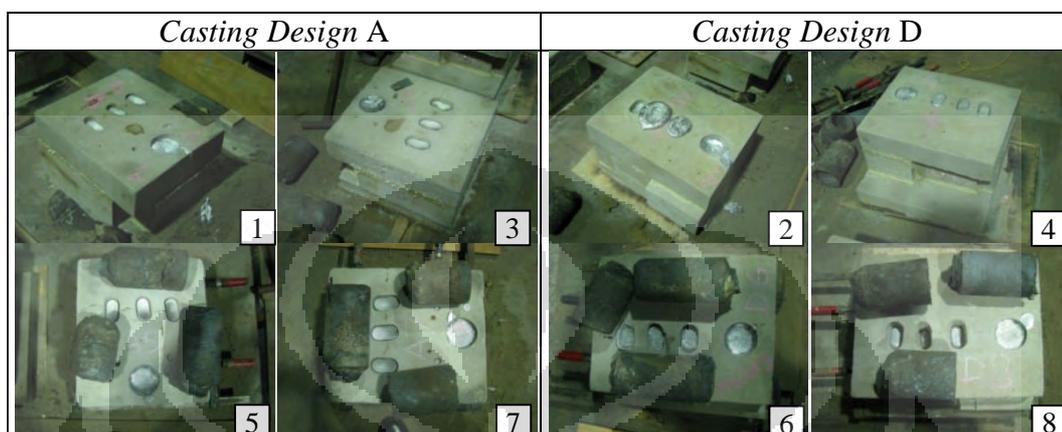


Gambar 4-21. Diagram tiga fasa Al-Si-Cu, (a) temperatur cair (*liquidus*), dan (b) temperatur padat (*solidus*). [41].

Berdasarkan kadar Si sekitar 8% dan Cu sekitar 1,7% rentang pembekuan paduan ini dapat diperkirakan dengan diagram tiga fasa Al-Si-Cu. Temperatur cair paduan ini ada pada temperatur sekitar 602°C dan temperatur padatnya pada temperatur sekitar 567°C. Sistem paduan ini memiliki rentang pembekuan sekitar 35°C yang berarti paduan ini memiliki rentang pembekuan yang pendek [46]. Rentang pembekuan yang pendek ini memberikan keuntungan dalam menghasilkan terjadinya pertumbuhan proses pembekuan yang searah. Dengan proses pembekuan yang searah, proses pembekuan dapat menghasilkan produk cor yang bebas penyusutan.

Penambahan Ti melalui GR 2815 lebih efektif dimana dengan jumlah yang hanya setengah dari Al5Ti1B dapat menghasilkan nilai penambahan Ti yang sama.

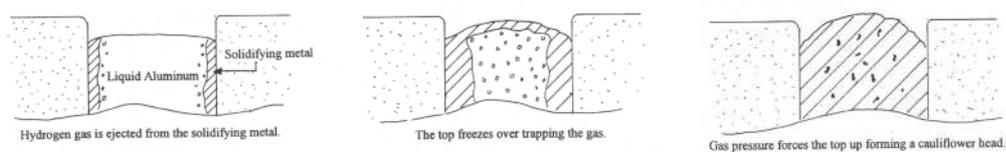
Penambahan Ti ke dalam cairan menunjukkan penambahan yang lebih besar dari target sebesar 0,11% yaitu sebesar 0,12%. Hal ini disebabkan dari perhitungan penambahan GR 2815 hanya berdasarkan jumlah material yang dilebur. Perhitungan bukan dibuat berdasarkan aluminium cair yang berkurang setelah *fluxing* dan menjadi *dross*.



Gambar 4-22. Hasil pengecoran setiap variasi sebelum pembongkaran cetakan.

Selama proses setelah pengecoran, *Casting Design A* memperlihatkan hasil yang baik seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4-22** No. 1, 3, 5, dan 7. Waktu tuang ideal 9 detik dapat dicapai untuk variasi No. 7. Variasi lainnya lebih lambat dimana No. 5 dapat dicapai dalam 10 detik sementara No. 1 dan 3 dapat dicapai dalam 15 detik. Dari keempat variasi ini kondisi cairan tenang tidak bergejolak sebagai tanda rendahnya kadar hidrogen dalam cairan.

Kondisi ini dapat juga dilihat dari permukaan atas *riser* dan *sprue* yang terlihat cekung berbeda dengan *Casting Design D* yang cembung [42,62]. Mekanisme yang terjadi pada *riser* ini melibatkan tiga tahap. Pada tahap pertama gas hidrogen dari dalam logam cair yang membeku dilepaskan ke logam cair yang belum membeku. Tahap kedua, ketika bagian atas *riser* membeku gas tersebut terperangkap di dalam *riser*. Tahap ketiga, tekanan gas yang terperangkap menyebabkan bagian atas *riser* membentuk cembung (*cauliflower head*).



Gambar 4-23. Mekanisme pembentukan riser yang cembung akibat adanya kandungan hidrogen di dalam aluminium cair [62].

Pengamatan berbeda dijumpai pada *Casting Design D* dimana menunjukkan hasil yang tidak baik. Waktu tuang untuk setiap variasinya tidak bisa memenuhi waktu tuang idealnya 7 detik. Waktu tuang dari setiap variasi adalah 14 detik untuk No. 6, 15 detik untuk No. 4, 21 detik untuk No. 2, dan 38 detik untuk No. 8. Waktu tuang No. 2 dan 8 terlalu lama terjadi karena ada permasalahan selama penuangan. Pada No. 2 terjadi gejala yang besar saat penuangan sehingga penuangan tidak bisa dilakukan dengan lebih cepat. Pada No. 8 terjadi kebocoran pada cetakan sehingga laju penuangan diperlambat dan secara paralel cetakan yang bocor tersebut ditutup.

Gejolak cairan terbesar terjadi pada No. 2 yang teramati pada ketiga *riser* hingga menyebabkan terjadinya tumpahan aluminium cair di atas *riser*. Gejala yang lebih kecil terjadi pada No. 6 yang teramati pada ketiga *riser*. Pada No. 2 dan 6, cetakan ini dipanaskan ulang jauh sebelum penuangan bersamaan dengan *Casting Design A* sehingga ada kemungkinan cetakan tersebut lembab akibat terbentuknya embun pada "*chill plate*." Embun ini diperkirakan terbentuk dari uap air yang dihasilkan ketika cetakan tersebut dipanaskan ulang. Uap air ini kemungkinan dihasilkan dari cetakan dan inti cetakan yang belum terlalu kering.

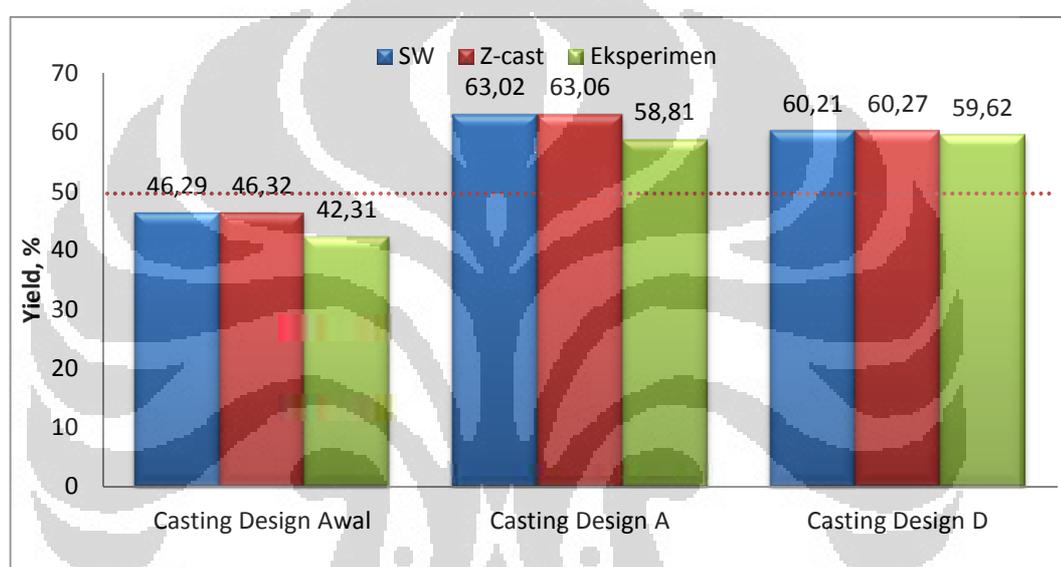
Gejolak yang kecil yang terjadi pada No. 4 yang teramati hanya pada satu *riser* yang dekat dengan *sprue*. Sementara No. 8 tidak teramati adanya gejala namun permukaan atas *riser* ini menunjukkan bentuk yang cembung. Bentuk cembung ini menandakan masih tingginya kadar hidrogen dalam cairan dan jumlahnya diperkirakan lebih sedikit dari tiga cetakan lainnya [38,62]. Berbeda dengan No. 2 dan 6, No. 4 dan 8 sempat dilakukan pemanasan ulang sebagai antisipasi terhadap kejadian yang muncul di No. 2 dan 6. Lamanya waktu pemanasan ulang No. 8 lebih lama dari pada No. 4 sehingga diperkirakan temperatur dalam cetakannya

Universitas Indonesia

masih relatif lebih panas dan embun yang terbentuk pada *chill plate*” masih sedikit.

4.4 Perhitungan Yield

Perhitungan *yield* terhadap perubahan *casting design* menunjukkan bahwa hasil modifikasi dapat mencapai target *yield* di atas 50% seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4-24**. Kenaikan *yield* hingga sekitar 16% dicapai pada *Casting Design A* dan sekitar 14 – 17% dicapai pada *Casting Design D*. Besarnya kenaikan *yield* ini dilakukan dengan menggunakan metode gambar model dan eksperimen.



Gambar 4-24. Perbaikan *yield* dari hasil modifikasi yang dihitung dengan berbagai metode.

Casting Design A berdasarkan perhitungan gambar model yang dihasilkan dari Solidworks® dan Z-cast® pada **Tabel 4-19**, menunjukkan nilai *yield* yang hampir sama yaitu masing-masing 63,02% dan 63,06%. Sementara berdasarkan hasil eksperimen menunjukkan angka yang lebih rendah sebesar 58,81%.

Perbedaan *yield* pada *casting design* ini antara gambar model dan eksperimen sekitar 4,23%. Begitu pula dengan yang terjadi pada *Casting Design D*. Perhitungan gambar model yang dihasilkan dari Solidworks® dan Z-cast®, **Tabel 4-19**, menunjukkan nilai *yield* yang hampir sama yaitu masing-masing 60,21% dan 60,27%. Sementara berdasarkan hasil eksperimen menunjukkan angka yang sedikit lebih rendah sebesar 59,62%. Perbedaan *yield* pada *casting design* ini

antara gambar model dan eksperimen sekitar 0,62%. Perhatian yang lebih mendalam terhadap *Casting Design D* perlu dilakukan karena nilai hasil eksperimen ini masih belum bisa dijadikan acuan. Eksperimen pengecoran yang belum berhasil dilakukan dengan baik menjadikan angka perhitungan *yiled* ini masih perlu dipertimbangkan.

Tabel 4-19. Rincian perhitungan dari *casting design* awal dan hasil modifikasi.

Desain	Casting Design 0			Casting Design A			Casting Design D		
	SW [®]	Z-cast [®]	Ekspe- rimen	SW [®]	Z-cast [®]	Ekspe- rimen	SW [®]	Z-cast [®]	Ekspe- rimen
Yield, %	46,29	46,32	42,31	63,02	63,06	58,81	60,21	60,27	59,62
Berat Cylinder Head, kg	5,501	5,501	5,500	5,501	5,501	5,500	5,501	5,501	5,500
Berat Tuangan, kg	11,883	11,874	13,000	8,729	8,722	9,353	9,136	9,127	9,225
Berat Riser, kg	5,644	5,638		1,946	1,943		1,385	1,383	
Berat Saluran, kg	0,699	0,696		1,239	1,236	2,925	2,250	2,243	3,063
Berat ventilasi, kg	0,040	0,039		0,043	0,043		0,000	0,000	0,000
Berat lain-lain, kg							0,927		0,663

Ket.: SW[®] : Solidworks

Perbedaan yang terjadi antara metode perhitungan gambar model dan eksperimen disebabkan oleh berat tuangan yang cukup berbeda. Berat tuangan yang lebih besar pada eksperimen dibandingkan dengan gambar model lebih disebabkan oleh timbulnya sirip-sirip pada *cylinder head* dan pada sistem saluran. Sirip-sirip yang timbul pada *cylinder head* pada dasarnya bisa dihilangkan saat pemesinan. Namun ini akan menambahkan waktu dan langkah dalam proses pemesinannya khususnya jika muncul pada daerah yang tidak mengalami pemesinan. Sirip-sirip yang timbul pada sistem saluran meski tidak mengganggu bentuk akhir *cylinder head* yang dihasilkan tapi perlu mendapat perhatian. Sirip-sirip ini timbul akibat dari kurang rapatnya potongan-potongan cetakan berhimpitan ketika dirangkai. Ketika potongan yang tidak rapat ini terdapat di sistem saluran maka akan dapat

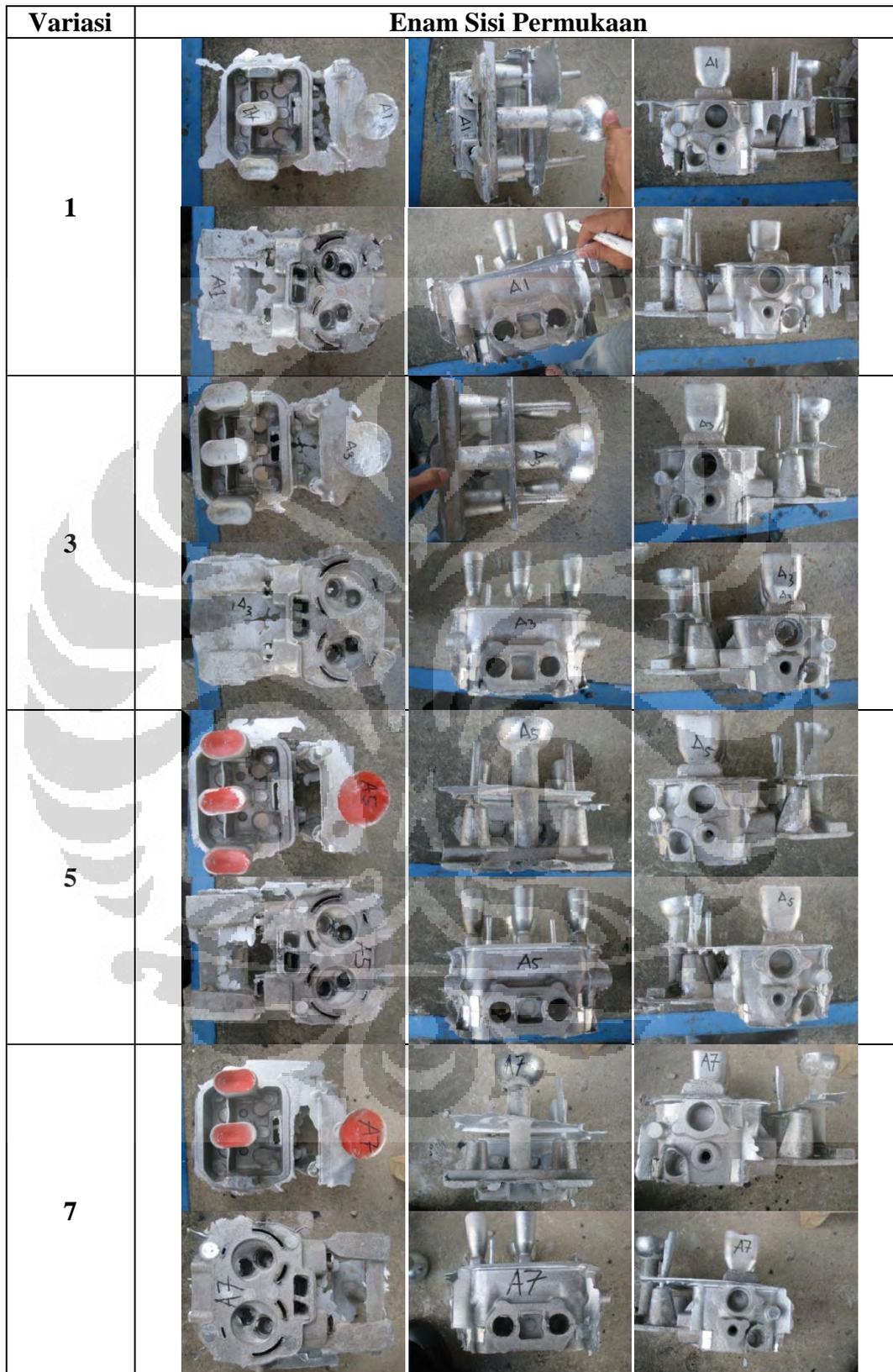
mengganggu sistem aliran dengan memberikan hambatan pada cairan yang mengalir. Sirip yang muncul ini bisa diatasi dengan memperbaiki kualitas pola cetakan dan proses pembuatan cetakan. Kualitas pola cetakan perlu ditingkatkan ketelitiannya terkait dengan jarak antara potongan cetakan lainnya. Kualitas pembuatan cetakan perlu diperbaiki dengan meningkatkan tingkat kepadatannya sehingga memberikan kekuatan yang lebih baik.

Faktor lain dapat disebabkan oleh membesarnya rongga cetakan, saluran, dan *riser* ketika dilakukan pelepasan pola cetakan dari cetakan pasir. Selain itu tingkat ketelitian dalam pembuatan pola kayu juga bisa menyebabkan terjadinya perbedaan dimensi. Apalagi jika faktor penyusutan tidak dipertimbangkan ke dalam pola kayu untuk saluran dan *riser*.

4.5 Pengujian Kualitas

4.6.1 Pengamatan Visual Bagian Luar

Pengamatan visual pada keenam sisi *Casting Design A* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4-25** terlihat bahwa permukaan luar secara umum terlihat baik. Tidak ditemukan cacat yang membahayakan seperti retakan. Cacat yang ditemukan adalah dalam kategori A – *Metallic projection* yang berupa sirip-sirip yang muncul pada sambungan cetakan.



Gambar 4-25. Pengamatan visual pada permukaan luar *Casting Design A*.

Pengamatan visual pada keenam sisi *Casting Design D* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4-26** terlihat bahwa permukaan luar secara umum terlihat tidak baik. Banyak cacat-cacat yang bisa teramati dengan jelas. Cacat sama yang juga ditemukan pada *Casting Design A* adalah dalam kategori A – *Metallic projection* berupa sirip-sirip yang muncul pada sambungan cetakan. Cacat lainnya yang teramati adalah dalam kategori B – *Cavities* berupa *blowholes* dan dalam kategori C – *Discontinuities* berupa *crack*.

Blowholes hingga menyebabkan berlubangnya dinding *cylinder head* teramati pada No. 2 yang cairannya bergejolak paling besar. Dinding *exhaust* yang berlubang ini hingga menyebabkan bagian atasnya berlubang pada bagian tengah. Kondisi ini juga diamati pada dinding sebelah kiri dan kanan pada No. 4 yang memiliki *blowholes*. Permukaan bawah *cylinder head* yang berhubungan langsung dengan “*chill plate*” terlihat dapat menyatu. Bagian ini tidak ditemukan cacat seperti terbentuknya sambungan dingin atau ada bagian yang tidak terisi meskipun temperatur tuangnya $690\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Tekstur permukaan yang kasar merupakan ciri khas dari cetakan pasir. Namun tingkat keahlian dari operator cetakan masih harus ditingkatkan sehingga permukaan benda cor dapat terlihat lebih baik. Hal ini teramati dari permukaan hasil coran khususnya pada bagian bawah *cylinder head* yang kasar pada kedua *casting design*. Selain itu, tingkat kepadatan pasir yang relatif rendah menyebabkan permukaan cetakan mudah untuk rontok akibat dilakukannya *preheating* pada cetakan yang telah dirangkai. Ketika cetakan pasir sudah dirangkai maka pasir yang telah jatuh dipermukaan bawah akan sulit untuk dibersihkan.

Variasi	Enam Sisi Permukaan		
2	 	 	 
4	 	 	 
6	 	 	 
8	 	 	 

Gambar 4-26. Pengamatan visual pada permukaan luar *Casting Design D*.

Di satu sisi pasir yang rontok akan membuat permukaan bawah kasar tetapi di sisi lain cetakan yang rontok dapat membuat bentuk benda menjadi tidak sesuai. Ketidaksiuaian bentuk benda akan dapat mengurangi bentuk cetakan untuk menghasilkan *cylinder head* sesuai fungsinya. Kondisi yang rawan apabila cetakan yang rontok dapat menyebabkan terbentuknya cacat pada benda cor. Permukaan bawah yang kasar pada dasarnya tidak terlalu bermasalah karena pada bagian ini masih akan dilakukan pemesinan sebesar 3 mm untuk mendapatkan produk akhir yang siap dirangkai menjadi mesin. Namun menghasilkan produk yang bersih dari rontok pasir menjadi penting untuk menjaga konsistensi kualitas produk yang dihasilkan.

4.6.2 Pengamatan Visual Bagian Dalam

Pengamatan visual bagian dalam dibantu dengan menggunakan kriteria Niyama yang dihasilkan dari proses simulasi. Kriteria Niyama diperoleh untuk setiap variasi *casting design* dan temperatur tuang. Batasan nilai kriteria Niyama sebesar 0,3 dibatasi dengan warna hijau pada legenda. Warna hijau ke bawah hingga biru tua menunjukkan daerah yang rentan mengalami cacat porositas. Sementara warna hijau ke atas menunjukkan daerah yang aman dari cacat porositas.

Casting Design A, 730°C

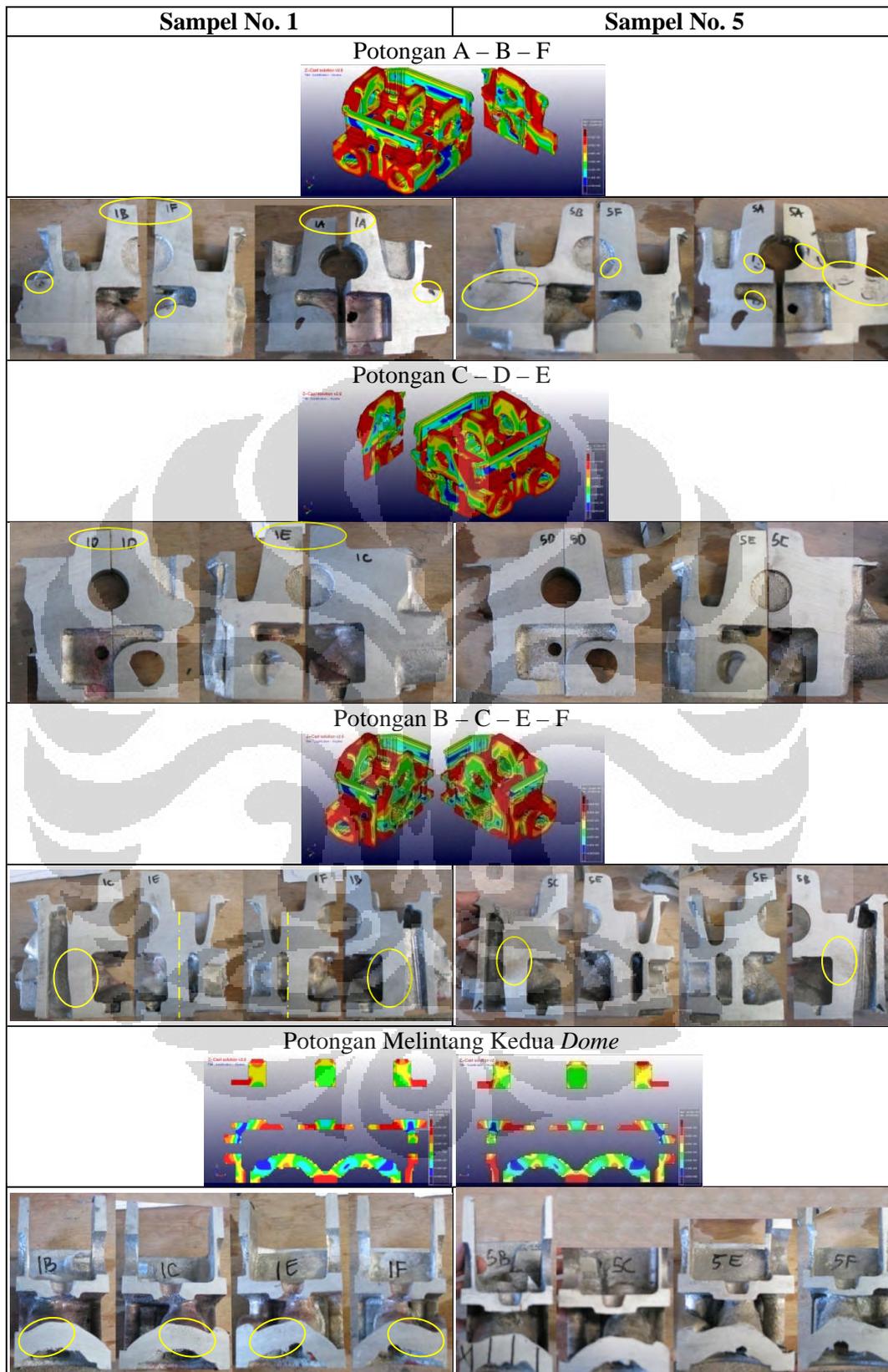
Pengamatan visual bagian dalam ini dapat dilihat pada **Gambar 4-27**. Pengamatan visual pada perpotongan A, B dan F menunjukkan daerah yang rawan terhadap porositas dan penyusutan adalah daerah dinding atas, daerah lubang dudukan *camshaft*, daerah bawah saluran *intake*, dan daerah atas *dome* dan busi sebelah kanan *intake*. Pengamatan pada daerah lubang dudukan *camshaft* menunjukkan bahwa cacat yang diprediksi tidak muncul pada No. 1 tetapi muncul pada No. 5 dalam bentuk *shrinkage*. Cacat yang muncul pada No. 1 terletak di atas daerah ini dan dekat *riser* seperti *pinholes*. Pada daerah bawah saluran *intake* tidak ditemukan cacat pada kedua sampel. Cacat pada No. 1 muncul dengan ukuran yang kecil pada bagian atas saluran ini dan lebih dimungkinkan disebabkan oleh kotoran atau gas. Penyusutan pada bagian atas saluran *intake* terlihat cukup besar pada No. 5. Daerah atas *dome* dan busi sebelah kanan *intake*

menunjukkan cacat penyusutan pada keduanya dengan ukuran yang relatif sama. Cacat pada daerah dinding atas tidak teramati pada kedua sampel.

Pengamatan visual pada perpotongan C, D dan E menunjukkan daerah yang rawan terhadap porositas dan penyusutan tidak berbeda jauh dengan potongan A, B dan F. Cacat pada potongan ini hanya teramati pada bagian atas dudukan *camshaft* seperti pada potongan sebelumnya.

Pengamatan visual pada perpotongan B, C, E dan F menunjukkan daerah yang rawan terhadap porositas dan penyusutan adalah daerah dinding atas, daerah lubang dudukan *camshaft* hingga mendekati *riser* dan daerah bawah dudukan baut di sisi *intake* dan *exhaust*. Cacat yang dijumpai adalah pada daerah dudukan baut dengan posisi pada daerah atasnya. Besarnya cacat ini lebih besar pada No. 5 dibandingkan dengan No. 1. Pada No. 1 terlihat cacat yang jelas akibat kesalahan dalam membuat cetakan inti *water jacket*. Kesalahan ini menyebabkan lubang baut tidak lurus sehingga ketika dibor maka cairan pendingin dapat keluar dari lubang baut ini. Cacat pada daerah dinding atas teramati pada No. 5 dengan ukuran yang kecil.

Pengamatan visual pada perpotongan melintang kedua *dome* menunjukkan daerah yang rawan terhadap porositas dan penyusutan adalah kedua *dome* dan daerah kiri kanan di bawah dudukan *camshaft* dimana terjadi perbedaan ketebalan dengan bagian dinding bawahnya. Pada No. 1 cacat ini dijumpai pada kedua bagian *dome* seperti yang terjadi pada *casting design* awal. Sedangkan pada No. 5 cacat tersebut relatif lebih kecil dibandingkan dengan No. 1.



Gambar 4-27. Pengamatan visual bagian dalam *Casting Design A*, $T_{\text{tuang}} 730^{\circ}\text{C}$.

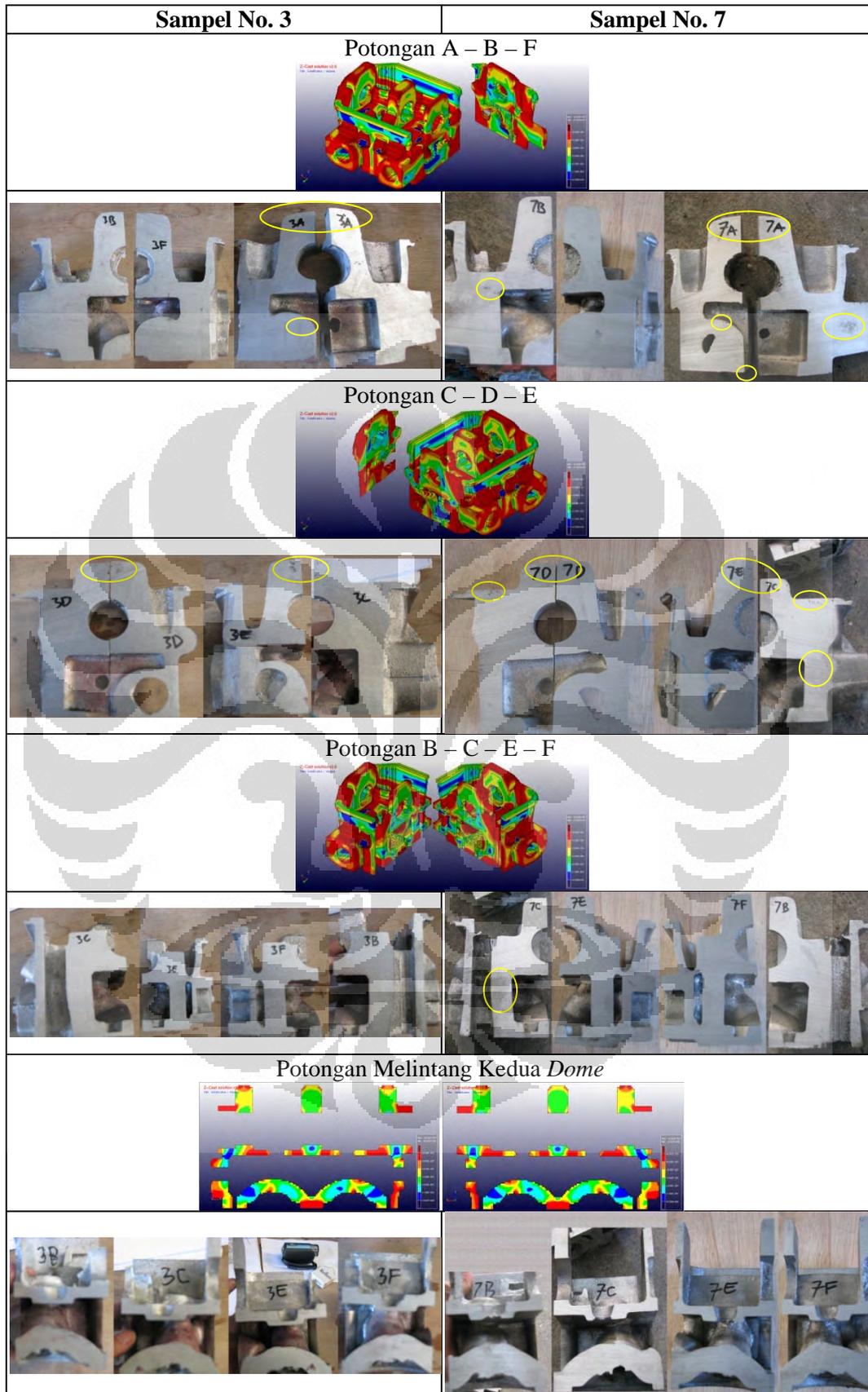
Casting Design A, 690°C

Pengamatan visual bagian dalam ini dapat dilihat pada **Gambar 4-28** dimana distribusi daerah yang rawan porositas dan penyusutan tidak berbeda jauh dengan penuangan pada temperatur 730°C. Pengamatan visual pada perpotongan A, B dan F menunjukkan cacat pada daerah lubang dudukan *camshaft*. Cacat yang diprediksi tidak muncul pada No. 3 tetapi muncul No. 7 dengan dimensi yang lebih kecil dari No. 5. Selain itu muncul cacat juga pada No. 7 yang terletak di atas daerah ini dan dekat *riser* seperti *pinholes*. Pada daerah bawah saluran *intake* tidak ditemukan cacat pada kedua sampel. Cacat pada No. 7 muncul dengan ukuran yang lebih kecil dari pada No. 5 pada bagian tengah saluran ini dan cacat ini tidak dijumpai pada No. 1. Daerah atas *dome* dan busi sebelah kanan *intake* menunjukkan cacat penyusutan pada keduanya dengan ukuran yang relatif sama.

Pengamatan visual pada perpotongan C, D dan E menunjukkan daerah yang rawan terhadap porositas dan penyusutan tidak berbeda jauh dengan potongan A, B dan F. Cacat pada potongan ini teramati pada bagian atas dudukan *camshaft* pada kedua sampel. Sementara, cacat pada daerah lubang dudukan *camshaft* teramati pada No. 3. Cacat pada daerah dinding atas hanya teramati pada No. 7. Pada daerah bawah saluran *intake*, cacat dijumpai pada bagian tengah seperti pada potongan A – B – F.

Pengamatan visual pada perpotongan B, C, E dan F menunjukkan cacat yang dijumpai adalah pada daerah dudukan baut pada sampel No. 7. Cacat ini muncul pada daerah atasnya. Sedangkan besarnya cacat ini lebih besar terjadi pada No. 5 dibandingkan dengan No. 7.

Pengamatan visual pada perpotongan melintang kedua *dome* menunjukkan bahwa pada No. 3 cacat ini dijumpai pada kedua bagian *dome* seperti yang terjadi pada *casting design* awal. Sedangkan pada No. 7 cacat tersebut tidak dijumpai seperti pada No. 3.



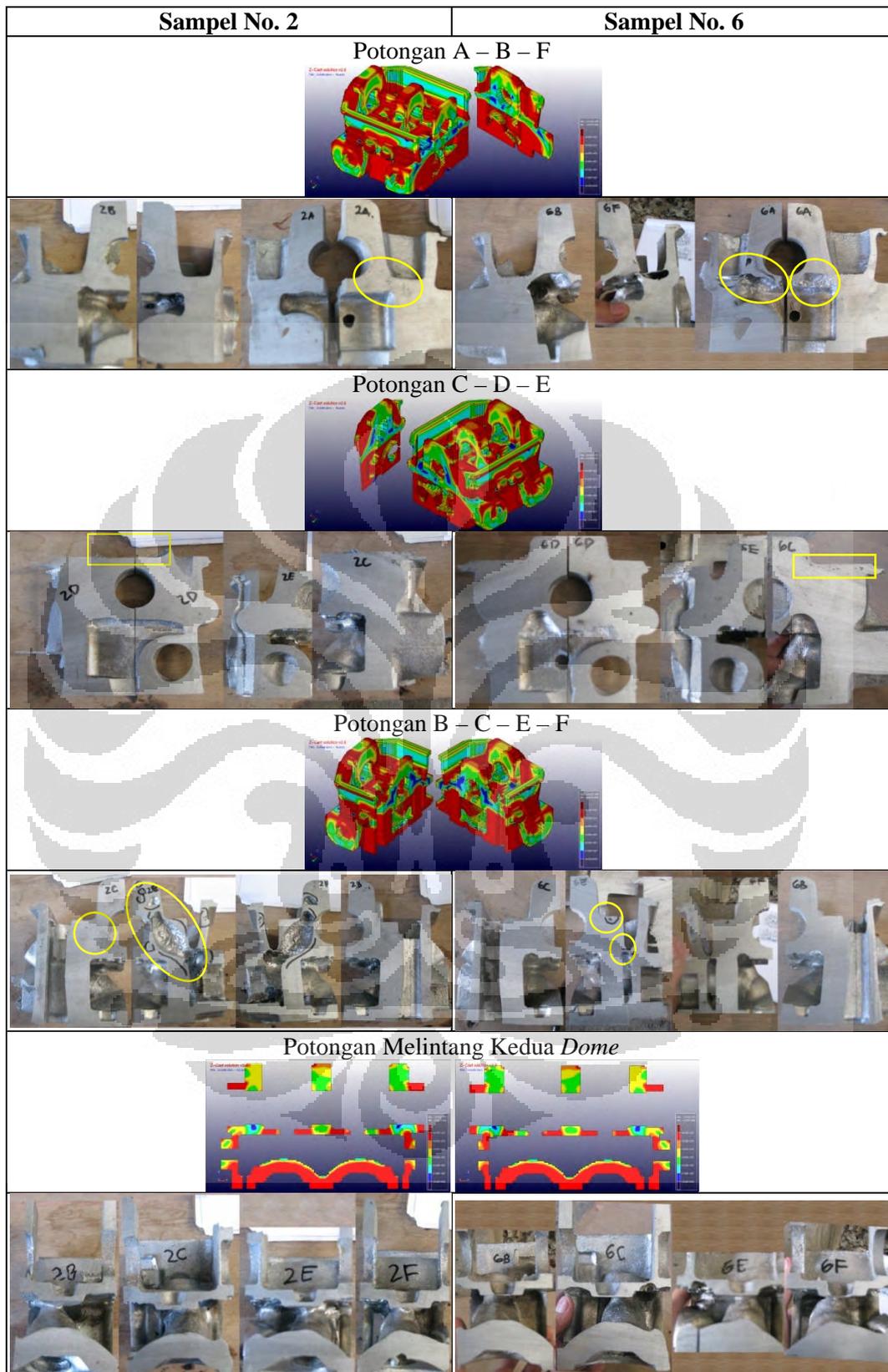
Gambar 4-28. Pengamatan visual bagian dalam *Casting Design A*, $T_{\text{tuang}} 690^{\circ}\text{C}$.

Casting Design D, 730°C

Pengamatan visual bagian dalam ini dapat dilihat pada **Gambar 4-29**. Pengamatan visual pada perpotongan A, B dan F menunjukkan daerah yang rawan terhadap porositas dan penyusutan adalah daerah dinding atas, dan daerah lubang dudukan *camshaft* hingga ke arah sisi atas saluran *intake* dan *exhaust*, dan sedikit pada daerah atas *dome* dan busi. Cacat pada daerah lubang dudukan *camshaft* hingga ke arah sisi atas saluran *intake* dan *exhaust* yang diprediksi muncul pada No. 2 tetapi tidak muncul pada No. 6. Tidak munculnya cacat pada No. 6 ini lebih disebabkan berubahnya pola pembekuan akibat adanya udara yang terjebak di dalam cetakan. Pada No. 6 juga teramati adanya cacat *pinholes* pada daerah atas dudukan *camshaft* tetapi tidak dijumpai pada No. 2.

Pengamatan visual pada perpotongan C, D dan E menunjukkan daerah yang rawan terhadap porositas dan penyusutan tidak berbeda jauh dengan potongan A, B dan F. Kemungkinan cacat terbentuk lebih besar pada dudukan *camshaft* di daerah ini. Pada No. 2, cacat tidak dijumpai namun bagian atas dudukan *camshaft* tidak terbentuk. Kondisi ini terjadi karena bagian ini tidak terisi aluminium cair akibat terdorong oleh gas yang ada di dalam cetakan. Pada No. 6 cacat dijumpai pada bagian dinding atas yang tidak diprediksi oleh Niyama. Kemungkinan cacat ini disebabkan oleh udara yang terjebak.

Pengamatan visual pada perpotongan B, C, E dan F menunjukkan daerah yang rawan terhadap porositas dan penyusutan adalah daerah dinding atas, daerah lubang dudukan *camshaft* hingga ke arah sisi atas saluran *intake* dan *exhaust*, dan sedikit pada daerah atas dinding bawah sebelah atas. Pada No. 2, cacat dijumpai pada daerah yang sesuai prediksi Niyama. Cacat yang lebih besar terbentuk akibat udara yang terjebak sehingga menyebabkan dinding sisi *exhaust* hilang. Pada No. 6, cacat yang dijumpai adalah pada daerah dudukan baut atas sebelah sisi *exhaust* dan lantai atas *water jacket* sebelah *exhaust*. Cacat ini diperkirakan berasal dari udara yang terjebak pada cetakan.



Gambar 4-29. Pengamatan visual bagian dalam *Casting Design D*, $T_{\text{tuang}} 730^{\circ}\text{C}$.

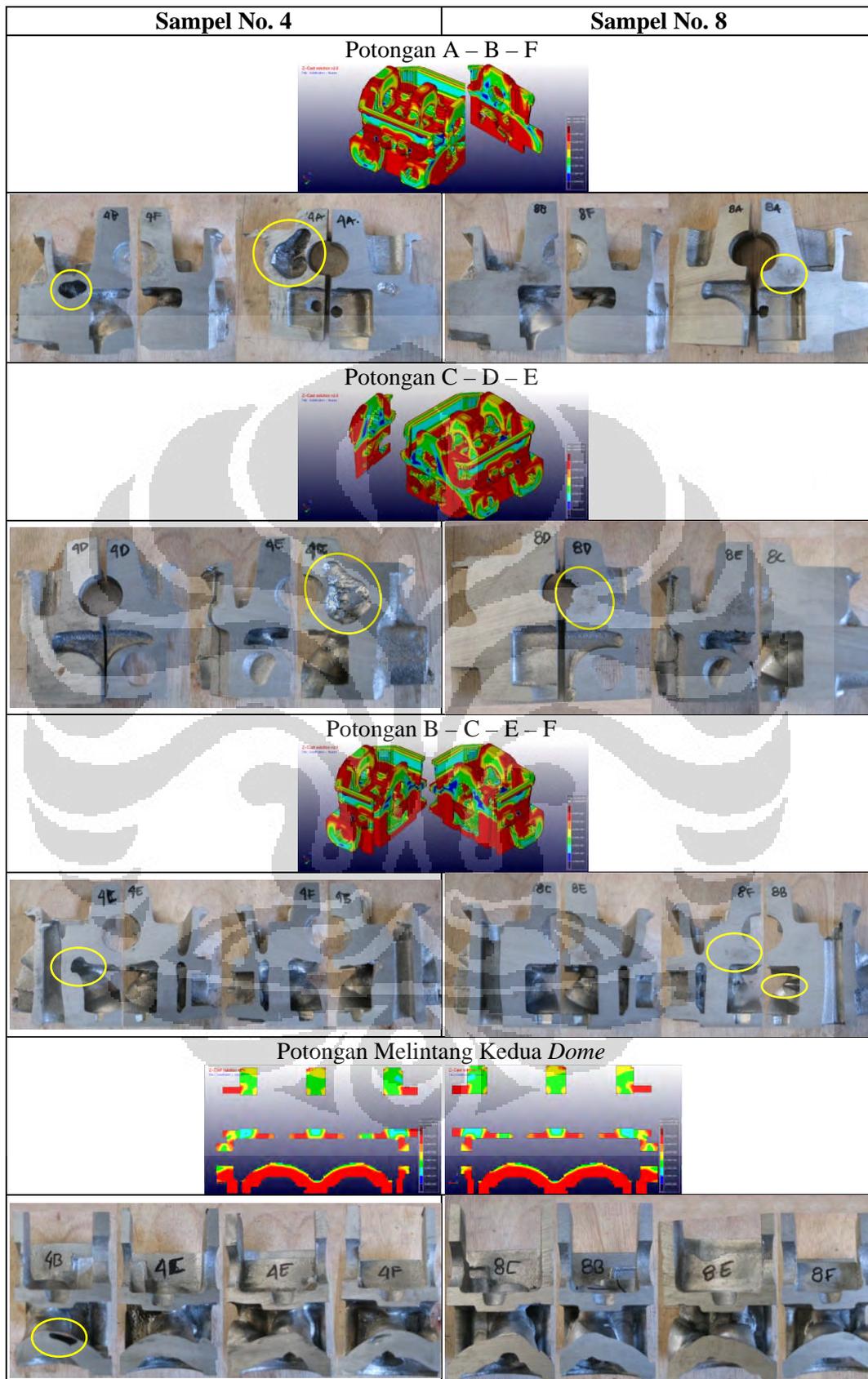
Pengamatan visual pada perpotongan melintang kedua *dome* menunjukkan daerah yang rawan terhadap porositas dan penyusutan adalah kedua *dome* pada sedikit sisi atasnya dan daerah kiri kanan di bawah dudukan *camshaft* dimana terjadi perbedaan ketebalan dengan bagian dinding bawahnya. Pada No. 2 terlihat sedikit terbentuk cacat pada bagian atas *dome* tetapi secara keseluruhan struktur *dome* terlihat jauh lebih padat dari pada *casting desain A*. Kondisi ini juga dijumpai pada No. 6.

Casting Design D, 690°C

Pengamatan visual bagian dalam ini dapat dilihat pada **Gambar 4-29** dimana distribusi daerah yang rawan porositas dan penyusutan tidak berbeda jauh dengan penuangan pada temperatur 730°C. Pengamatan visual pada perpotongan A, B dan F menunjukkan cacat pada daerah lubang dudukan *camshaft* hingga ke arah sisi atas saluran *intake* dan *exhaust* yang diprediksi muncul pada No. 8 tetapi tidak muncul pada No. 4. Tidak munculnya cacat pada No. 4 ini mungkin lebih disebabkan berubahnya pola pembekuan akibat adanya udara yang terjebak di dalam cetakan. Pada No. 6 juga teramati adanya cacat *pinholes* pada daerah atas dudukan *camshaft* tetapi tidak dijumpai pada No. 4.

Pengamatan visual pada perpotongan C, D dan E menunjukkan bahwa cacat sesuai prediksi muncul pada No. 8 pada daerah dudukan *camshaft*. Kondisi ini tidak dijumpai pada No. 4 mungkin lebih disebabkan berubahnya pola pembekuan akibat adanya udara yang terjebak di dalam cetakan.

Pengamatan visual pada perpotongan B, C, E dan F menunjukkan bahwa cacat sesuai prediksi muncul pada No. 8 pada daerah dudukan *camshaft*. Kondisi ini tidak dijumpai pada No. 4 yang mungkin lebih disebabkan berubahnya pola pembekuan akibat adanya udara yang terjebak di dalam cetakan.



Gambar 4-30. Pengamatan visual bagian dalam *Casting Design D*, $T_{\text{tuang}} 690^{\circ}\text{C}$.

Pengamatan visual pada perpotongan melintang kedua *dome* menunjukkan bahwa tidak dijumpai cacat sesuai dengan prediksi dari Niyama. Secara keseluruhan struktur *dome* menunjukkan tingkat kepadatan yang lebih tinggi dari pada *Casting Desain A*. Cacat *blowholes* ditemukan pada daerah *dome* pada No. 4 daerah B dan *pinholes* ditemukan pada No. 8 daerah C.

Pada dasarnya, perbedaan yang terjadi antara hasil simulasi dan hasil eksperimen *cylinder head* ini dapat disebabkan oleh ketidaksesuaian nilai parameter yang digunakan pada simulasi dan eksperimen. Parameter simulasi yang mungkin tidak sesuai dengan eksperimen antara lain: material paduan aluminium, material cetakan, temperatur awal cairan dan cetakan, dan waktu tuang [63]. Meski demikian, cacat yang muncul antara hasil simulasi dan hasil eksperimen relatif sama sehingga penggunaan kriteria Niyama dalam memprediksi cacat dapat dijadikan acuan dalam melakukan pembuatan desain.

4.6.3 Pengujian Hidrostatik dan NDT

Pengujian hidrostatik dilakukan hanya pada *Casting Design A* yang secara visual menunjukkan tampilan permukaan yang baik. *Casting Design D* tidak mungkin dilakukan pengujian hidrostatik karena cacat akibat kategori B dan C sudah tampak. Kondisi ini tidak memungkinkan *casting design* dilakukan pengujian hidrostatik.

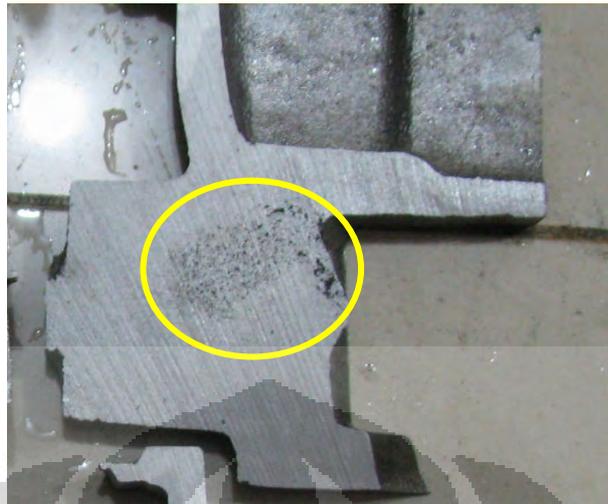
Hasil pengujian hidrostatik menunjukkan bahwa variasi No. 1 dan 3 dapat melewati pengujian ini sementara No. 5 dan 7 tidak bisa melewati pengujian ini. Pada No. 5 terjadi rembesan di dekat kedudukan *camshaft* tengah sebelah saluran turun oli yang kecil pada sisi kanan *intake*. Penyebab timbulnya rembesan ini adalah terjadinya porositas akibat penyusutan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4-31**. Pengecekan dengan menggunakan *dye penetrant* juga menunjukkan bahwa cacat hanya muncul pada bagian ini. Sementara cacat yang terjadi di bagian lain tidak ditemukan.

Pada dasarnya, cacat ini muncul karena pada daerah yang memiliki perbedaan ketebalan. Berbeda dengan variasi No. 1 dan 3 dimana cacat pada daerah ini tidak muncul. Pembentukan cacat ini seperti yang terjadi pada bagian atas *dome* sebelah kanan *intake* yang terbentuk pada temperatur tuang 730°C yang memiliki *volume shrinkage* lebih besar. Penggunaan penghalus butir diperkirakan juga berpengaruh dalam kemunculan cacat ini dengan mengubah karakteristik pembekuannya. Pembekuan dapat lebih cepat terjadi dengan adanya penghalus butir dan *chill* pada sisi kiri gambar. Pembekuan yang lebih cepat menghambat aliran cairan aluminium yang masih cair pada *riser* untuk mengisi bagian ini. Akibatnya terjadi porositas penyusutan ketika proses pembekuan terjadi. Penghilangan *chill* pada daerah ini mungkin bisa menghindari munculnya cacat ini dengan mengubah kecepatan pendinginannya menjadi lebih lambat dan berjalan secara alami dengan adanya penghalus butir.



Gambar 4-31. Potongan daerah yang mengalami rembesan pada No. 5.

Kegagalan pengujian hidrostatis No. 7 disebabkan karena terjadinya kebocoran pada bagian atas saluran *intake* kiri dan kanan. Kegagalan ini juga diperkuat dengan pengujian *dye penetrant* yang hanya menunjukkan cacat hanya pada daerah ini. Penyebab kebocoran ini diperkirakan sama dengan yang terjadi pada No. 5 namun muncul pada lokasi yang berbeda pada **Gambar 4-32**. Kedua saluran *intake* ini dihimpit oleh bagian yang tebal pada bagian luarnya dan di sini juga terdapat *riser* samping. Diperkirakan efektifitas *riser* ini perlu ditingkatkan ketika menggunakan penghalus butir dengan membesarkan leher *riser* sehingga aliran cairan bisa mengisi lebih baik lagi.



Gambar 4-32. Potongan daerah yang mengalami rembesan pada No. 7.

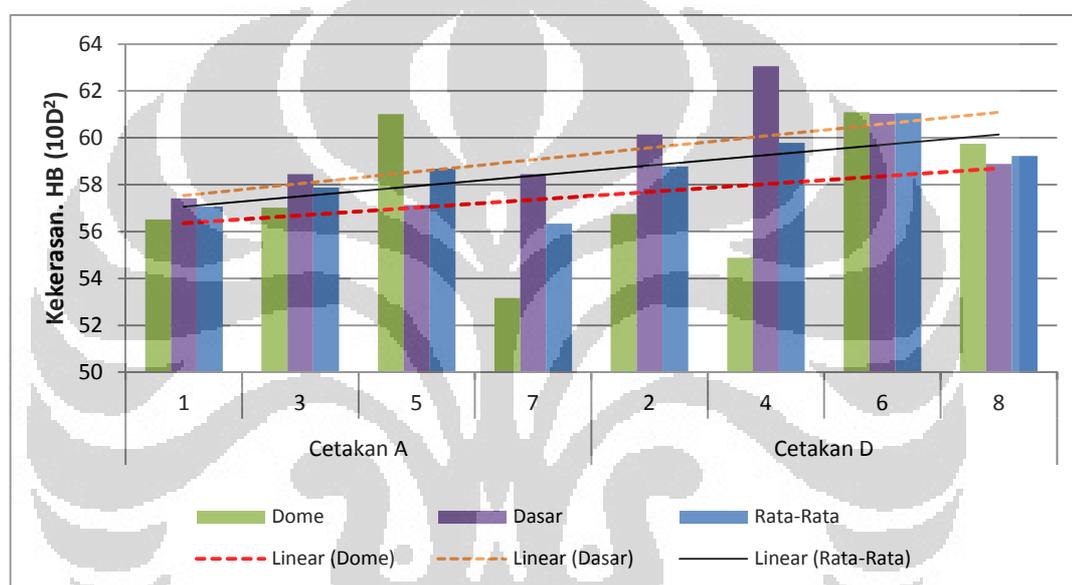
4.6.4 Pengujian Kekerasan

Pengukuran kekerasan pada permukaan bawah *cylinder head* menunjukkan kecenderungan peningkatan nilai kekerasan dengan menggunakan *Casting Design D* dan dengan menambahkan Ti seperti yang diilustrasikan pada **Tabel 4-20** dan **Gambar 4-33**. Hal ini sejalan dengan pengaruh dari penggunaan “*chill plate*” dan penghalus butir. “*Chill plate*” yang berfungsi untuk meningkatkan sifat mekanis dari *cylinder head* khususnya pada bagian bawahnya terlihat bisa memberikan hasil yang diharapkan berupa kenaikan nilai kekerasannya. Laju pendinginan yang lebih tinggi bisa dicapai dengan cara ini sehingga sifat mekanisnya dapat ditingkatkan meski tanpa penggunaan penghalus butir.

Tabel 4-20. Hasil pengukuran kekerasan pada permukaan bawah.

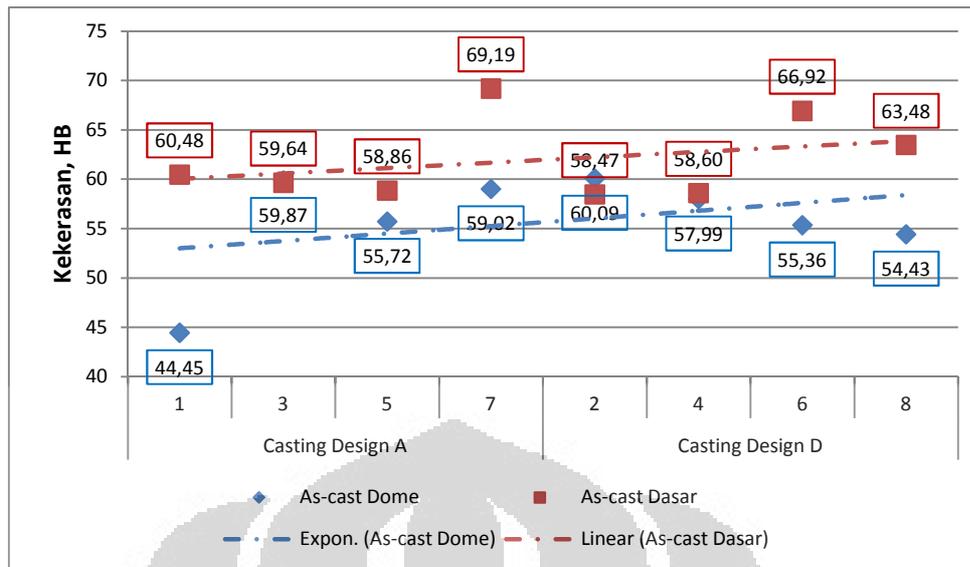
DAERAH PENGUKURAN	<i>Casting Design A</i>				<i>Casting Design D</i>			
	1	3	5	7	2	4	6	8
Material	AC4B		AC4B+Ti		AC4B		AC4B+Ti	
Dome Kiri	55,5	57,4	59,8	55,0	59,0	54,0	63,8	63,0
Dome Kanan	57,5	56,7	62,2	51,3	54,5	55,8	58,4	56,5
<i>Rata-rata Dome</i>	56,5	57,0	61,0	53,2	56,8	54,9	61,1	59,8
Dasar Dome Kiri	56,0	55,3	55,8	59,8	62,0	64,0	62,4	55,7
Dasar Tengah	59,5	66,3	60,0	61,3	57,0	64,0	61,5	63,0
Dasar Dome Kanan	56,7	53,8	55,6	54,3	61,4	61,2	59,2	58,0
<i>Rata-rata Dasar</i>	57,4	58,4	57,1	58,4	60,1	63,1	61,0	58,9
Rata-Rata	57,1	57,9	58,7	56,3	58,8	59,8	61,1	59,2

Penggunaan penghalus butir juga menunjukkan kecenderungan peningkatan sifat mekanis baik tanpa maupun dengan menggunakan “*chill plate*”. Kecenderungan peningkatan sifat mekanis ini juga terlihat ketika temperatur tuang diturunkan menjadi 690°C namun nilai kekerasan yang masih bervariasi ini dipengaruhi juga oleh temperatur cetakan yang bervariasi. Kestabilan nilai kekerasan ini dapat diperoleh dengan menjaga temperatur cetakan pada rentang temperatur tertentu dimana kondisi ini belum bisa dicapai pada eksperimen ini.



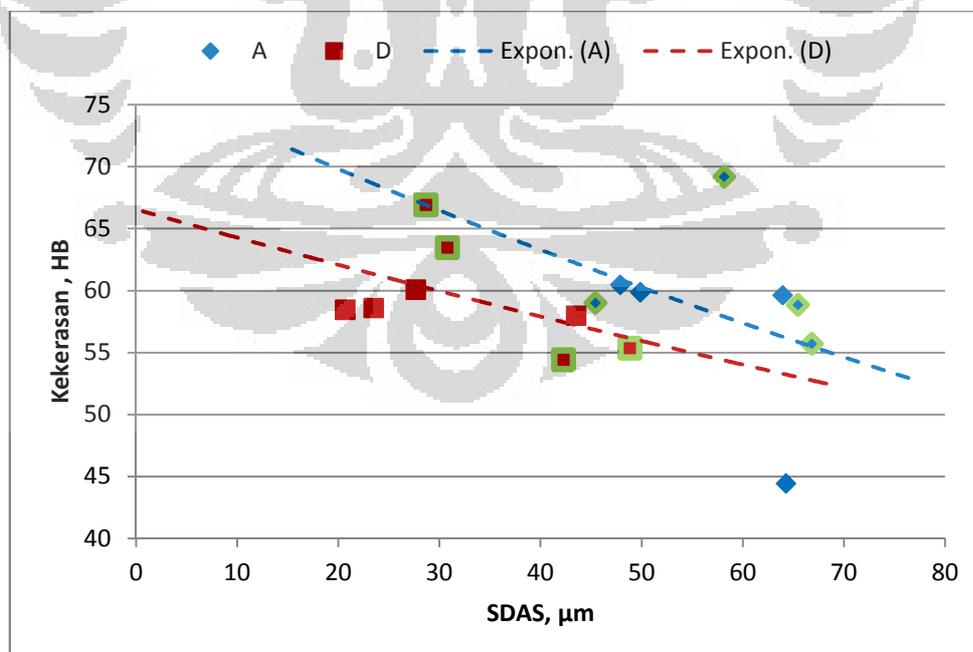
Gambar 4-33. Pengaruh *casting design* dan penambahan Ti terhadap kekerasan pada permukaan bawah.

Pengukuran kekerasan rata-rata pada permukaan bawah *cylinder head* menunjukkan bahwa daerah *dome* cenderung lebih rendah nilai kekerasannya daripada daerah dasar *dome*. Pengukuran kekerasan pada daerah penampang melintang P1 dan D1 menunjukkan kecenderungan yang sama seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4-34**. Kekerasan ini dipengaruhi oleh kecepatan pendinginan pada daerah *dome* yang berjalan lebih lambat dibandingkan dengan daerah dasarnya.



Gambar 4-34. Pengaruh *casting design* dan penambahan Ti terhadap kekerasan kondisi pengecoran pada penampang melintang *dome* (P1) dan dasar (D1).

Kekerasan pada penampang melintang menunjukkan bahwa nilai kekerasannya berbanding terbalik dengan nilai SDAS-nya pada **Gambar 4-35**. Semakin rendah nilai SDAS maka semakin tinggi nilai kekerasannya. Pada *Casting Design A* yang tidak menggunakan “*chill plate*” terlihat bahwa nilai SDASnya berkisar 47 – 64,3 μm dan paling kecil sekitar 45 μm dengan menggunakan penghalus butir.



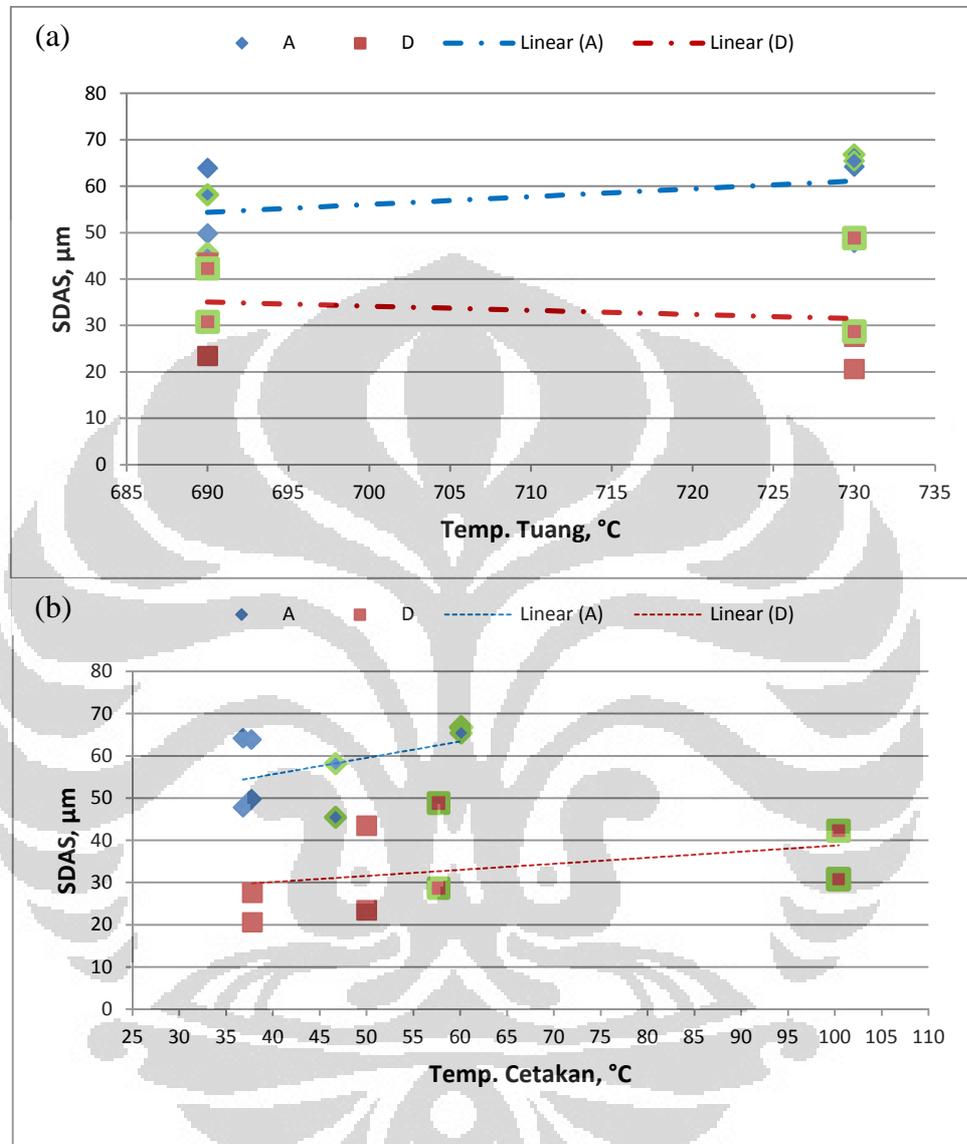
Gambar 4-35. Pengaruh nilai SDAS terhadap kekerasan pada *Casting Design A* dan D.

Penggunaan “*chill plate*” pada *Casting Design D* menunjukkan efek yang menguntungkan terhadap penurunan nilai SDAS sesuai dengan perkiraan. Penggunaan “*chill plate*” dapat menurunkan nilai SDAS hingga menjadi 20,67 μm . Nilai SDAS yang kecil menyebabkan distribusi fasa lainnya lebih merata dan dapat memberikan kekuatan yang seragam pada paduan ini sehingga kekerasannya dapat meningkat. Titik-titik data pada grafik dengan garis keliling berwarna hijau menunjukkan adanya penambahan penghalus butir. Dengan adanya penambahan penghalus butir terlihat bahwa nilai kekerasan dapat meningkat yang artinya terjadi penurunan besar butir yang juga akan dapat menurunkan nilai SDAS [16,17].

Nilai kekerasan ini menunjukkan pengaruh yang tidak terlalu signifikan dengan adanya penghalus butir. Meski kekerasan maksimum bisa dicapai dengan adanya penghalus butir, namun nilai kekerasan tersebut dapat menunjukkan nilai yang lebih rendah dari pada nilai kekerasan yang tidak menggunakan penghalus butir. Faktor yang memungkinkan adalah dari perbedaan temperatur tuang dan temperatur cetakan sehingga mempengaruhi jarak antar SDAS dan fasa-fasa lainnya yang akan mempengaruhi nilai kekerasannya. Dengan demikian pada penelitian ini terlihat bahwa keberadaan penghalus butir tidak terlalu mempengaruhi nilai SDAS dan pembentukan fasa lainnya seperti Si dan intermetalik yang lebih dipengaruhi oleh laju pembekuannya [35].

Nilai SDAS pada percobaan ini menunjukkan deviasi yang cukup besar dan *Casting Design D* memiliki deviasi yang lebih besar dari pada *Casting Design A*. Faktor ini mungkin lebih disebabkan karena temperatur cetakan yang tidak dikendalikan dalam eksperimen ini dan berbeda dengan temperatur tuang yang sangat dikendalikan. Berdasarkan pengaruh temperatur tuang pada **Gambar 4-36(a)** terlihat bahwa semakin rendah temperatur tuangnya maka semakin rendah pula nilai SDASnya karena laju pembekuan bisa berjalan lebih cepat. Begitu pula ketika temperatur cetakan lebih rendah pada **Gambar 4-36(b)** maka cenderung SDAS yang dihasilkan lebih kecil [18,19]. Perbedaan *casting design* pada

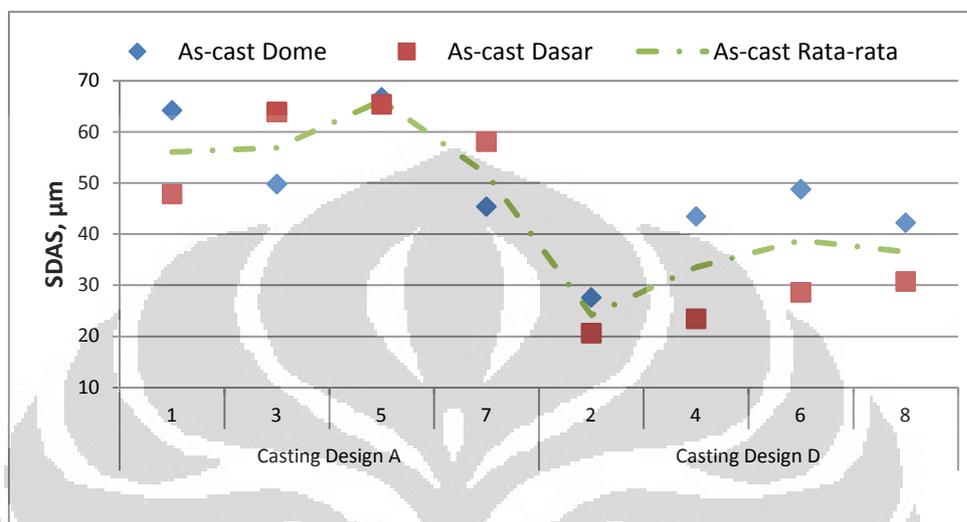
eksperimen di sini terlihat bahwa dengan temperatur tuang dan temperatur cetakan yang relatif sama maka terlihat bahwa *Casting Design D* dengan keberadaan “*chill plate*” dapat menghasilkan nilai SDAS yang lebih kecil.



Gambar 4-36. Pengaruh (a) temperatur tuang dan (b) temperatur cetakan terhadap nilai SDAS.

Pengaruh penghalus butir terhadap nilai SDAS tidak begitu terlihat dengan membandingkannya terhadap *casting design* dan perlakuan cairan pada **Gambar 4-37**. Pada *Casting Design A* dan *D*, penambahan penghalus butir dilakukan masing-masing pada No. 5, 7 dan No. 6, 8. Keempat variasi ini tidak terlihat penurunan nilai SDAS setelah dilakukan penambahan penghalus butir. *Casting Design A* dengan cetakan pasir dan temperatur cetakan yang relatif sama

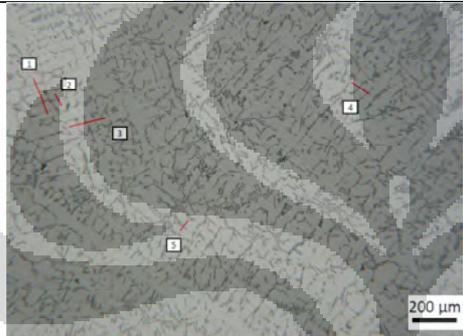
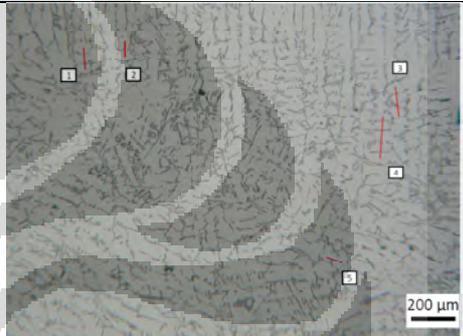
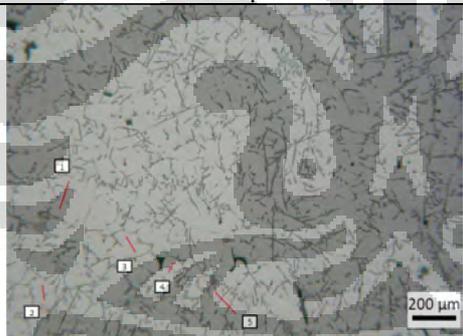
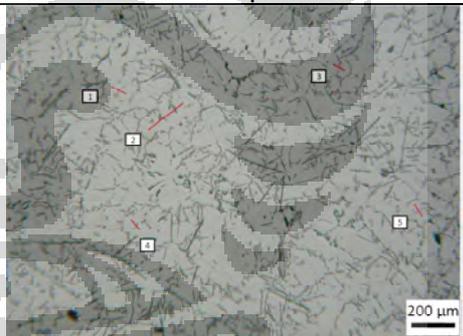
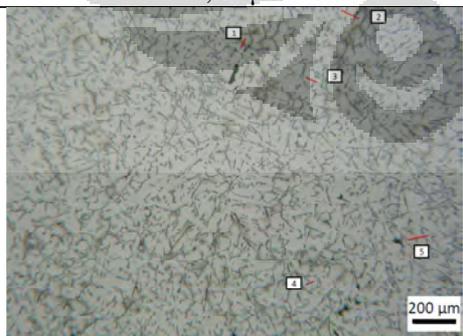
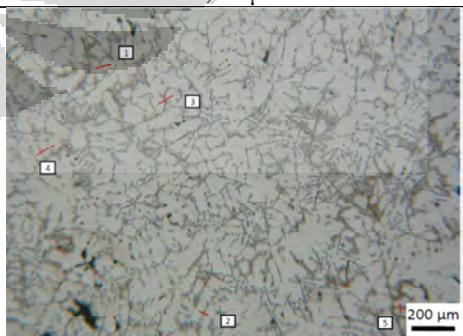
dibandingkan dengan *Casting Design D* nilai SDASnya cenderung pada tingkat yang sama dengan nilai di atas 40 μm . Meski penggunaan “*chill plate*” dapat menurunkan nilai SDAS, pengaruh temperatur cetakan yang cenderung lebih tinggi dari variasi No. 2 ke 8 mempengaruhi kecepatan pendinginannya sehingga SDASnya cenderung terus meningkat hingga hampir mencapai 50 μm .



Gambar 4-37. Pengaruh *casting design* dan perlakuan cairan aluminium terhadap nilai SDAS.

4.6.5 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro pada *Casting Design A* yang diambil pada bagian tangan P1 dan D1 menunjukkan bentuk dari SDAS yang besar sebagai akibat dari laju pembekuan yang lambat yang dihasilkan dari cetakan pasir pada **Gambar 4-38**. Fasa-fasa yang mungkin dijumpai dalam paduan hipoeutektik Al-Si-Cu adalah dendrit-dendrit fasa- α (abu-abu terang), fasa-Si (abu-abu gelap) dan fasa-fasa intermetalik yang kaya Fe dan Cu [39,63].

No.	<i>Casting Design A</i>	
	<i>Dome</i>	Dasar
1	 <p>64,26 μm</p>	 <p>47,87 μm</p>
3	 <p>49,85 μm</p>	 <p>63,93 μm</p>
5	 <p>66,82 μm</p>	 <p>65,45 μm</p>
7	 <p>45,43 μm</p>	 <p>58,15 μm</p>

Gambar 4-38. Struktur mikro *Casting Design A* kondisi pengecoran pada daerah *dome* dan dasar, 50x.

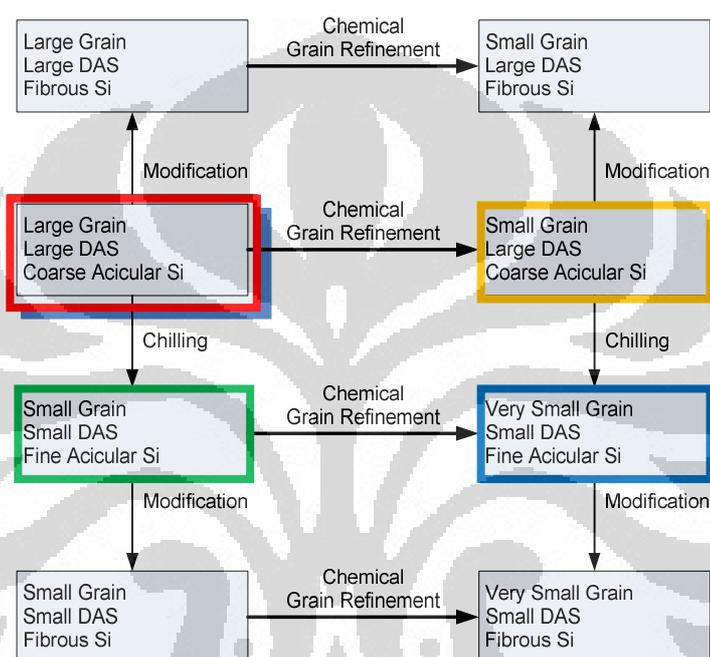
Keberadaan fasa intermetalik dapat dijumpai pada daerah batas butir dan di antara lengan dendrit yang terbentuk selama proses pembekuan. Sifat mekanis yang lebih tinggi dihasilkan dari penyebaran fasa-fasa tersebut secara merata yang juga dikendalikan oleh besarnya SDAS [17,39]. Fasa intermetalik kaya Fe yang terbentuk dari proses cetakan pasir ini adalah dalam bentuk fasa yang dikenal sebagai fasa- β seperti jarum. Fasa ini harus dihindari karena efek yang buruk terhadap keuletannya dengan penambahan unsur Mn, Co, Cr, Ni, V, Mo, dan Be. Peningkatan laju pembekuan dengan menggunakan “*chill plate*” pada *Casting Design D* dapat menghindari pembentukan fasa ini dengan membentuk *chinese script*.

Kekerasan pada daerah dasar yang lebih tinggi ditunjukkan dengan struktur mikro yang lebih halus dibandingkan dengan daerah *dome*, **Gambar 4-38**. Struktur mikro yang lebih halus ini disebabkan oleh kecepatan pembekuan yang lebih tinggi sehingga menghasilkan nilai SDAS yang lebih rendah. Perbedaan kedalaman dari permukaan bawah *cylinder head* juga dapat mempengaruhi nilai SDAS. Semakin dekat dengan permukaan cetakan maka pembekuan dapat berjalan lebih cepat dan menghasilkan nilai SDAS yang lebih kecil dari pada daerah yang jauh dengan permukaan cetakan.

Penambahan penghalus butir pada No. 5 dan 7 tidak menunjukkan penurunan nilai SDAS. Meski penurunan besar butir mungkin dapat dicapai seperti pada Lampiran 15 namun laju pembekuan yang mengendalikan pembentukan SDAS tidak mengalami perubahan yang berarti sehingga nilai SDAS relatif tetap [64]. Keberadaan penghalus butir sebagai tempat untuk terjadinya nukleasi tidak terkait dengan peningkatan laju pembekuan yang dapat menurunkan nilai SDAS melainkan hanya memperpendek panjang dari lengan dendrit primer. Namun demikian sifat mekanisnya seperti kekerasannya tetap dapat diperbaiki sesuai dengan fungsi dari penghalus butir.

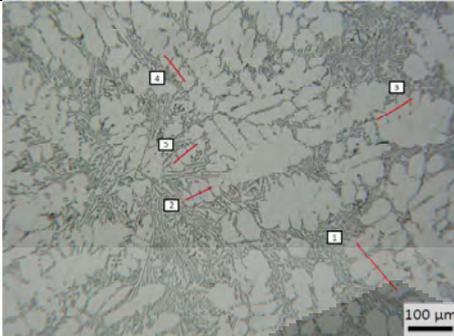
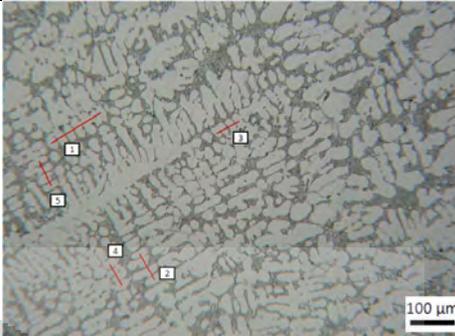
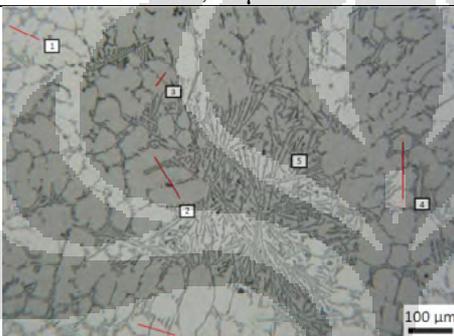
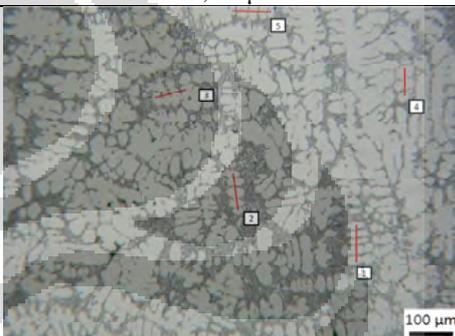
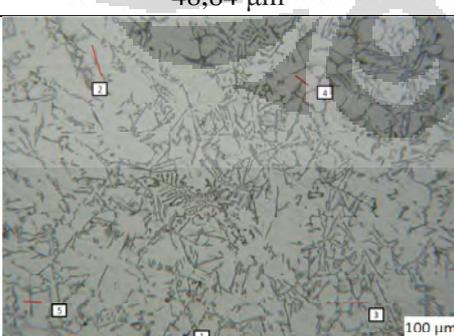
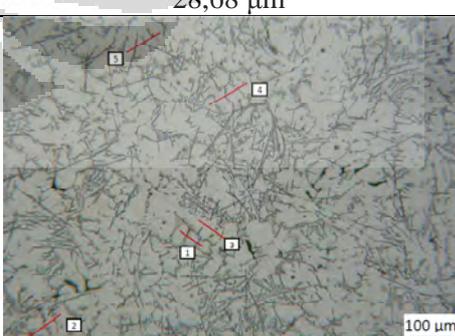
Dengan membandingkan hasil penelitian ini terhadap **Gambar4-39** maka *Casting Design A* No. 1 dan 3 berada pada posisi kotak merah dimana butirannya besar

dan SDASnya besar. Kondisi ini sama dengan kondisi desain awal. penambahan Ti flux menyebabkan butiran menjadi lebih halus tetapi nilai SDASnya tetap tinggi pada No. 5 dan 7 merupakan gambaran dari kotak jingga. Pada *Casting Design D* yang menggunakan “*chill plate*” merupakan gambaran dari kotak hijau dan biru. Kotak hijau mewakili No. 2 dan 4 yang tidak menggunakan Ti flux dan Kotak biru mewakili No. 6 dan 8 yang menggunakan Ti flux.



Gambar4-39. Hubungan antara *chemical grain refinement*, penggunaan *chill*, dan modifikasi struktur mikro [64].

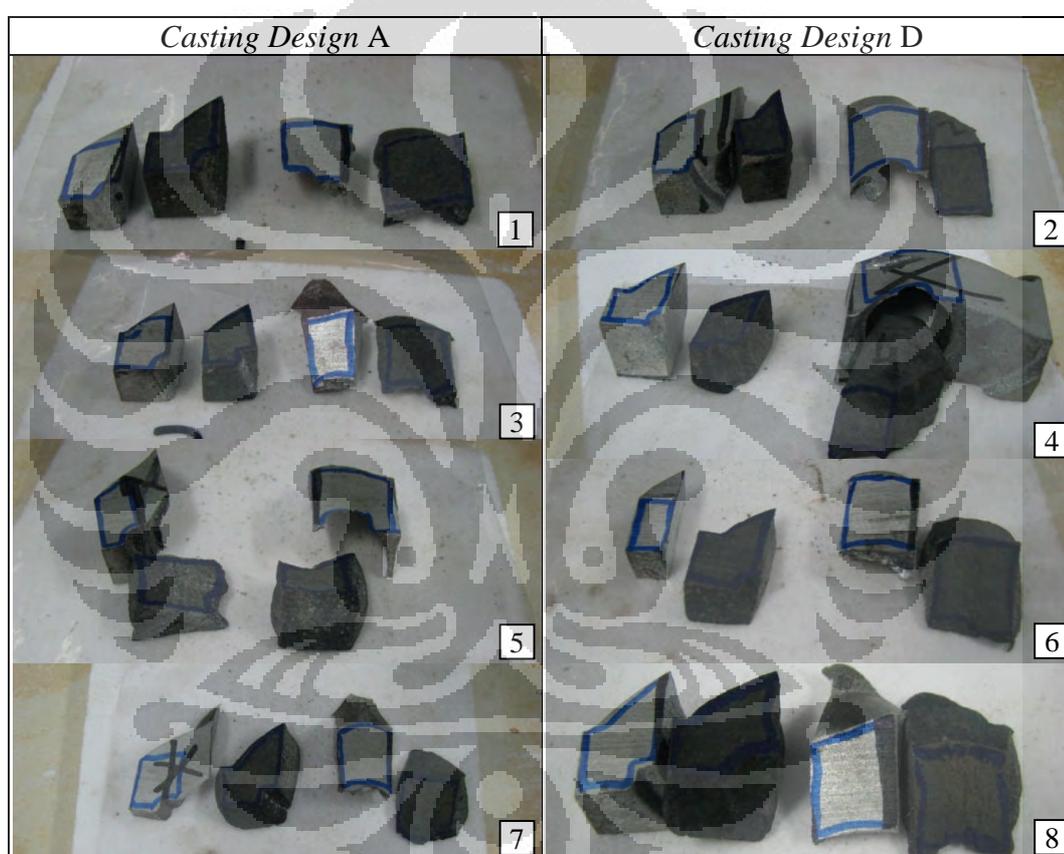
Pengamatan struktur mikro pada *Casting Design D* yang diambil pada bagian tangan P1 dan D1 menunjukkan bentuk dari SDAS yang lebih halus sebagai akibat dari laju pembekuan yang cepat seperti yang dihasilkan dari cetakan permanen. Pada **Gambar 4-40** No. 2 dan 4 terlihat jelas lengan-lengan dendritnya dimana daerah dasar memiliki kehalusan struktur mikro yang lebih tinggi dengan nilai SDAS yang rendah. Sementara pada No. 6 dan 8 terlihat bahwa struktur mikro tersebut sama dengan hasil dari cetakan *Casting Design A*. Hal ini disebabkan dari lebih tingginya temperatur cetakan pada keduanya dibandingkan dengan No. 2 dan 4 sehingga laju pendinginannya relatif lebih lambat dan nilai SDASnya juga menjadi lebih besar.

No.	<i>Casting Design D</i>	
	<i>Dome</i>	Dasar
2	 <p>27,65 μm</p>	 <p>20,67 μm</p>
4	 <p>43,51 μm</p>	 <p>23,48 μm</p>
6	 <p>48,84 μm</p>	 <p>28,68 μm</p>
8	 <p>42,28 μm</p>	 <p>30,80 μm</p>

Gambar 4-40. Struktur mikro *Casting Design D* kondisi pengecoran pada daerah *dome* dan dasar, 100x.

Seperti halnya dengan *Casting Design A* yang menggunakan penghalus butir, efek penghalus butir terhadap penurunan nilai SDAS tidak terlihat di sini. Efek penghalus butir terhadap sifat mekanis tetap dapat dilihat dengan memperhatikan kekerasan yang dihasilkannya. Nilai kekerasan yang dihasilkan cenderung meningkat dengan memadukan antara penggunaan “*chill plate*” dan penghalus butir. Pada No. 6 dan 8 terlihat pembentukan *chinese script* yang mungkin berupa fasa- β yang terbentuk akibat laju pembekuan yang lebih besar.

4.6 Eksperimen *Heat Treatment T6*



Gambar 4-41. Perubahan bentuk fisik dari potongan sampel *cylinder head* sebelum dan setelah *heat treatment T6*. Angka 1 – 7 menunjukkan variasi pengecoran.

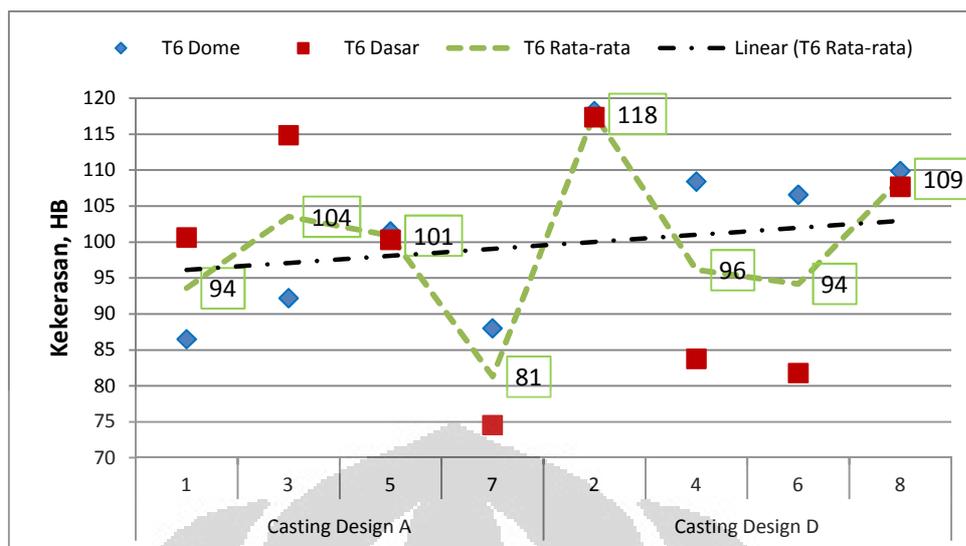
Hasil *heat treatment T6* ini menunjukkan perubahan dimensi terhadap beberapa sampel yang telah melewati *solution treatment* pada **Gambar 4-41**. Perubahan dimensi yang besar terjadi khususnya pada sampel yang memiliki perbedaan ketebalan, menggunakan “*chill plate*,” dan mengalami penambahan Ti pada sampel No. 2, 4, 5, 6, 7, dan 8. Perbedaan ketebalan sampel tentu akan

mempengaruhi respon panas antar bagiannya yang menyebabkan terjadinya perubahan dimensi selama proses ini.

Pada dasarnya, temperatur dan waktu *solution treatment* untuk menghasilkan sifat mekanis yang optimal dipengaruhi oleh struktur mikro hasil cor. Salah satu struktur mikro yang berpengaruh adalah distribusi fasa yang kaya Cu (tembaga) dimana akan semakin tersebar dengan semakin rendah kekasaran yang ditandai dengan tingginya nilai SDAS. Fasa ini dapat menyebabkan pelelehan secara lokal pada temperatur *solution treatment* yang terlalu tinggi dan waktu yang lama sehingga dapat mengurangi sifat mekanisnya [65]. Perubahan dimensi tersebut mungkin juga dipengaruhi dari kondisi struktur mikro ini dan dapat dibandingkan dengan **Gambar 4-41** sampel No. 1 dan 3. Kedua sampel ini diperoleh dengan proses pengecoran yang sama dengan *casting design* awal sehingga dimensinya lebih stabil setelah melewati proses *solution treatment*.

4.6.1 Pengujian Kekerasan

Pengukuran kekerasan setelah *heat treatment* T6 pada penampang melintang *cylinder head* menunjukkan bahwa nilai kekerasannya cenderung meningkat dengan penggunaan “*chill plate*” dan penghalus butir pada **Gambar 4-42**. Namun demikian kecenderungan tersebut tidak terlalu signifikan. Efektifitas proses *heat treatment* T6 terhadap peningkatan sifat mekanis dipengaruhi oleh komposisi kimia dan struktur mikro hasil pengecoran. Kedua faktor tersebut kemudian dikombinasikan dengan pemilihan temperatur dan waktu yang sesuai pada setiap tahap *solution treatment* dan *aging* sehingga diperoleh sifat yang paling optimal [60].

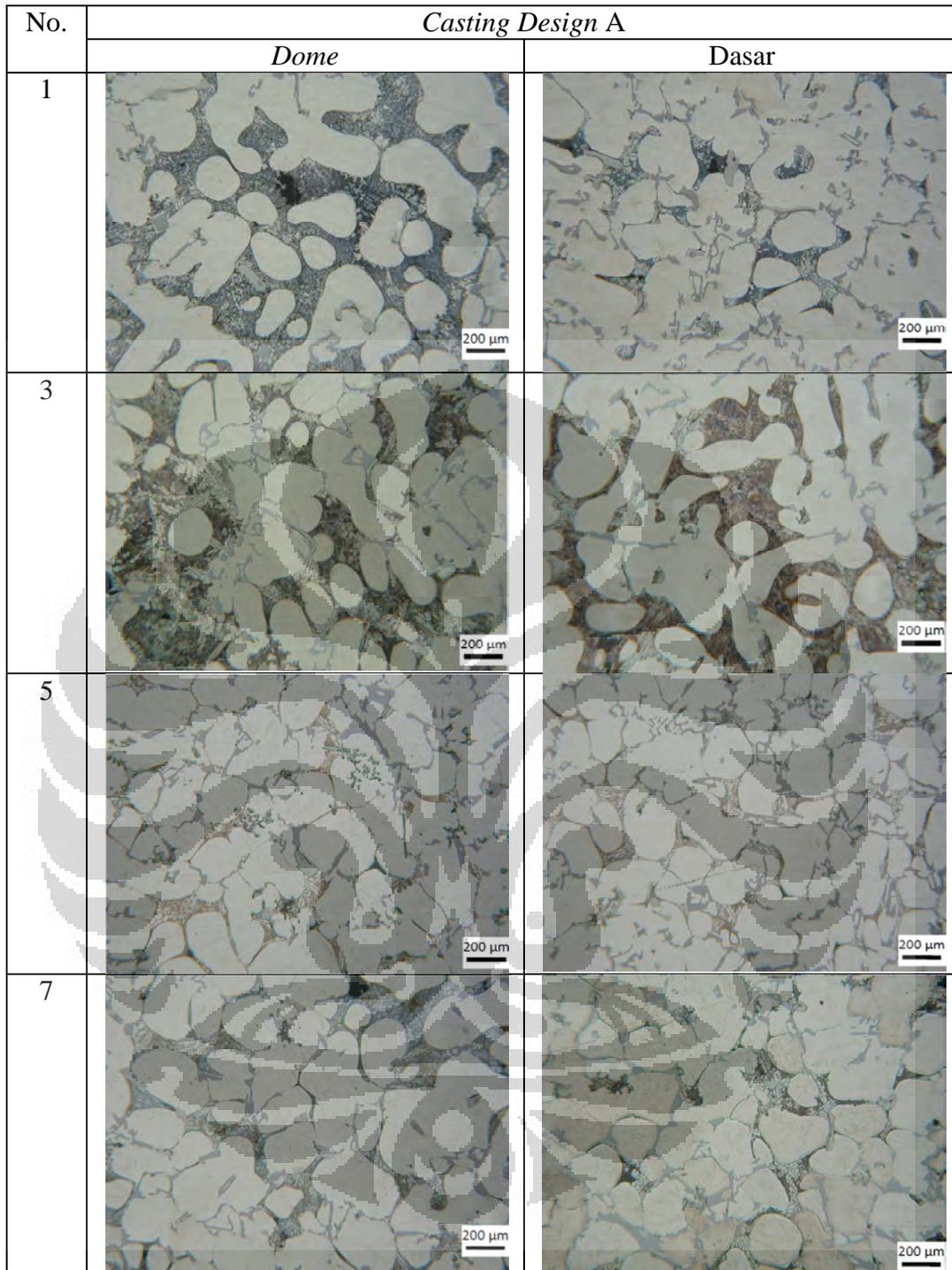


Gambar 4-42. Pengaruh *casting design* dan penambahan Ti terhadap kekerasan kondisi T6 pada penampang melintang *dome* (P1) dan dasar (D1).

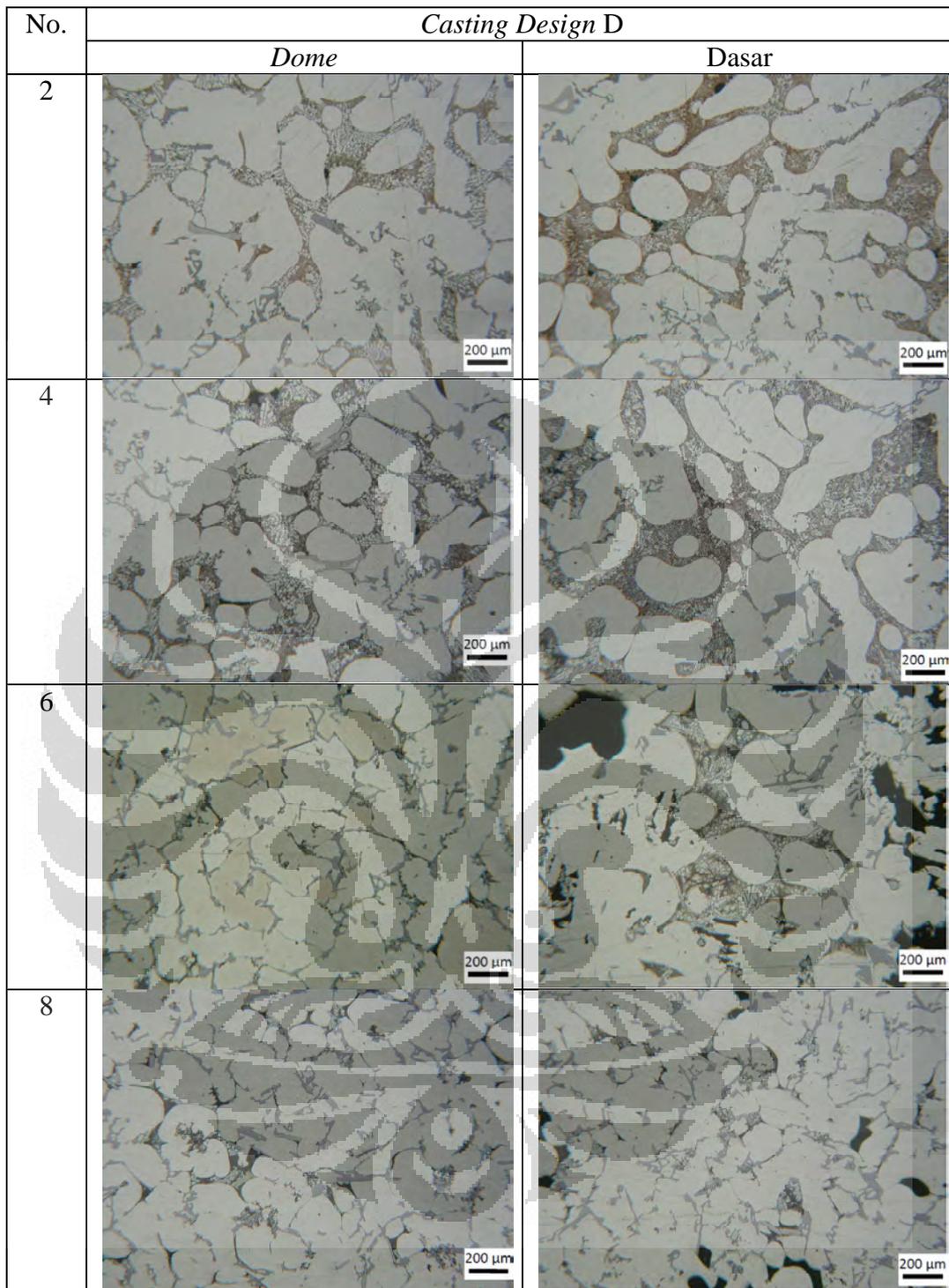
Variasi No. 1 dan 3 merupakan variasi yang sama dengan kondisi *casting design* awal sehingga SOP yang diterapkan pada proses *heat treatment* T6 lebih sesuai meski kadar Cu-nya lebih rendah dari standar material yang biasa digunakan. Variasi yang lain menunjukkan perbedaan secara komposisi kimia dan struktur mikro akibat digunakannya “*chill plate*” sehingga pemilihan temperatur dan waktu yang sesuai masih perlu untuk ditetapkan dalam menghasilkan sifat yang optimal. Nilai kekerasan minimal *cylinder head* setelah T6 diharapkan dapat melebihi 70 HB. Dengan demikian, pada eksperimen ini menunjukkan nilai kekerasan yang memenuhi persyaratan.

4.6.2 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro pada sampel hasil T6 menunjukkan perubahan morfologi dari fasa-fasa yang ada pada **Gambar 4-43** dan **Gambar 4-44**. Fasa- α (abu-abu terang), fasa-Si (abu-abu gelap) dan fasa-fasa intermetalik yang kaya Fe dan Cu mengalami perubahan sejalan dengan penggunaan temperatur dan waktu dalam proses *solution treatment* dan *aging*.



Gambar 4-43. Struktur mikro *Casting Design A* kondisi T6 pada daerah *dome* dan dasar, 50x.



Gambar 4-44. Struktur mikro *Casting Design D* kondisi T6 pada daerah *dome* dan dasar, 50x.

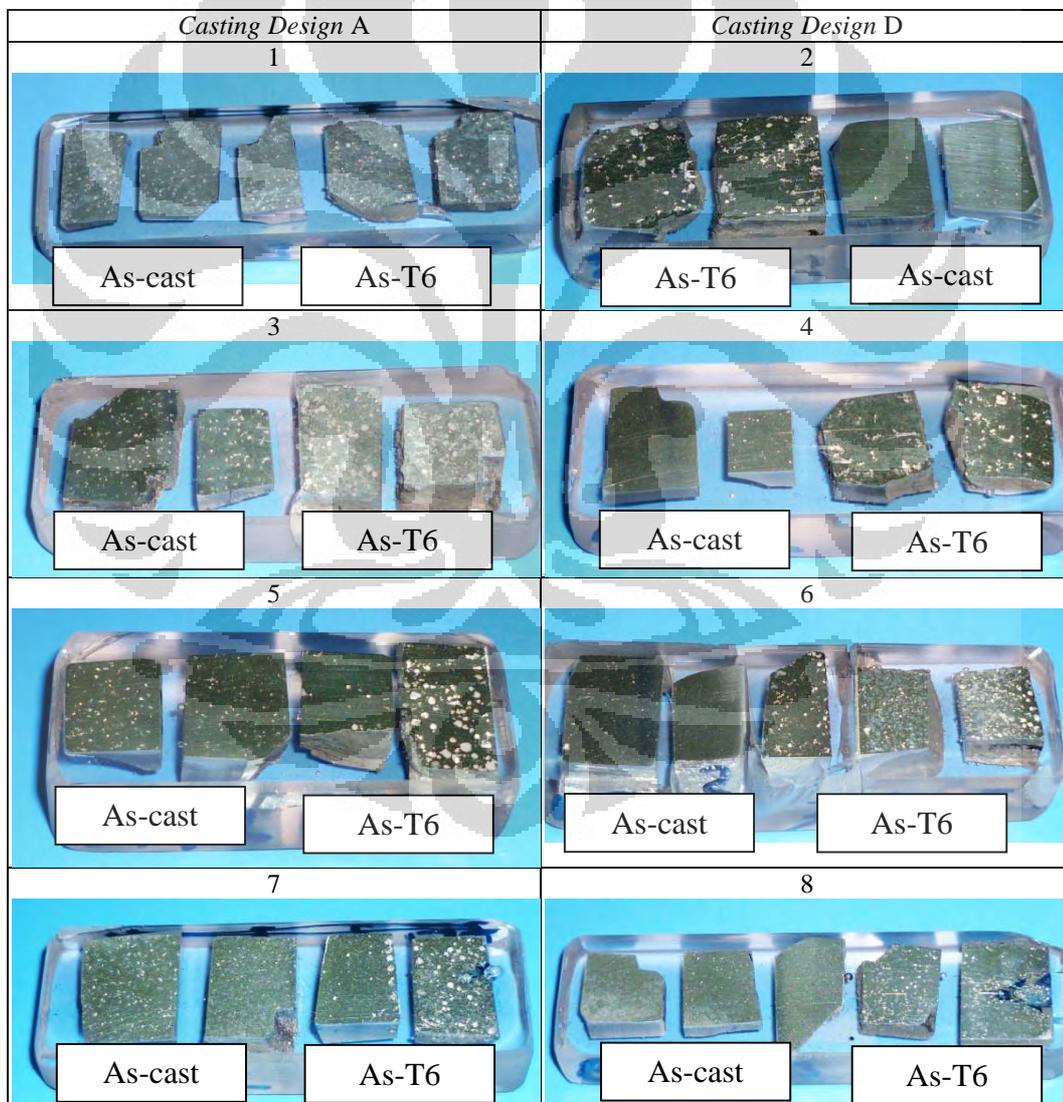
Pada *Casting Design A* dan *D* yang menggunakan maupun yang tidak menggunakan penghalus butir menunjukkan fasa- α yang membulat sejalan dengan perubahan fasa-Si dan intermetalik yang tidak membentuk jarum-jarum lagi.

Pembualatan fasa- α yang terjadi pada temperatur di bawah titik eutektiknya pada waktu yang lama. Butir-butir fasa- α berkesempatan untuk berdekatan satu sama lain. Adanya orientasi antara butir yang bertetangga menyebabkan munculnya tegangan permukaan di batas butir. Sebagai hasil dari adanya tegangan permukaan, butir-butir akan bergumpal untuk mengurangi energi permukaan. Fenomena ini seolah-olah menyebabkan butiran yang besar memakan butiran yang kecil atau suatu cara penggumpalan butiran antara butiran tetangganya yang memiliki orientasi yang sama [66].

Terjadinya penggumpalan fasa- α sangat dipengaruhi struktur mikro hasil pengecoran dimana dikendalikan oleh tingkat kehalusan struktur mikro yang ditandai dengan kecilnya nilai SDAS dan keberadaan penghalus butir. Kehalusan struktur mikro kondisi pengecoran pada *Casting Design A*, No. 1 dan 3, teramati pada daerah dasar dengan nilai SDAS yang lebih kecil menyebabkan fasa- α setelah T6 terlihat lebih rapat. Penambahan penghalus butir, No. 5 dan 7, menunjukkan kerapatan fasa- α yang relatif sama kerapatannya antara dome dan dasar. Penambahan penghalus butir di sini terlihat menunjukkan pembentukan fasa- α yang lebih halus dan merapat. Fasa Si dan intermetalik yang ada di antara butiran fasa- α terlihat berkumpul pada area yang besar ketika tidak menggunakan penghalus butir. Sementara dengan penambahan penghalus butir, area tersebut tidak besar tetapi menyebar merata di antara butiran fasa- α .

Pada *Casting Design D* fenomena ini relatif sama antara No, 2, 4, 6, dan 8. Penggumpalan fasa- α lebih dipengaruhi oleh nilai SDAS yang kecil pada No. 2 dan 4. Besaran butir ini relatif hampir sama dengan No. 5 dan 7 dimana penghalus butir digunakan pada *Casting Design A*. Sementara pengaruh dari nilai SDAS yang kecil dan penghalus butir teramati pada No. 6 dan 8 dimana terlihat besar butiran yang terbentuk lebih kecil dari pada No. 5 dan 7 pada *Casting Design A*. Fasa Si dan intermetalik dengan menggunakan *Casting Design D* terlihat lebih menyebar pada berbagai variasi sehingga sifat mekanis setelah T6 relatif sama pada berbagai perlakuan cairan.

Porositas akibat penyusutan pada *Casting Design A* teramati pada sampel kondisi pengecoran dan juga muncul setelah T6, **Gambar 4-45**. Porositas yang muncul ini cenderung hadir sebagai akibat dari penyusutan selama proses pembekuan seperti yang diprediksi dari Niyama pada Bagian 4.6.2. Sesuai dengan prediksi Niyama tersebut juga terlihat bahwa porositas tidak muncul seperti pada *Casting Design A* ketika menggunakan *Casting Design D*. Porositas ini mungkin lebih kecil karena menyebar merata dimana dikendalikan oleh nilai SDAS yang kecil. Porositas juga muncul setelah T6 pada desain ini. Porositas yang membesar setelah T6 sejalan dengan adanya proses pemuaihan dan penyusutan serta adanya fasa-fasa yang menyebabkan pelelehan secara lokal akibat perubahan temperatur saat proses ini.

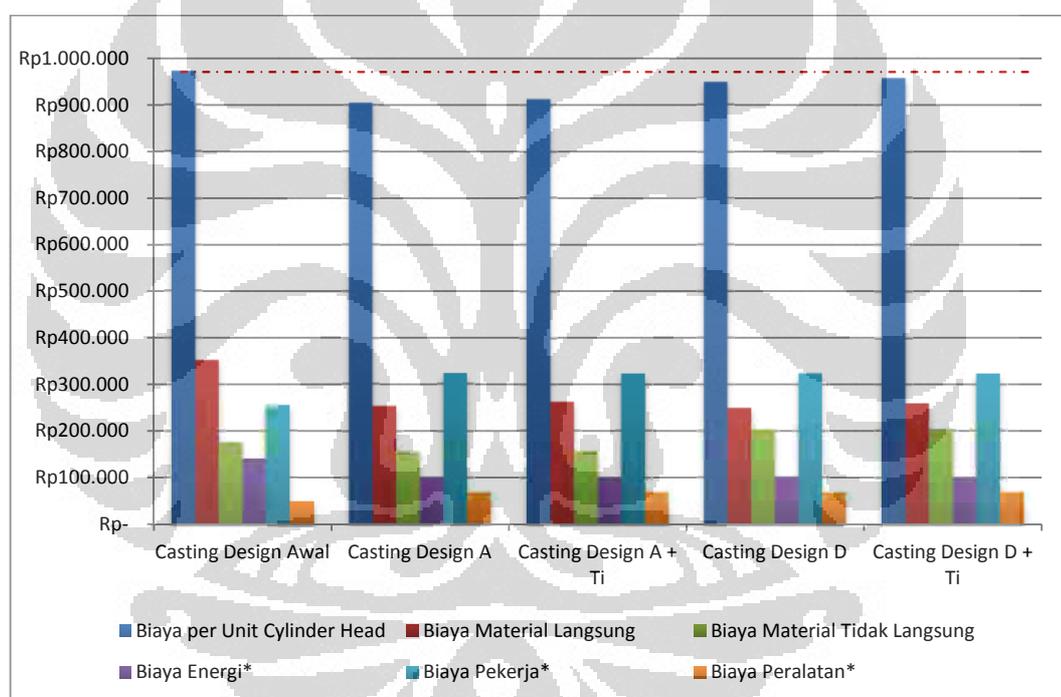


Gambar 4-45. Sampel pengamatan struktur mikro *Casting Design A* dan *D* dari kondisi pengecoran dan kondisi T6 pada daerah *dome* dan *dasar*.

Struktur mikro yang lebih halus yang dihasilkan dari *Casting Design D* pada dasarnya dapat menyebabkan berkurangnya waktu yang diperlukan untuk *heat treatment* T6 maupun temperatur yang dipilih [65]. Kondisi ini juga diharapkan dapat menghindari pelelehan secara lokal yang dapat mempengaruhi sifat mekanis hasil T6. Optimasi yang dilakukan dapat menurunkan biaya *heat treatment* dengan sifat mekanis yang tetap memenuhi persyaratan.

4.7 Analisis Biaya Produksi

Analisis biaya pembuatan *cylinder head* menunjukkan biaya untuk pembuatannya akan cenderung menurun dengan meningkatnya *yield* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4-46**.



Gambar 4-46. Perbandingan biaya pembuatan *cylinder head* dari berbagai macam *casting design*.

Analisis biaya produksi seperti yang dijelaskan pada **Tabel 4-21** langsung terkait dengan modifikasi *casting design*. Perhitungan biaya yang sebenarnya keluar dalam eksperimen dan dijadikan bahan analisis diperlihatkan pada biaya material langsung dan material tidak langsung.

Tabel 4-21. Analisis biaya sebelum dan setelah modifikasi *casting desain*.

No.	Nama	Casting Design 0	Casting Design A	Casting Design A + Ti	Casting Design D	Casting Design D + Ti
Yield, %		42,31	58,81	58,81	59,62	59,62
Biaya per Unit Cylinder Head						
		1.023.581	935.091	943.486	979.627	987.909
A	Material Langsung					
	Biaya	352.555	253.641	262.036	250.195	258.476
1	Ingot AC4B	351.670	253.004	253.004	249.567	249.567
2	Flux	406	292	292	288	288
3	Gas N2	479	345	345	340	340
4	GR 2815	-	-	8.395	-	8.281
B	Material Tidak Langsung					
	Biaya	176.548	156.221	156.221	204.254	204.254
1	Pasir SM6	105.382	92.680	92.680	118.720	118.720
2	Water Glass	22.764	19.979	19.979	25.688	25.688
3	Gas CO2	39.559	34.720	34.720	44.640	44.640
4	Resin (Furan)	924	924	924	924	924
5	Katalis utk Resin	275	275	275	275	275
6	<i>Zip Slip</i>	190	190	190	190	190
7	<i>Chill</i> (Plat + Rod Ø 35mm)	54	54	54	-	-
8	<i>Chill Bar</i>	24	24	24	7	7
9	<i>Chill Plate</i>	-	-	-	936	936
10	Lem cetakan	5.500	5.500	5.500	11.000	11.000
11	Gas LPG 3 kg	1.875	1.875	1.875	1.875	1.875
C	Energi*					
	Biaya	139.803	100.958	100.958	100.907	100.907
1	Solar* untuk Pengecoran	5.192	3.735	3.735	3.685	3.685
	Pemakaian Dapur Heat Treatment	134.615	97.222	97.222	97.222	97.222
D	Pekerja*					
	Biaya	254.675	324.272	324.272	324.272	324.272
1	Pekerjaan Cetakan	82.680	114.480	114.480	114.480	114.480
2	Pekerjaan Dapur	18.346	13.250	13.250	13.250	13.250
3	Pekerjaan Finishing	129.188	178.875	178.875	178.875	178.875
4	Pekerjaan <i>Heat Treatment</i>	24.462	17.667	17.667	17.667	17.667
E	Peralatan*					
	Biaya	50.000	69.231	69.231	69.231	69.231

Biaya material langsung adalah yang terkait dengan cairan dan proses perlakuannya. Biaya ini meliputi biaya ingot, *flux*, gas nitrogen (N₂), dan *grain refinement*. Biaya material tidak langsung adalah biaya yang tidak terkait dengan

cairan langsung. Biaya ini terkait dengan pembuatan cetakan terdiri dari material cetakan seperti pasir, material pengikat, *chill*, dan bahan pendukungnya yang diperlukan sebelum dan setelah pembuatan cetakan.

Pada *casting design* awal, biaya pembuatan berkisar Rp 973.581/unit dengan *yield* 42,31%. Penurunan biaya terendah diperoleh dengan menggunakan *Casting Design A* tanpa penambahan Ti sebesar 7,11% menjadi Rp 904.322/unit dengan *yield* 58,81%. Dengan *casting design* ini penurunan biaya produksi sebesar Rp 69.259/unit. Pengurangan biaya terbesar diperoleh dari biaya material langsung sebesar 28,06% menjadi Rp 253.641/unit akibat dari kenaikan *yield*. Penurunan ini diikuti dengan biaya energi untuk pengecoran dan *heat treatment* sebesar 27,79% menjadi Rp 100.958/unit dengan meningkatnya kapasitas produksi per *batch* dari dapur yang digunakan.

Pengurangan biaya material tidak langsung tidak terlalu besar hanya sebesar 11,51% menjadi Rp 156.221 yang diperoleh dari pengurangan penggunaan pasir untuk cetakan. Peningkatan *yield* disisi lain menyebabkan biaya pekerja dan peralatan meningkat. Jumlah unit yang bertambah per *batch* menyebabkan waktu pengerjaan cetakan dan *finishing* meningkat sehingga biaya ini meningkat sebesar 27,33% menjadi Rp 324.272/unit. Penambahan jumlah unit yang diproduksi juga menyebabkan umur peralatan berkurang lebih cepat dari setiap *batch* yang dihasilkan. Pada dasarnya biaya yang keluar ini adalah tetap per unit produknya tetapi biaya ini meningkat sejalan dengan kenaikan *yield*. Kenaikan biaya peralatan ini meningkat sebesar 38,46% menjadi Rp 69.231/unit.

Penambahan Ti dalam *casting design* ini sebesar 0,12% masih bisa diperoleh penurunan biaya hingga Rp 60.864/unit atau sebesar 6,25% dari *Casting Design* awal. Kenaikan biaya produksi ini disebabkan dari naiknya biaya material langsung karena penambahan Ti sebesar Rp 8.395. Penggunaan *casting design* ini tidak mempengaruhi biaya lainnya selain dari biaya material langsung untuk *Casting Design A*. Konsekuensi penambahan biaya ini perlu dipertimbangkan

dengan memperhatikan sifat mekanis yang akan dihasilkan setelah proses *heat treatment* T6.

Penurunan biaya produksi dari penggunaan *Casting Design D* tidak menurunkan biaya yang terlalu besar. Penurunan biaya produksi sebesar 2,54% sehingga menjadi Rp 948.858/unit tanpa adanya penambahan Ti dengan *yield* 59,62%. Pengurangan biaya terbesar diperoleh dari biaya material langsung sebesar 29,03% menjadi Rp 250.195/unit akibat dari kenaikan *yield*. Penurunan ini diikuti dengan biaya energi untuk pengecoran dan *heat treatment* sebesar 27,82% menjadi Rp 100.907/unit dengan meningkatnya kapasitas produksi per *batch* dari dapur yang digunakan.

Biaya material tidak langsung untuk *Casting Design D* tidak mengalami penurunan seperti yang terjadi pada *Casting Design A*. Peningkatan sebesar 15,69% menjadi Rp 204.254 yang diperoleh dari peningkatan penggunaan pasir untuk cetakan. Penggunaan pasir yang besar terjadi karena volume cetakannya lebih besar akibat dari belum dioptimasinya proses pembuatan cetakan. Peningkatan efisiensi pasir ke depannya diperkirakan akan dapat menurunkan biaya tidak langsung sehingga biaya tersebut tidak setinggi sekarang. Sejalan dengan *Casting Design A*, peningkatan *yield* yang menyebabkan biaya pekerja dan peralatan meningkat. Perbedaan *yield* yang tidak terlalu nesar antara kedua desain ini menyebabkan jumlah unit yang dihasilkan per *batch* sama. Dengan demikian biaya pekerja dan peralatan pada *Casting Design D* memiliki besar biaya yang sama masing-masing sebesar 324.272/unit dan Rp 69.231/unit.

Dengan adanya Ti sebesar 0,12% biaya ini naik menjadi Rp 957.140/unit karena penambahan biaya Ti sebesar Rp 8.281. Seperti pada *Casting Design A*, penggunaan *casting design* ini tidak mempengaruhi biaya lainnya selain dari biaya material langsung untuk *Casting Design D*. Konsekuensi penambahan biaya ini perlu dipertimbangkan dengan memperhatikan sifat mekanis yang akan dihasilkan setelah proses *heat treatment* T6.

Pada analisis biaya ini ada beberapa faktor-faktor yang dapat menaikkan dan menurunkan biaya produksi. Faktor yang sangat berpengaruh dalam penurunan biaya material langsung adalah besarnya ingot yang digunakan. Semakin sedikit ingot yang digunakan dengan meningkatnya *yield* maka semakin kecil pula biaya yang dikeluarkan. Faktor yang mempengaruhi biaya energi adalah kesesuaian jumlah unit produk yang dihasilkan dengan kapasitas dari dapur yang tersedia. Jumlah unit produk yang mendekati kapasitas produksi memungkinkan efisiensi dari biaya peralatan yang timbul per *batch*.

Faktor yang berperan dalam biaya material tidak langsung sangat terkait dengan biaya cetakan khususnya efisiensi penggunaan pasir. Selain itu, meski tidak terlalu signifikan, peningkatan umur *chill* dan *chill plate* merupakan faktor penting dalam menurunkan biaya produksi mengingat diperlukan investasi awal yang relatif besar. Faktor yang berperan dalam penurunan biaya pekerja adalah peningkatan efisiensi pekerja. Efisiensi ini bisa dicapai dengan meningkatkan kapasitas kerja per hari maupun menurunkan jumlah orang yang terlibat dalam setiap tahapan prosesnya. Faktor yang terkait dengan biaya peralatan adalah kualitas peralatan dan perawatannya. Kedua hal tersebut memegang penting dalam meningkatkan umur dari peralatan yang digunakan. Semakin panjang umur peralatannya maka biaya langsung per unit produknya akan semakin kecil.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Penggunaan perangkat lunak simulasi *casting* “Z-cast versi 2.6” dapat membantu proses modifikasi *casting design* sehingga berbagai fenomena yang terjadi dapat diprediksi. Beberapa fenomena tersebut adalah *hotspots*, kriteria Niyama, dan kecepatan pembekuan yang akan mempengaruhi hasil pengecoran. Meski demikian, pemahaman terhadap desain yang dilakukan secara perhitungan tetap menjadi kunci penting.
2. Peningkatan *yield* produk *cylinder head* dapat dicapai dengan memodifikasi *casting design* awal melalui susunan dan dimensi *riser* (*Casting Design A*). Penggunaan “*chill plate*” untuk meningkatkan *yield* (*Casting Design D*) juga memiliki potensi yang besar dimana peningkatan sifat mekanis pada daerah *dome* dapat juga dicapai.
3. *Yield* dari *casting design* awal sebesar 42,31% yang diperoleh secara eksperimen bisa ditingkatkan menjadi 58,81% melalui *Casting Design A* dan sekitar 59,62% melalui *Casting Design D*.
4. Peningkatan kadar Ti menjadi 0,147% berat terlihat nilai kekerasan cenderung naik begitu juga dengan penggunaan “*chill plate*.” Pada bagian bawah *cylinder head*, nilai kekerasan *Casting Design A* dimana tanpa atau dengan penambahan Ti kekerasannya relatif sama sebesar 57,5 HB. Dengan menggunakan *Casting Design D*, kekerasan bisa mencapai sekitar 59,3 HB dan meningkat menjadi 60,1 HB dengan penambahan Ti. Pada penampang melintang P1 dan D1 juga diamati kecenderungan kekerasan yang naik baik kondisi pengecoran maupun kondisi T6.
5. Penggunaan “*chill plate*” pada *Casting Design D* dapat menurunkan nilai SDAS sementara penambahan Ti tidak terlalu mempengaruhi penurunan nilai SDAS. Nilai SDAS dari *Casting Design A* masih di atas 40 μm sementara dengan *Casting Design D* dapat dicapai hingga di bawah 25 μm . Faktor jenis material cetakan dan temperatur cetakan sangat mempengaruhi nilai SDAS yang dihasilkan.

6. Penambahan Ti meski tidak berpengaruh terhadap penurunan nilai SDAS namun berperan dalam pembentukan dendrit fasa- α yang lebih rapat pada proses *heat treatment* T6. Fasa ini mempengaruhi penyebaran fasa-Si dan fasa intermetalik yang lebih merata sehingga cenderung sifat mekanisnya lebih baik.
7. Peningkatan *yield* juga diimbangi dengan penurunan biaya produksi. Penurunan biaya dapat dicapai hingga: 7,11% dengan menggunakan *Casting Design A*, 6,25% dengan menggunakan *Casting Design A* yang menambahkan 0,12% Ti, 2,54% dengan menggunakan *Casting Design D*, dan 1,69% dengan menggunakan *Casting Design D* yang menambahkan 0,12% Ti.

5.2 Saran

1. Perangkat lunak simulasi *casting* “Z-cast versi 2.6” mungkin dapat memprediksi fenomena dalam pengecoran dengan lebih baik lagi jika beberapa karakteristik material dapat dimasukkan sendiri oleh pengguna.
2. Modifikasi terhadap *Casting Design A* dan D masih bisa terus dikembangkan sehingga diperoleh nilai *yield* yang maksimal khususnya dengan bantuan perangkat lunak simulasi *casting*.
3. Pengembangan SOP pengecoran untuk *Casting Design D* masih bisa dilakukan sehingga produknya bebas dari cacat *blowholes* dan kualitas produknya bisa lebih baik.
4. Penentuan temperatur dan waktu *heat treatment* T6 yang optimal untuk *Casting Design A* dengan penambahan Ti, dan *Casting Design D* dengan atau tanpa penambahan Ti masih perlu dilakukan. Temperatur dan waktu yang digunakan akan dapat lebih rendah dari SOP yang telah ada sehingga dapat menurunkan biaya produksi ke depannya.
5. Karakteristik dari bagian bawah *cylinder head* ini perlu untuk dilakukan beberapa pengujian tambahan untuk mengetahui respon terhadap *thermomechanical fatigue*.
6. Penurunan biaya produksi untuk *Casting Design D* masih terbuka lebar salah satunya dengan meningkatkan efisiensi penggunaan pasir.

DAFTAR PUSTAKA

1. European Aluminium Association, *Aluminium in Commercial Vehicles*, European Aluminium Association AISBL, www.aluminium.org.
2. Alcoa Aluminum Whitepaper, *Aluminum in Autos: Driving Toward a Sustainable Environment*, www.autoaluminum.org.
3. S.W. Hadley, S. Das, J.W. Miller, *Aluminum R&D for Automotive Uses And the Department of Energy's Role, Prepared for the Office of Advanced Automotive Technologies Office of Transportation Technologies*, U.S. Department of Energy, Washington, D.C., March 2000.
4. Simona. "Bmw 555i Will Debut in 2009." TopSpeed, <http://www.topspeed.com/cars/car-news/bmw-555i-will-debut-in-2009-ar56322.html>.
5. Hirsch J., *Automotive Trends in Aluminium - The European Perspective*, Hydro Aluminium Deutschland GmbH,R&D, D-53014 Bonn, Germany, MATERIALS FORUM VOLUME 28 - Published 2004
6. KS Aluminium-Technologie GmbH, *Research and Devolpment*, www.kspg-ag.de, Jerman.
7. Bailey, C., G. A. Taylor, S.M. Bounds, G Moran, M. Cross, *PHYSICA: A Multiphysics Computational Framework and its Application to Casting Simulations*, Inter Conf. On CFD in Mineral & Metal Processing and Power Generation, CSIRO 1997.
8. Pusat Pengkajian dan Penerapan Teknologi Material BPPT, *Laporan Akhir Pekerjaan Tahun 2004*, Proyek Riset Unggulan Strategis Nasional (RUSNAS) Kementerian Negara Riset dan Teknologi, Desember 2004.
9. Pusat Pengkajian dan Penerapan Teknologi Material BPPT, *Laporan Akhir Pekerjaan Tahun 2005*, Proyek Riset Unggulan Strategis Nasional (RUSNAS) Kementerian Negara Riset dan Teknologi, Desember 2005.
10. Pusat Teknologi Material BPPT, *Laporan Akhir Pekerjaan Tahun 2007*, Proyek Riset Unggulan Strategis Nasional (RUSNAS) Kementerian Negara Riset dan Teknologi, Desember 2007.
11. Tim Penyusun, *Laporan Akhir Studi Pasar dan Model Bisnis Engine RUSNAS 500cc*, PT Tesaputra Adiguna, 2008.
12. Tim RUSNAS PEAP, *Gambar Desain dan Casting Design untuk Cylinder Head Engine RUSNAS 500cc*, 2009.

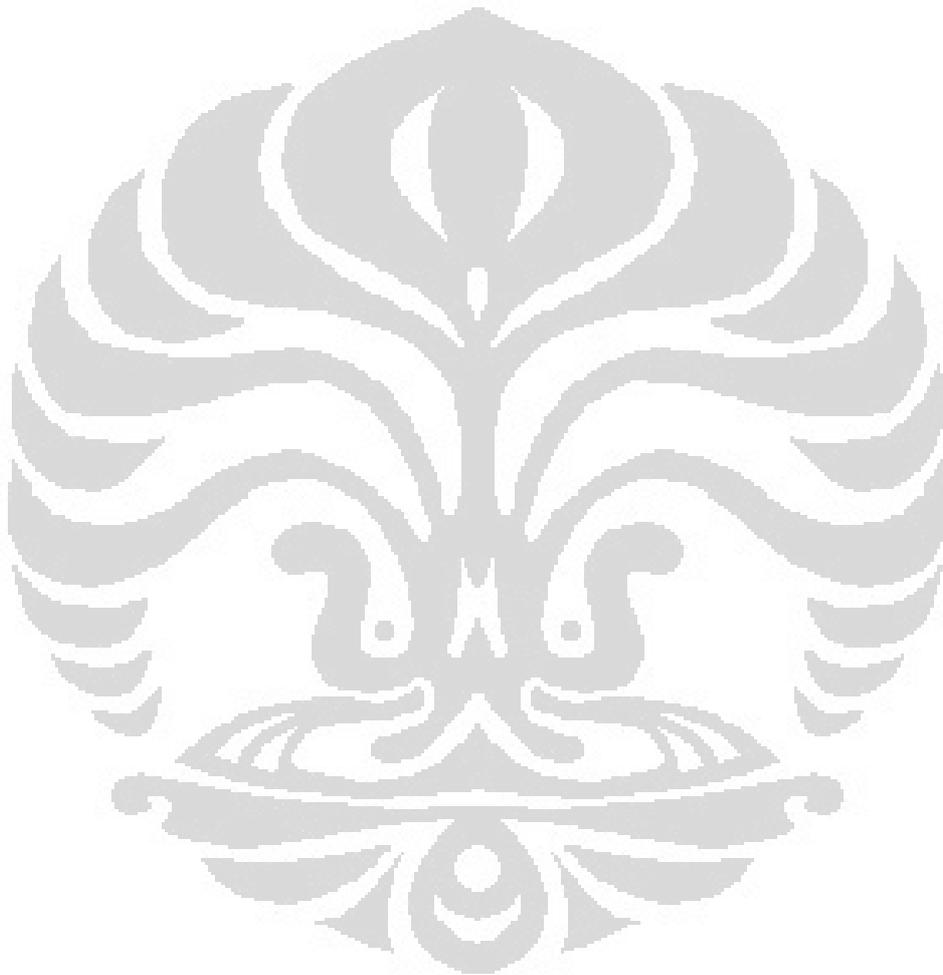
13. How the engine works,
www.procarcare.com/icarumba/resourcecenter/encyclopedia/icar_resourcecenter_encyclopedia_engine1.asp
14. Jelena Pavlovic-Krstic, *Impact of casting parameters and chemical composition on the solidification behaviour of Al-Si-Cu hypoeutectic alloy*, Disertasi, Genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau, der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 19.03.2010.
15. W.W. Bose-Filho, E.R. de Freitas, V.F. da Silva, M.T. Milan, D. Spinelli. "Al-Si Cast Alloys under Isothermal and Thermomechanical Fatigue Conditions." *International Journal of Fatigue* 29 (2007): 9.
16. L.A. Dobrzański, R. Maniara, J.H. Sokolowski, *The effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of AC AlSi9Cu alloy*, Archives of Materials Science and Engineering, Volume 28, Issue 2, February 2007, Pages 105-112.
17. L.A. Dobrzański, W. Borek, R. Maniara, *Influence of the crystallization condition on Al-Si-Cu casting alloys structure*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, www.journalamme.org, Volume 18 Issue 1-2 September-October 2006, Pages 211-214.
18. J. Pavlović-Krstić, R. Bähr, G. Krstić, S. Putić, *The Effect of Mould Temperature and Cooling Conditions on The Size of Secondary Dendrite Arm Spacing in Al-7Si-3Cu Alloy*, Association of Metallurgical Engineers of Serbia, Scientific paper UDC: 620.18:669.71, MJOM Vol 15 (2) 2009 p. 105-113.
19. B. Zhang, M. Garro, C. Tagliano, *Dendrite Arm Spacing in Aluminium Alloy Cylinder Heads Produced by Gravity Semi-Permanent Mold*, Metallurgical Science and Technology, Vol. 21 No. 1, June 2003
20. X. Zhu, A. Shyam, J.W. Jones, H. Mayer, J.V. Lasecki, J.E. Allison. "Effects of Microstructure and Temperature on Fatigue Behavior of E319-T7 Cast Aluminum Alloy in Very Long Life Cycles." *International Journal of Fatigue* 28 (2006): 6.
21. Beckermann, Kent D. Carlson And Christoph. "Prediction of Shrinkage Pore Volume Fraction Using a Dimensionless Niyama Criterion." *Metallurgical And Materials Transactions A* Volume 40A, no. January 2009 (2009): 13.
22. Incorporated, Finite Solutions. "Solidcast: PC-Based Casting Process Simulation Software." In Training Course Workbook Finite Solutions Incorporated, 2010.
23. E. Liotti, B. Previtali. "Study of the Validity of the Niyama Criteria Function Applied to the Alloy AlSi7Mg." *la metallurgia italiana* (2006): 5

24. Sturm J.C., "Optimisation – Integration – Casting Property Prediction: The new role of casting simulation for the competitiveness of castings," WFC_congr_paper_2004_JCSturm.doc.
25. Butnaciuc, Dorel, "Casting and Solidification Simulation of Ot550-2 Roller", *Metalurgia International* Vol. XIV (2009) special issue no. 16 81.
26. Tavakoli R., P. Davami, "Optimal riser design in sand casting process with evolutionary topology optimization," DOI 10.1007/s00158-008-0282-z, *Struct Multidisc Optim* (2009) 38:205–214, Springer-Verlag 2008.
27. Salem Seifeddine, Magnus Wéssen and Ingvar L Svensson. "Use of Simulation to Predict Microstructure and Mechanical Properties in an as-Cast Aluminium Cylinder Head – Comparison with Experiments." *Metallurgical Science and Technology* (2006): 7.
28. Kotas P., C. Tutum, J. Hattel, O. Snajdrova, J. Thorborg, "A Casting Yield Optimization Case Study: Forging Ram," *International Journal of Metalcasting*, American Foundry Society, Fall 2010.
29. Avner, Sidney H., *Introduction to Physical Metallurgy*, McGraw-Hill, Inc., 2nd ed., 1974.
30. Kaufman, J. Gilbert, Elwin L. Rooy, *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*, ASM Int'l-American Foundry Society, 2005.
31. The Aluminum Association, Inc., *Aluminum Alloy Selection and Applications*, www.aluminum.org, Washington, D.C., December, 1998.
32. R. S. Rana, Rajesh Purohit, and S Das. "Reviews on the Influences of Alloying Elements on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloys and Aluminum Alloy Composites." *International Journal of Scientific and Research Publications* 2, no. 6 (2012): 7.
33. Committee, Handbook. *Metals Handbook* 15 vols. Vol. Casting: ASM International, 1988. Reprint, Fourth printing, March 1998.
34. M. Di Sabatino, L. Arnberg. "A Review on the Fluidity of Al Based Alloys." *Metallurgical Science and Technology* (2006): 7.
35. Jorstad, J. L., Wayne M. Rasmussen, Donna L. Zalensas, *Aluminum Casting Technology*, 2nd ed., American Foundry Society, Illinois, 2001.
36. Committee, Handbook. *Metals Handbook* 4vols. Vol. Heat Treating: ASM International, 1991. Reprint, Third Printing (1995).
37. Sjölander, Emma. "Heat Treatment of Al-Si-Cu-Mg Casting Alloys." Dissertation, School Of Engineering, Jönköping University, 2011.

38. P. Moldovan, Gabriela Popescu, M. Buțu. "Heat Treatment of Al-7Si-0.3Mg Alloy Previously Inoculated with a New Type of Quaternary Master Alloy." *U.P.B. Sci. Bull., Series B* 69, no. No. 2 (2007): 8.
39. E. Tillová, M. Panuková. "Effect of Solution Treatment on Intermetallic Phases Morphology in AlSi9Cu3 Cast Alloy." *Metallurgija - Journal of Metallurgys* 47, No. 3 (2008): 5.
40. M. Panušková, E. Tillová, M. Chalupová. "Relation between Mechanical Properties and Microstructure of Cast Aluminum Alloy AlSi9Cu3." *Strength of Materials* 40, no. 1 (2008): 5.
41. JIS Handbook, *Non-Ferrous Metals & Metallurgy*, Japanese Standards Association, 2002,
42. Heneken, s.r.o. "Company Profile." 5. Bratislava, 2009.
43. "Technical Information: Aluminium Specifications." edited by Limatherm Sp. z o.o., 2. Limanowa, 2006.
44. "Uni En 1676 and 1706." In *EN AB and AC 46200 - Al Si 8 Cu 3*, edited by Raffmetal S.p.a, 2010.
45. Ye, Haizhi, "An Overview of the Development of Al-Si-Alloy Based Material for Engine Applications," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 12(3) June 2003.
46. ASM International, *CASTING DESIGN AND PERFORMANCE*, www.asminternational.org, Materials Park, Ohio, November 2009.
47. Nikolay A. Belov, Dmitry G. Eskin, Andrey A. Aksenov. *Multicomponent Phase Diagrams: Applications for Commercial Aluminium Alloys*: Elsevier Science
48. Brown, John R. "Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook." ed John R. Brown Butterworth Heinemann, 1999
49. Campbell, J., *Castings Practice: The 10 Rules of Castings*, ISBN 07506-4791-4, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004
50. Kalpakjian, S., Steven Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, 5th ed. In SI Unit, Bab 10, 11, 12, Pearson Education South Asia Pte Ltd, 2006.
51. Nicolas Perry, Magali Mauchand, Alain Bernard. "Costs Models in Design and Manufacturing of Sand Casting Products." In *IDMME*, 10. Bath, UK, 2004.
52. R. G. Chougule, B. Ravi. "Casting Cost Estimation in an Integrated Product and Process Design Environment." *IJCIM* (2005): 19.

53. Colás, R., A. Rodríguez, J. Talamantes, and S. Valtierra. 2004. "Solidification analysis of aluminium engine block." *International Journal of Cast Metals Research* 17, no. 6: 332-338. *Academic Source Complete*, EBSCOhost (accessed January 14, 2011).
54. Meneghini, A., L. Tomesani, "Chill material and size effects on HTC evolution in sand casting of aluminum alloys," *Journal of Materials Processing Technology* 162–163 (2005) 534–539, doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.02.114, Elsevier, 2005
55. Technologies, Office of Industrial. "Metal Casting: Mold Materials for Permanent Molding of Aluminum Alloys." In *Material and Coating Improvements Target Increased Life-Span and Reduced Cost Of Permanent Molds*. Washington, D.C.: Office of Industrial Technologies Energy Efficiency and Renewable Energy, August 2000.
56. Inc., Rio Tinto Iron & Titanium. "Section Two: Riser System Design." 32. Montreal, September 2000.
57. Tjitro, Soejono. "Pengaruh Bentuk Riser Terhadap Cacat Penyusutan Produk Cor Aluminium Cetakan Pasir." *Jurnal Teknik Mesin* Volume 3 Nomor 2 (2001): 6.
58. Juwita, Ratna. "Pengaruh Waktu Aging Pada Temperatur 180 Oc Terhadap Kekerasan Dan Morfologi Struktur Mikro Pada Paduan Aluminium AA 333 Hasil Proses Sand Casting." Skripsi, Universitas Indonesia, 2006.
59. Uliana, Ari. "Pengaruh Temperatur Aging Terhadap Nilai Kekerasan Dan Morfologi Struktur Mikro Paduan Aluminium AA 333 Hasil Sand Casting." Skripsi, Universitas Indonesia, 2006.
60. Team, Aleris. "Aluminium Casting Alloy." edited by Aleris Recycling (German Works) GmbH, 102. Grevenbroich · Germany: Aleris Switzerland GmbH, 2011.
61. Chastain, Stephen D. *Metal Casting: A Sand Casting Manual for the Small Foundry Vol. Ii*. Vol. Volume IV. Jacksonville, Florida, 2004
62. Muenprasertdee, Piyapong. "Solidification Modeling of Iron Castings Using Solidcast." West Virginia University, 2007.
63. E. Tillová, M. Chalupová, L. Hurtalová, M. Bonek, L.A. Dobrzański. "Structural Analysis of Heat Treated Automotive Cast Alloy." *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 47, no. 1 July 2011 (2011): 7.
64. Rashid, AKMB. "The Treatment of Liquid Aluminium-Silicon Alloys." In *7. Grain Refinement*. BUET, Dhaka: Department of MME, 2010.

65. E. Sjölander, S. Seifeddine. "Optimisation of Solution Treatment of Cast Al–Si–Cu Alloys." *Materials and Design* 31 (2010): S44-S49.
66. Wu Xin, Han Fei, Wang Wei-wei. "Effects of Solution Treatment and Aging Process on Microstructure Refining of Semi-Solid Slurry of Wrought Aluminum Alloy 7a09." *Transaction of Nonferrous Metals Society of China* 19 (2009): 6.



**Lampiran 1: Laporan Pengujian Komposisi Kimia
Cylinder Head Produksi 2010**



FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL

KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA
Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA
COMPOSITION TEST REPORT

Page 1 of 1

No Laporan <i>Report Nr</i>	0286	Bahan <i>Material</i>	Aluminium	
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Giri Wahyu Alam	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	Code: AC4B	
Alamat <i>Address</i>	Departemen Metalurgi dan Material FT UI	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	15 Maret 2012	
No Kontrak <i>Contract Nr.</i>	0286/PT.02/FT04/P/2012	Standar <i>Standard</i>	ASTM A751	
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	20 Maret 2012	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Optical Emission Spectrometer*	

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Zn (%)
AC4B	10.4	1.02	2.60	0.293	0.151	0.906
	Cr (%)	Ni (%)	Ti (%)	Pb (%)	Sn (%)	Al (%)
	0.027	0.083	0.026	0.080	0.030	Bal.

catatan :
* ketidakpastian bentangan dengan tingkat kepercayaan 95% dengan factor cakupan K=2

Depok, 21 Maret 2012
Manajer Teknis
Laboratorium Uji
Departemen Teknik Metalurgi Dan Material



(Ahmad Ashari, ST)

FF-25/ LU-DTMM Rev 2

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sample yang diuji di Laboratorium Uji-DTMM; publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji-DTMM

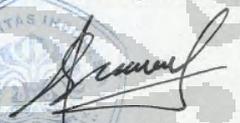
**Lampiran 2: Laporan Pengujian Kekerasan Daerah *Dome* dari
Cylinder Head Produksi 2010**

		FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA LABORATORIUM UJI DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL <small>KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA</small> <small>Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 7872350, 78888111</small> <small>E-mail : lum@metal.ui.ac.id</small>		
		LAPORAN PENGUJIAN KEKERASAN HARDNESS TEST REPORT <small>Page 2 of 2</small>		
No Laporan	230	Bahan	Aluminium	
Report Nr		Material		
Pemakai Jasa	Giri Wahyu Alam - DTMM	Identitas Bahan	Code: AC4B (sampel lebar)	
Customer		Material Identity		
Alamat	Departemen Teknik Metalurgi dan Material	Tanggal Terima	15 Maret 2012	
Address		Receiving Date		
No Kontrak	0286/PT.02/FT04/P/2012	Standar	ASTM E18	
Contract Nr.		Standard		
Tanggal Uji	8 Mei 2012	Mesin Uji	Rockwell Hardness Testing Machine	
Date of Test		Testing machine		

Kode Sampel Sample Code	Penyejakan Indentation	Kekerasan Rockwell Rockwell Hardness	Rata-rata Average	Keterangan Remarks
AC4B (sampel lebar)	I	39	39	HRB Load: 100 Kgf
	II	38.7		
	III	39.8		
	IV	36.8		
	V	39.5		

Catatan:
* ketidakpastian standar blok uji dengan tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan K=2

Depok, 9 Mei 2012
Manajer Teknis
Laboratorium Uji
Departemen Teknik Metalurgi Dan Material


 (Ahmad Ashari, ST)

FF-24/ LU-DTMM Rev 2

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sample yang diuji di Laboratorium Uji-DTMM; publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji-DTMM

**Lampiran 3: Laporan Pengujian Kekerasan Daerah Dasar dari
Cylinder Head Produksi 2010**

		FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA LABORATORIUM UJI DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax: 021 – 7872350, 78888111 E-mail : lum@metalui.ac.id			
LAPORAN PENGUJIAN KEKERASAN HARDNESS TEST REPORT Page 1 of 2					
No Laporan	230	Bahan	Aluminium		
<i>Report Nr</i>		<i>Material</i>			
Pemakai Jasa	Giri Wahyu Alam - DTMM	Identitas Bahan	Code: AC4B (sampel kecil)		
<i>Customer</i>		<i>Material Identity</i>			
Alamat	Departemen Teknik Metalurgi dan Material	Tanggal Terima	15 Maret 2012		
<i>Address</i>		<i>Receiving Date</i>			
No Kontrak	0286/PT.02/FT04/P/2012	Standar	ASTM E18		
<i>Contract Nr</i>		<i>Standard</i>			
Tanggal Uji	8 Mei 2012	Mesin Uji	Rockwell Hardness Testing Machine		
<i>Date of Test</i>		<i>Testing machine</i>			

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	Penjejakan <i>Indentation</i>	Kekerasan Rockwell <i>Rockwell Hardness</i>	Rata-rata <i>Average</i>	Keterangan <i>Remarks</i>
AC4B (sampel kecil)	I	51.8	51	HRB Load: 100 Kgf
	II	52.8		
	III	49.1		
	IV	51.3		
	V	50.2		

Catatan:
* ketidakpastian standar blok uji dengan tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan K=2

Depok, 9 Mei 2012
 Manajer Teknis
 Laboratorium Uji
 Departemen Teknik Metalurgi Dan Material

 (Ahmad Ashari, ST)

FF-24/ LU-DTMM Rev 2

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sample yang diuji di Laboratorium Uji-DTMM; publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji-DTMM

**Lampiran 4: Laporan Pengujian Struktur Mikro *Dome* Dasar dari
Cylinder Head Produksi 2010**

 <p align="center">FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA LABORATORIUM UJI DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL <small>KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA</small> Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id</p>			
<p>LAPORAN PENGUJIAN STRUKTUR MIKRO MICROSTRUCTURE TEST REPORT <small>Page 2 of 4</small></p>			
No Laporan <i>Report Nr</i>	0286	Bahan <i>Material</i>	Al-Si-Cu Alloys
Pemakai Jasa <i>Costumer</i>	Giri Wahyu Alam	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	A
Alamat <i>Address</i>	DTMM FTUI	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	15 Maret 2012
No Kontrak <i>Contract Nr.</i>	0286/PT.02/FT04/P/2012	Standar <i>Standard</i>	ASTM E407-99
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	9 Mei 2012	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Olympus Microscope
Kode Sampel : <i>Sample Code</i>	A	Etsa : <i>Etching</i>	0.5% HF + HNO ₃
Lokasi foto : <i>Picture's location</i>	Penampang	Keterangan: <i>Remarks</i>	-
Perbesaran : <i>Magnification</i>	500X		
<p>Depok, 11 Mei 2012 Manajer Teknis Laboratorium Uji Departemen Teknik Metalurgi Dan Material</p>  (Ahmad Ashari, ST)			
<p><small>Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sample yang diuji di Laboratorium Uji-DTMM; publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji-DTMM</small></p>			

Lampiran 4: Laporan Pengujian Struktur Mikro Daerah *Dome* dari
Cylinder Head Produksi 2010 (Lanjutan)



FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL
KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA
Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

LAPORAN PENGUJIAN STRUKTUR MIKRO
MICROSTRUCTURE TEST REPORT
Page 1 of 4

No Laporan <i>Report Nr</i>	0286	Bahan <i>Material</i>	Al-Si-Cu Alloys
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Giri Wahyu Alam	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	A
Alamat <i>Address</i>	DTMM FTUI	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	15 Maret 2012
No Kontrak <i>Contract Nr.</i>	0286/PT.02/FT04/P/2012	Standar <i>Standard</i>	ASTM E407-99
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	9 Mei 2012	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Olympus Microscope

Kode Sampel : <i>Sample Code</i>	A	Etsa : <i>Etching</i>	0.5% HF + HNO ₃
Lokasi foto : <i>Picture's location</i>	Penampang	Keterangan: <i>Remarks</i>	
Perbesaran : <i>Magnification</i>	100X		



Depok, 11 Mei 2012
Manajer Teknis
Laboratorium Uji
Departemen Teknik Metalurgi Dan Material



(Ahmad Ashari, ST)

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sample yang diuji di Laboratorium Uji-DTMM; publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji-DTMM.

Lampiran 5: Laporan Pengujian Struktur MikroDaerah Dasar dari
Cylinder Head Produksi 2010



FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL
KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA
Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id

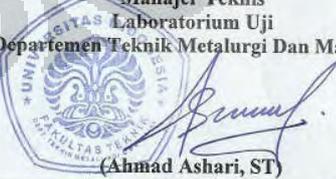
LAPORAN PENGUJIAN STRUKTUR MIKRO
MICROSTRUCTURE TEST REPORT
Page 1 of 4

No Laporan <i>Report Nr</i>	0286	Bahan <i>Material</i>	Al-Si-Cu Alloys
Pemakai Jasa <i>Costumer</i>	Giri Wahyu Alam	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	B
Alamat <i>Address</i>	DTMM FTUI	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	15 Maret 2012
No Kontrak <i>Contract Nr.</i>	0286/PT.02/FT04/P/2012	Standar <i>Standard</i>	ASTM E407-99.
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	9 Mei 2012	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Olympus Microscope

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	B	Etsa <i>Etching</i>	0.5% HF + HNO ₃
Lokasi foto <i>Picture's location</i>	Penampang	Keterangan: <i>Remarks</i>	-
Perbesaran <i>Magnification</i>	500X		



Depok, 11 Mei 2012
Manajer Teknis
Laboratorium Uji
Departemen Teknik Metalurgi Dan Material



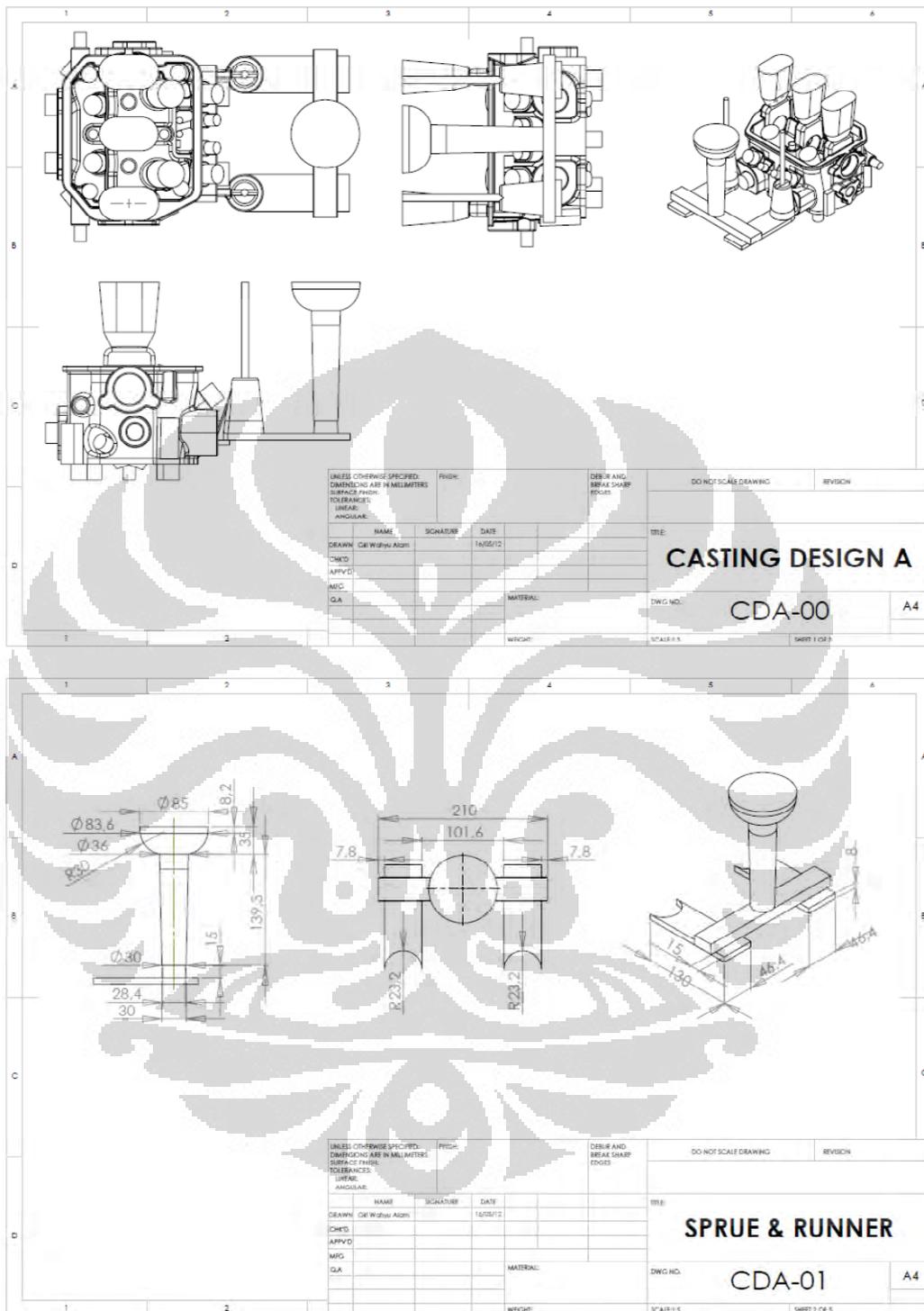
(Ahmad Ashari, ST)

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sample yang diuji di Laboratorium Uji-DTMM, publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji-DTMM

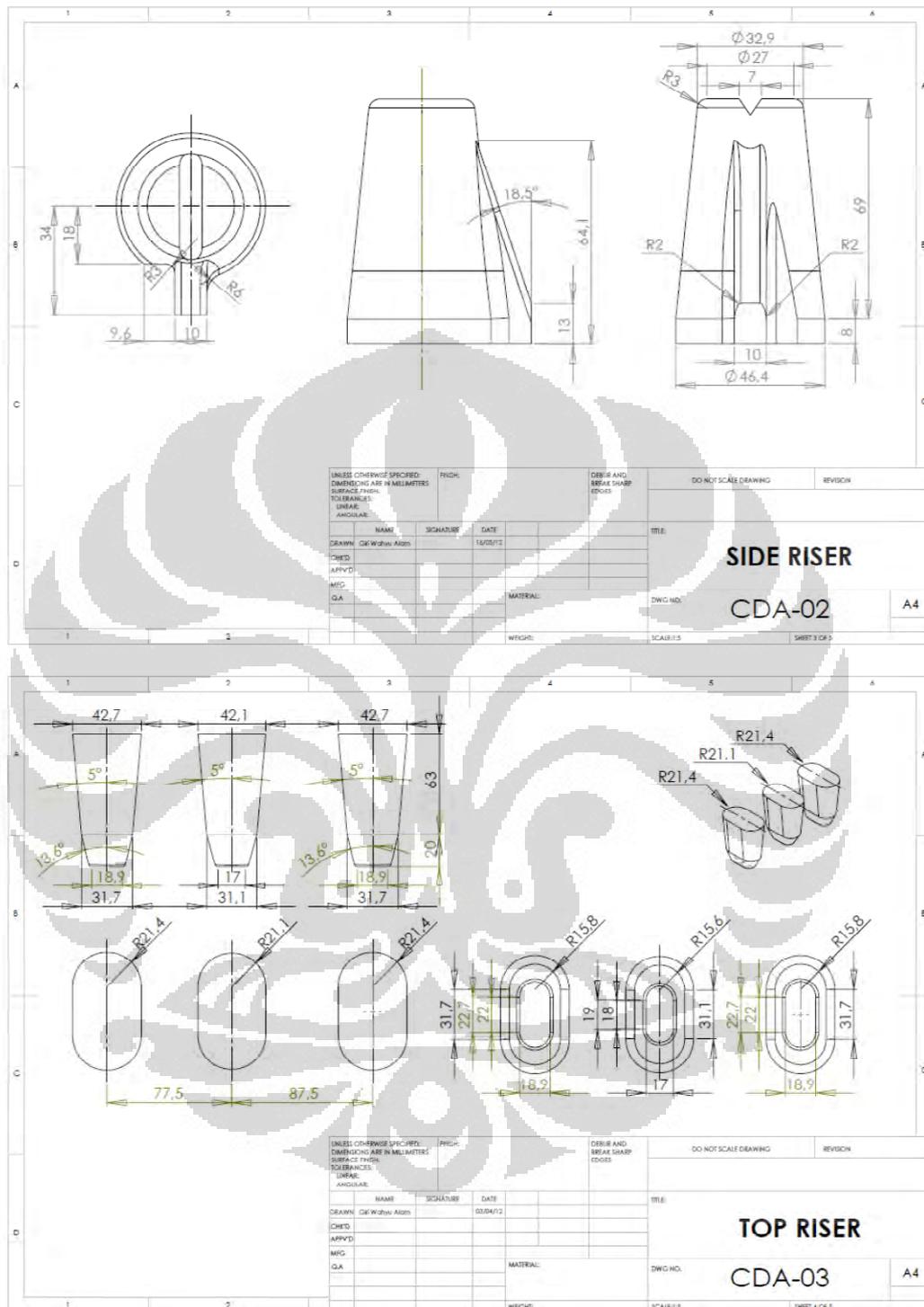
Lampiran 5: Laporan Pengujian Struktur Mikro Daerah Dasar dari
Cylinder Head Produksi 2010 (Lanjutan)

		FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA LABORATORIUM UJI DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL <small>KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA</small> Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888111 E-mail : lum@metal.ui.ac.id	
		LAPORAN PENGUJIAN STRUKTUR MIKRO MICROSTRUCTURE TEST REPORT <small>Page 3 of 4</small>	
No Laporan <i>Report Nr</i>	0286	Bahan <i>Material</i>	Al-Si-Cu Alloys
Pemakai Jasa <i>Costumer</i>	Giri Wahyu Alam	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	B
Alamat <i>Address</i>	DTMM FTUI	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	15 Maret 2012
No Kontrak <i>Contract Nr.</i>	0286/PT.02/FT04/P/2012	Standar <i>Standard</i>	ASTM E407-99.
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	9 Mei 2012	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Olympus Microscope
Kode Sampel : <i>Sample Code</i>	B	Etsa : <i>Etching</i>	0.5% HF + HNO ₃
Lokasi foto : <i>Picture's location</i>	Penampang	Keterangan: <i>Remarks</i>	-
Perbesaran : <i>Magnification</i>	100X		
Depok, 11 Mei 2012 Manajer Teknis Laboratorium Uji Departemen Teknik Metalurgi Dan Material  (Ahmad Ashari, ST)			
<small>Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sample yang diuji di Laboratorium Uji-DTMM; publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji-DTMM</small>			

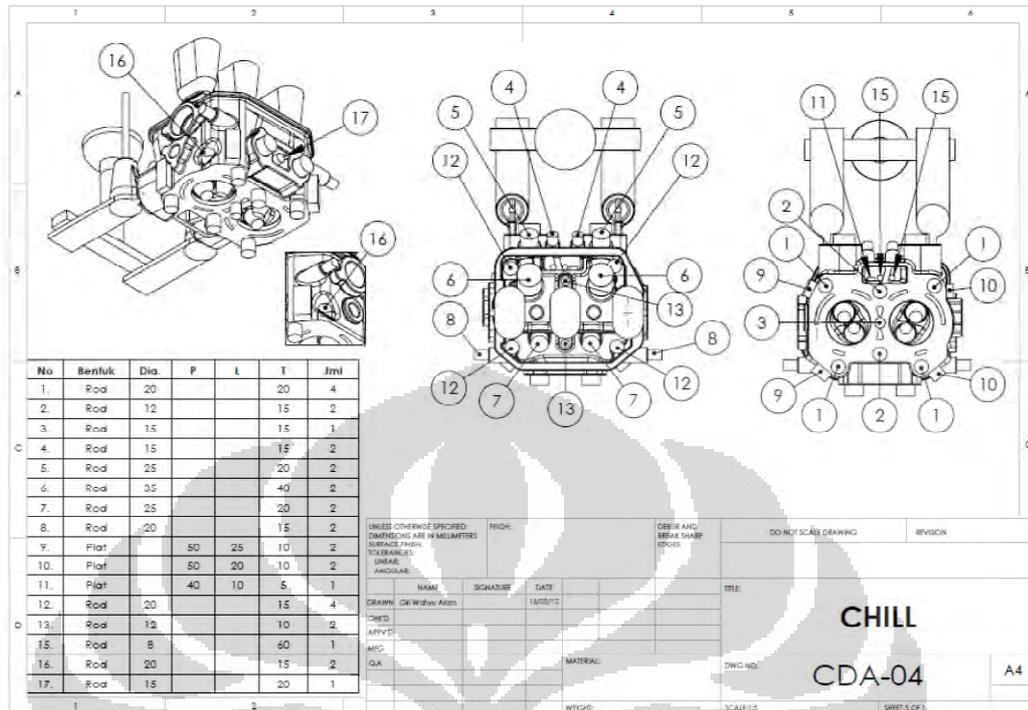
Lampiran 6: Detail Casting Design A



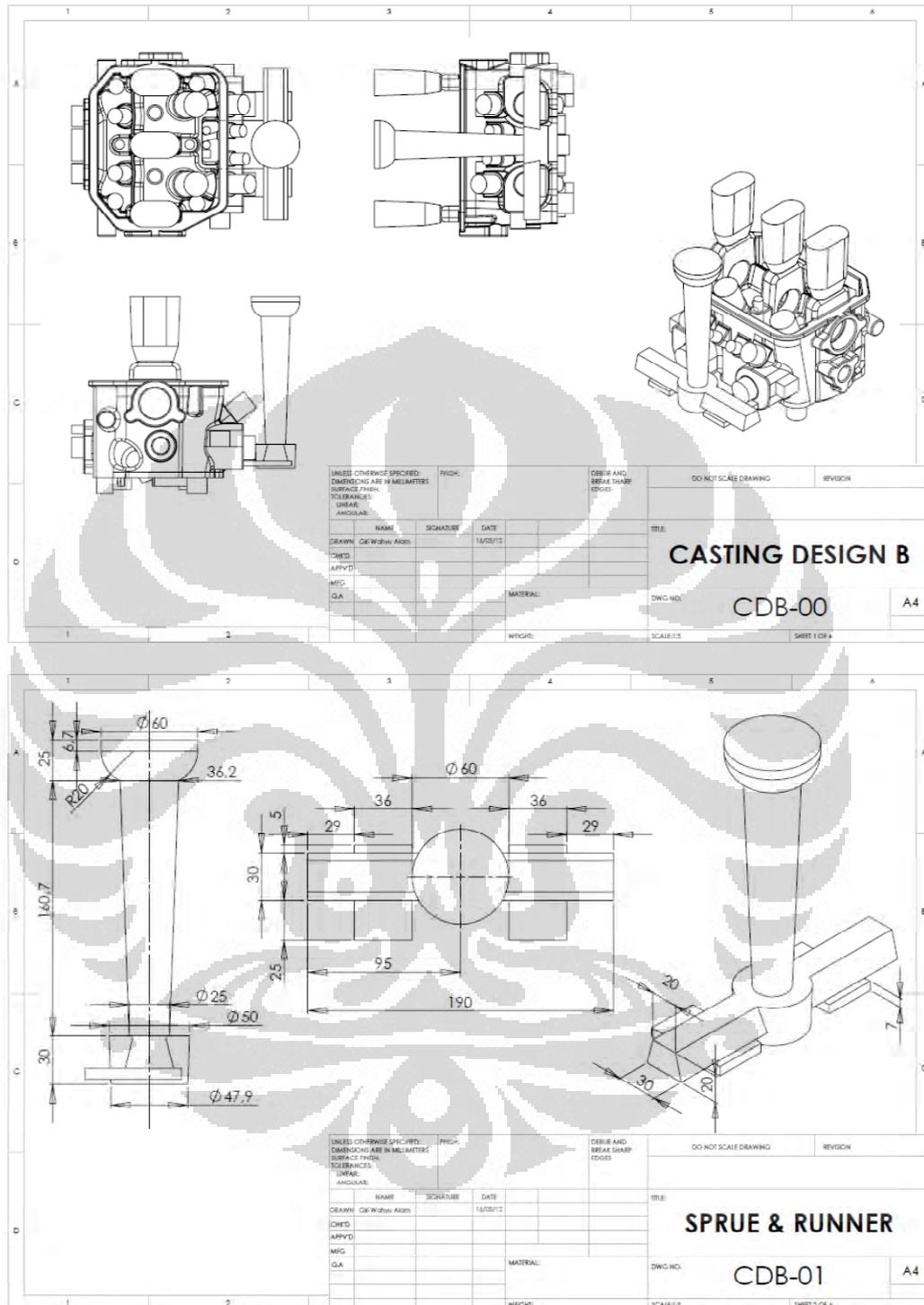
Lampiran 6: Detail Casting Design A (Lanjutan)



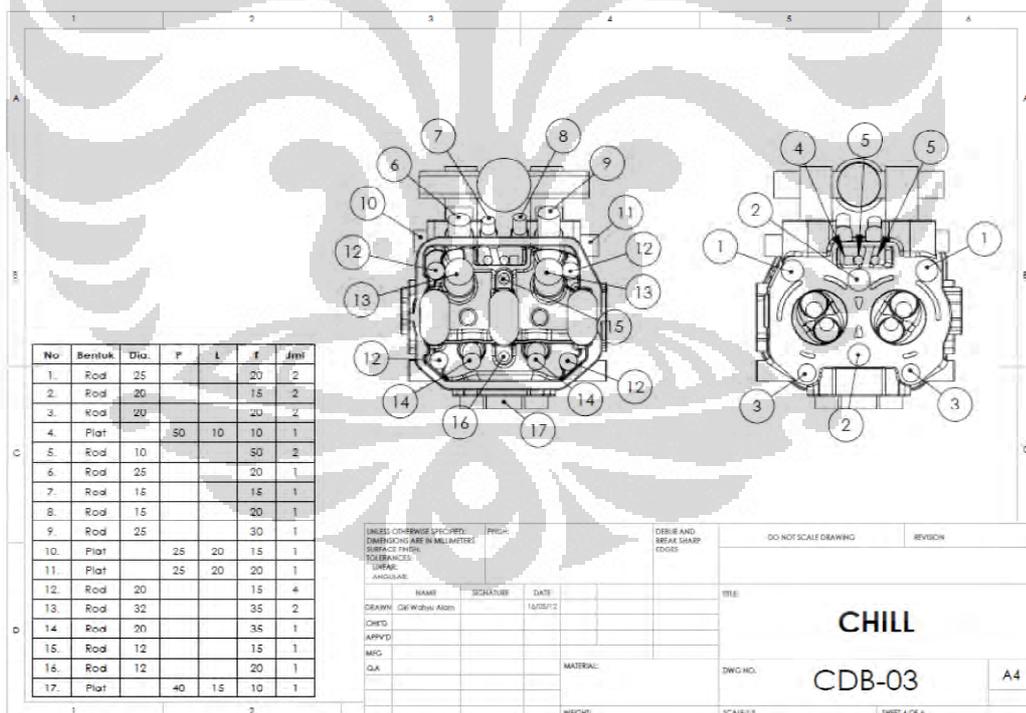
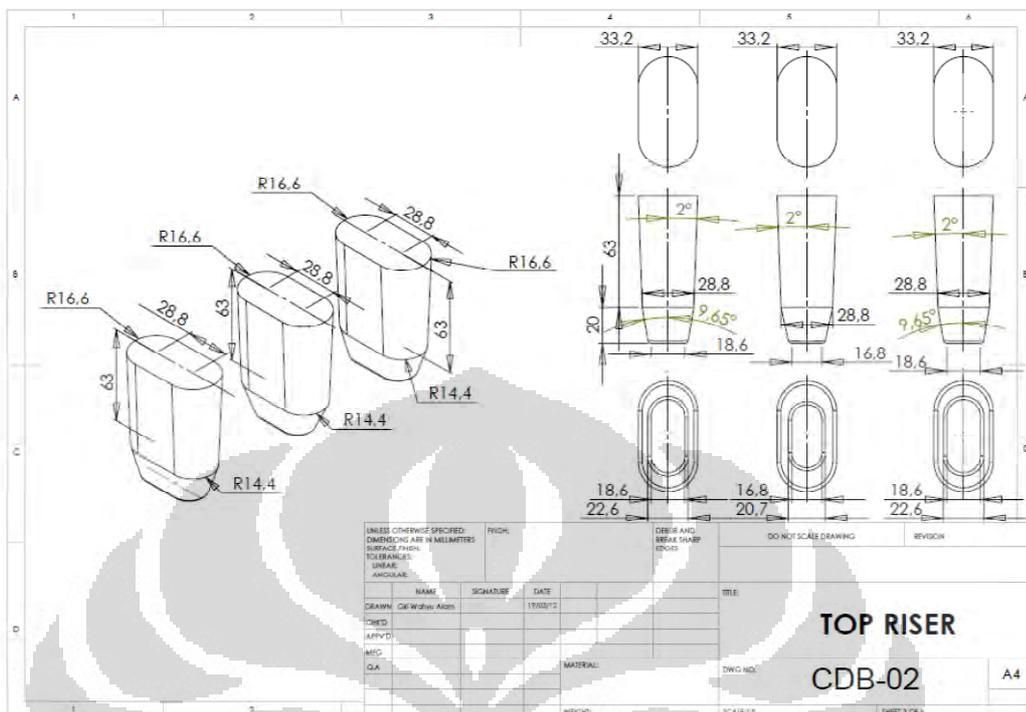
Lampiran 6: Detail Casting Design A (Lanjutan)



Lampiran 7: Detail Casting Design B

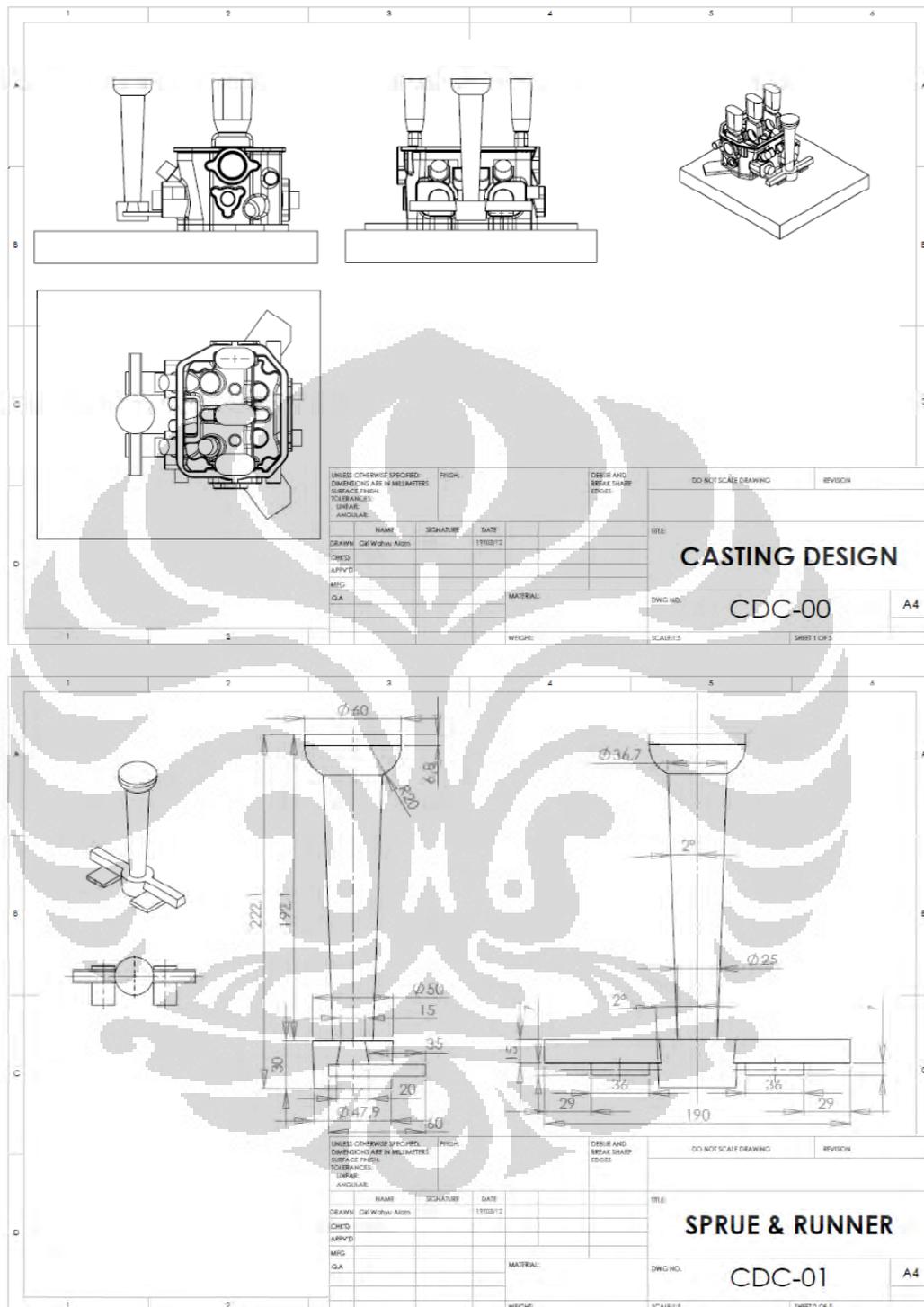


Lampiran 7: Detail Casting Design B (Lanjutan)

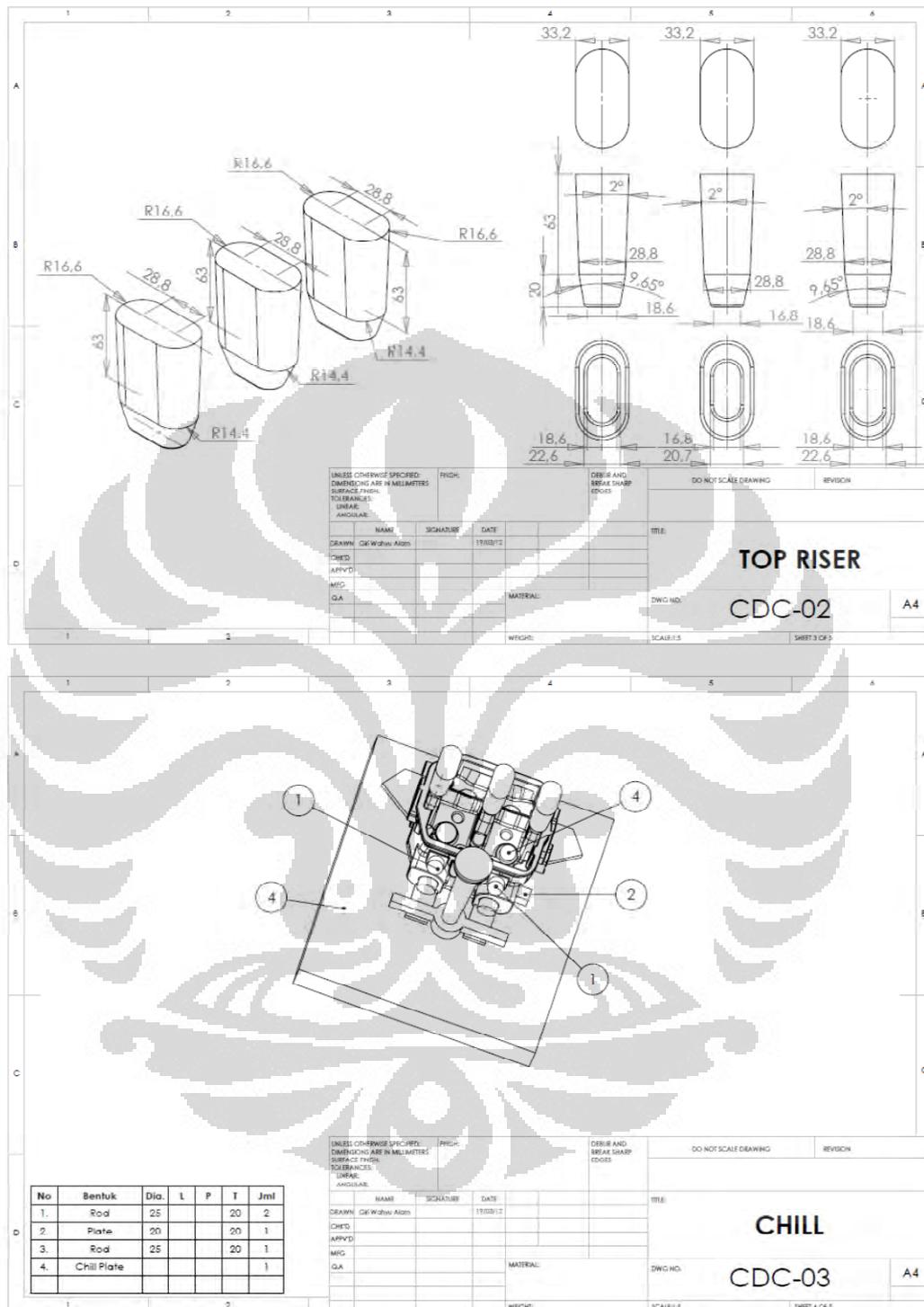


No	Bentuk	Dia.	P	L	f	Jml
1.	Rod	25			20	2
2.	Rod	20			15	2
3.	Rod	20			20	2
4.	Plat		50	10	10	1
5.	Rod	10			50	2
6.	Rod	25			20	1
7.	Rod	15			15	1
8.	Rod	15			20	1
9.	Rod	25			30	1
10.	Plat		25	20	15	1
11.	Plat		25	20	20	1
12.	Rod	20			15	4
13.	Rod	32			35	2
14.	Rod	20			35	1
15.	Rod	12			15	1
16.	Rod	12			20	1
17.	Plat		40	15	10	1

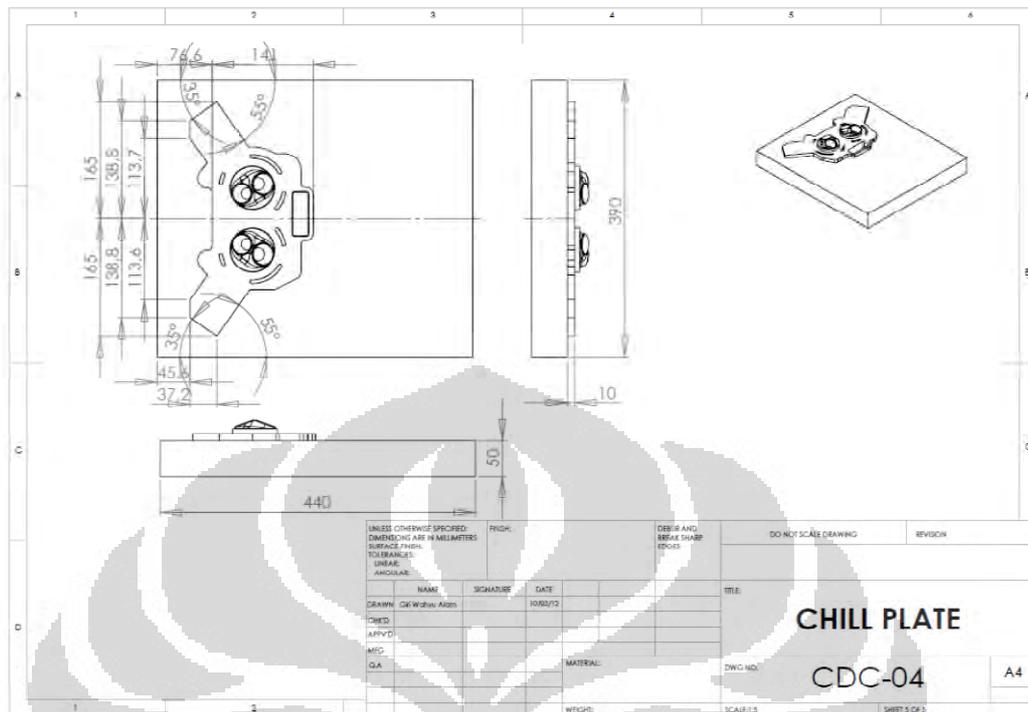
Lampiran 8: Detail Casting Design C



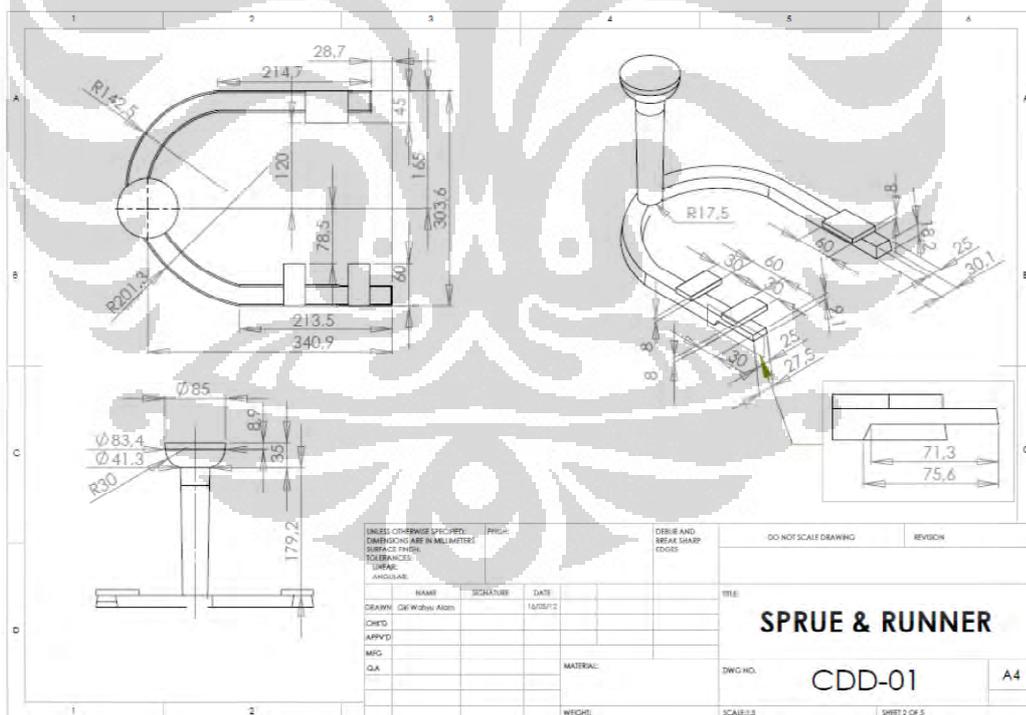
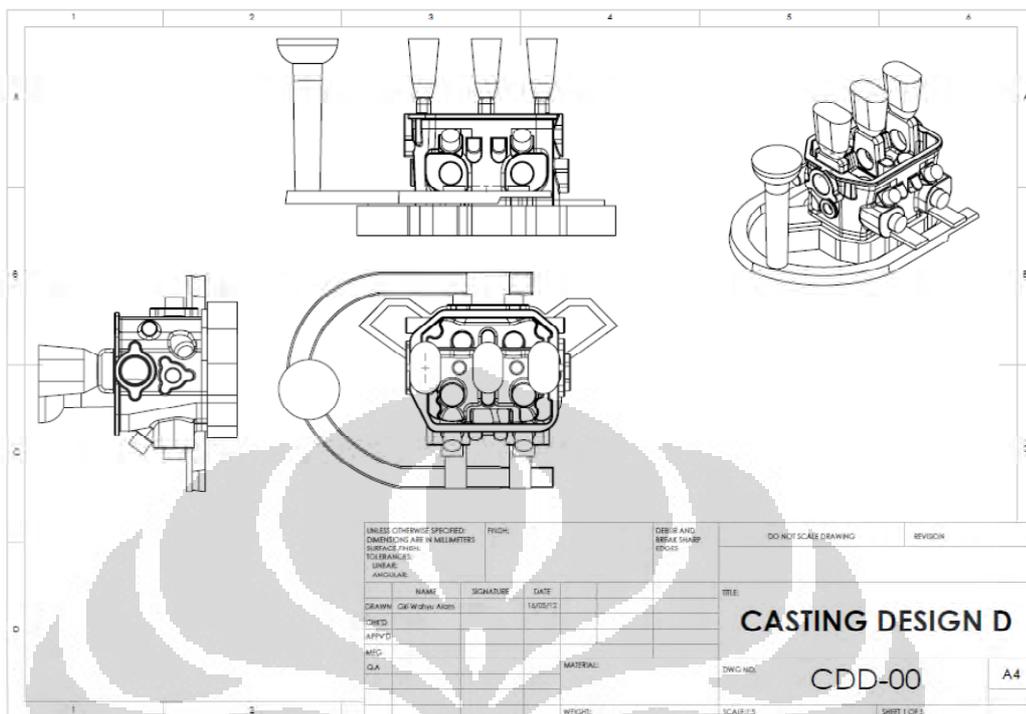
Lampiran 8: Detail Casting Design C (Lanjutan)



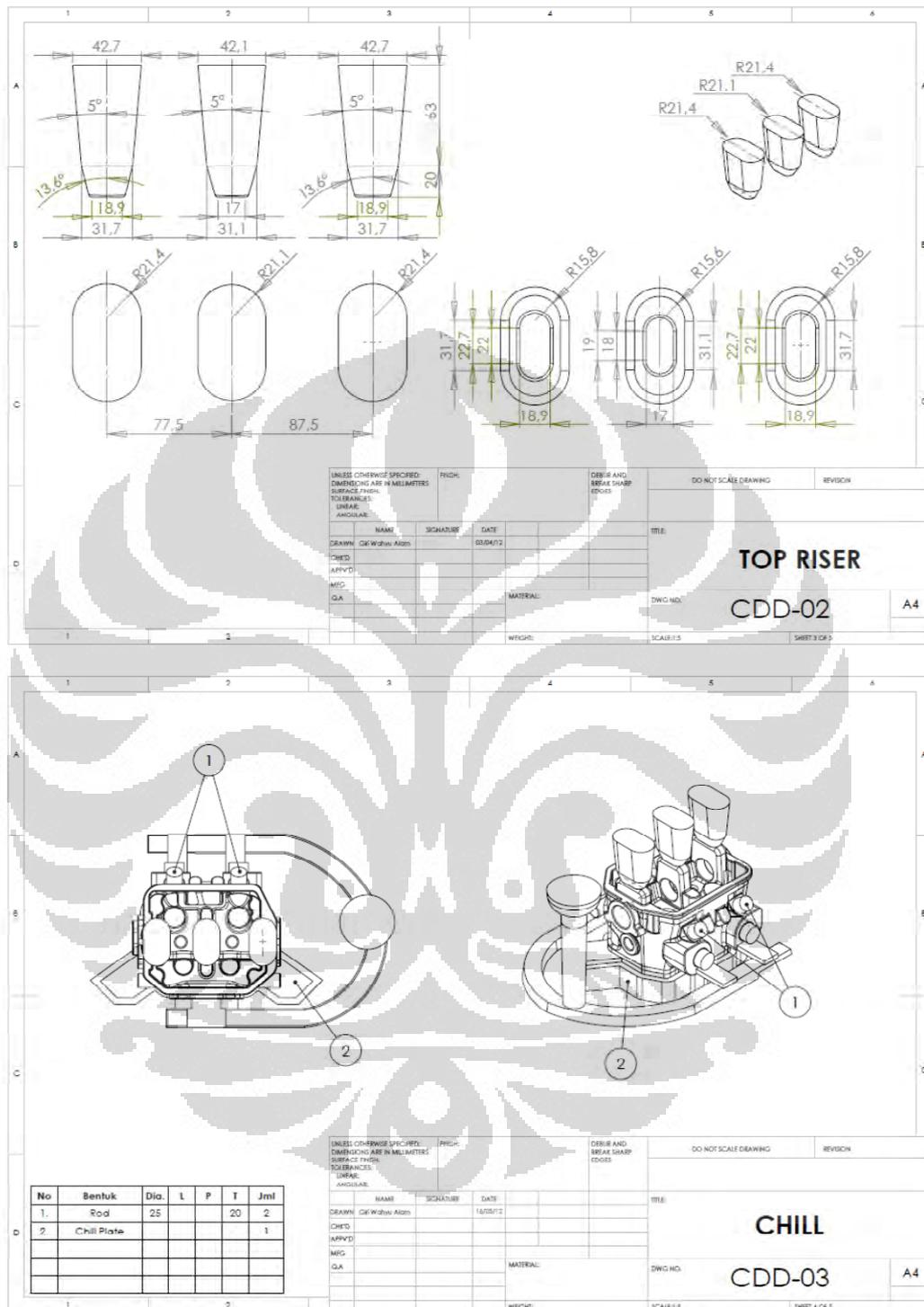
Lampiran 8: Detail *Casting Design C* (Lanjutan)



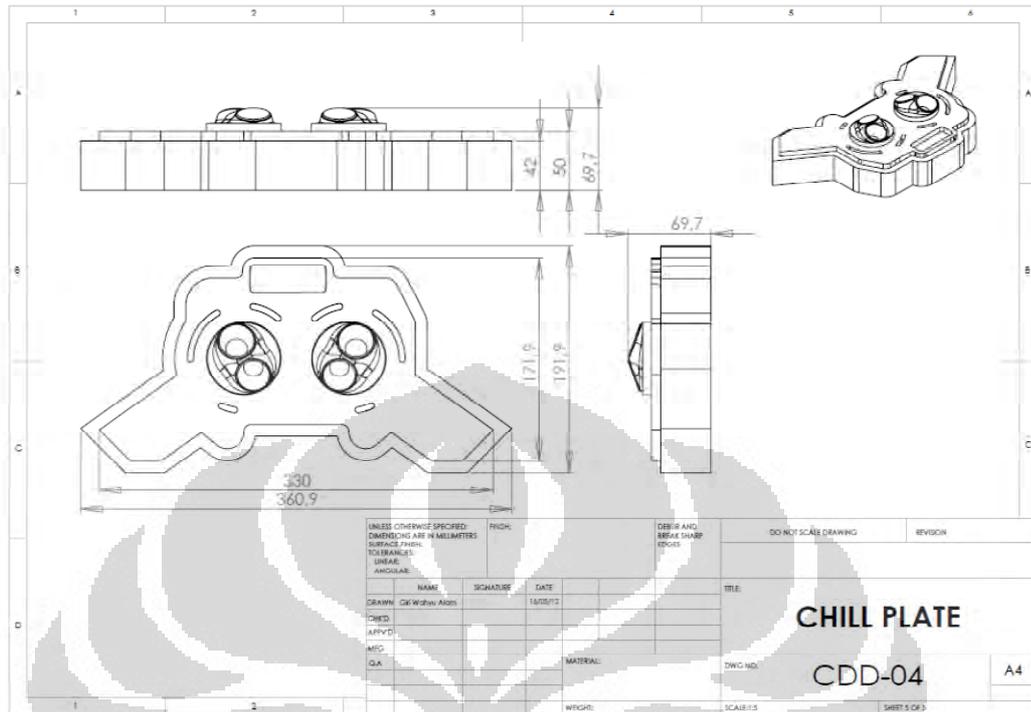
Lampiran 9: Detail Casting Design D



Lampiran 9: Detail Casting Design D (Lanjutan)



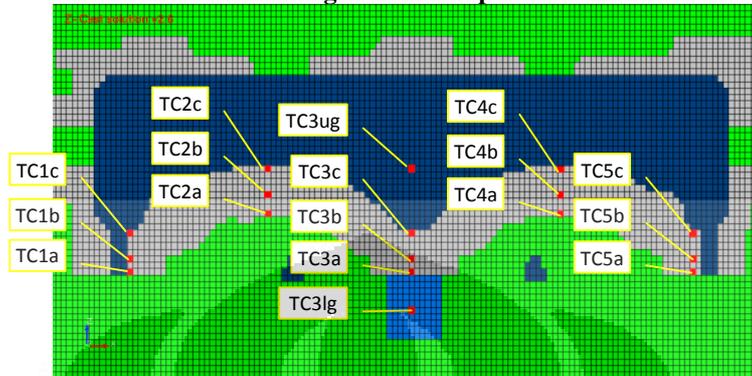
Lampiran 9: Detail *Casting Design D* (Lanjutan)



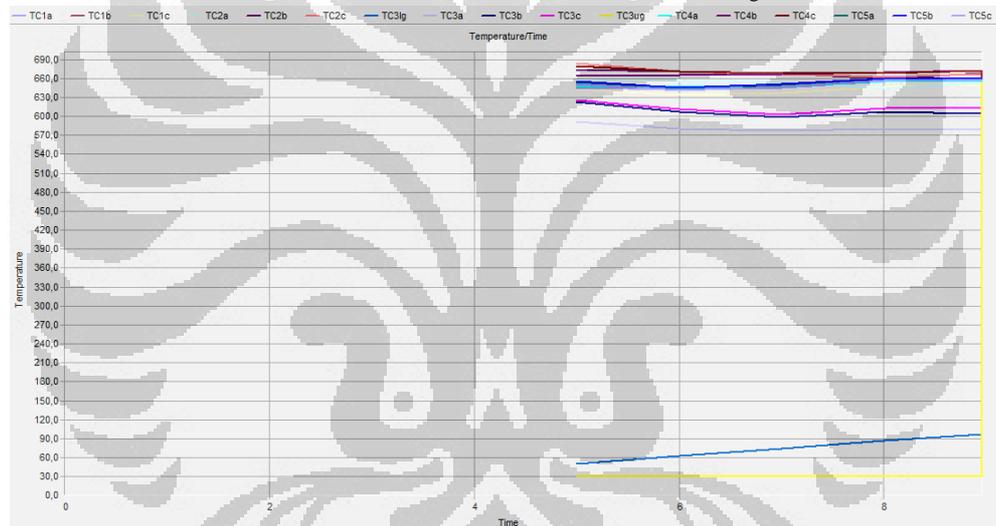
Lampiran 10: Temperatur vs. Waktu pada Penuangan dan Pembekuan

Casting Design A

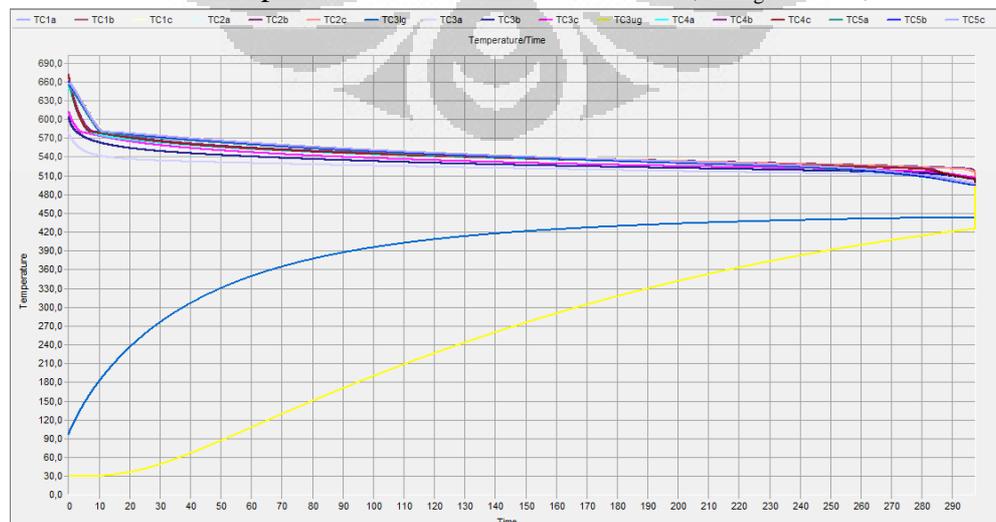
Posisi Pemasangan Termokopel saat Simulasi



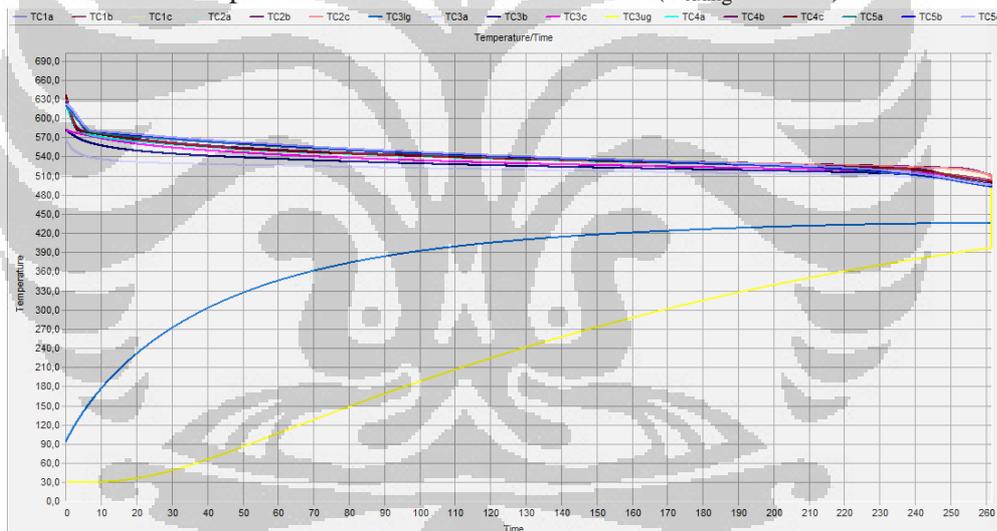
Temperatur vs Time dari Penuangan ($T_{\text{tuang}}: 730^{\circ}\text{C}$)



Temperatur vs Time dari Pembekuan ($T_{\text{tuang}}: 730^{\circ}\text{C}$)



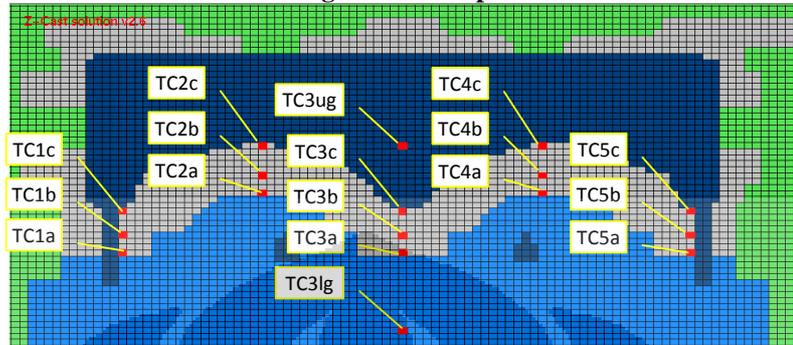
Lampiran 10: Temperatur vs. Waktu pada Penuangan dan Pembekuan (Lanjutan)

Temperatur vs *Time* dari Penuangan ($T_{\text{tuang}}: 690^{\circ}\text{C}$)Temperatur vs *Time* dari Pembekuan ($T_{\text{tuang}}: 690^{\circ}\text{C}$)

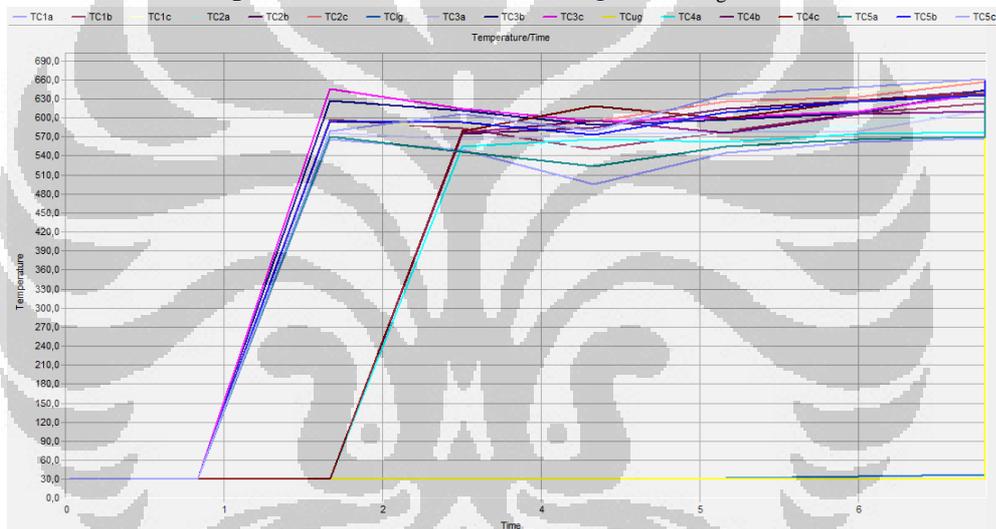
Lampiran 10: Temperatur vs. Waktu pada Penuangan dan Pembekuan (Lanjutan)

Casting Design D

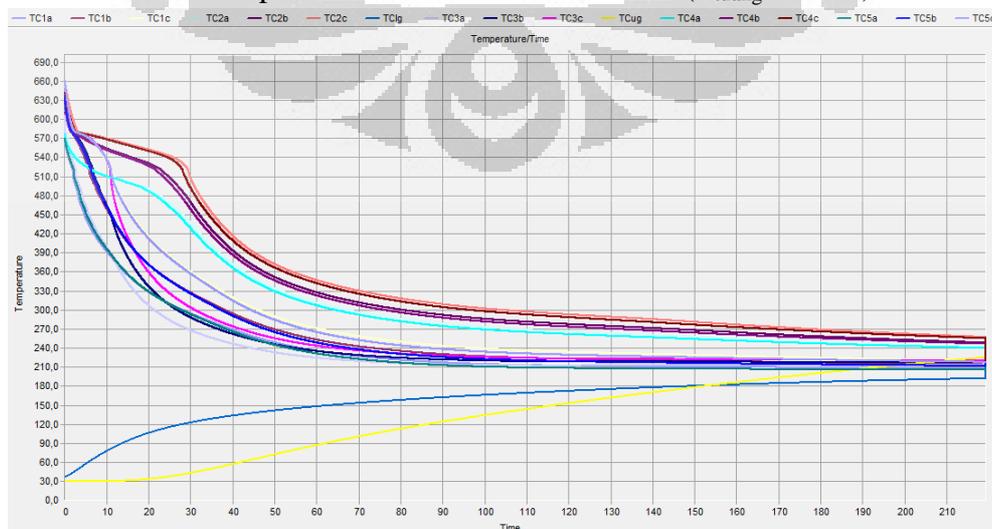
Posisi Pemasangan Termokopel saat Simulasi



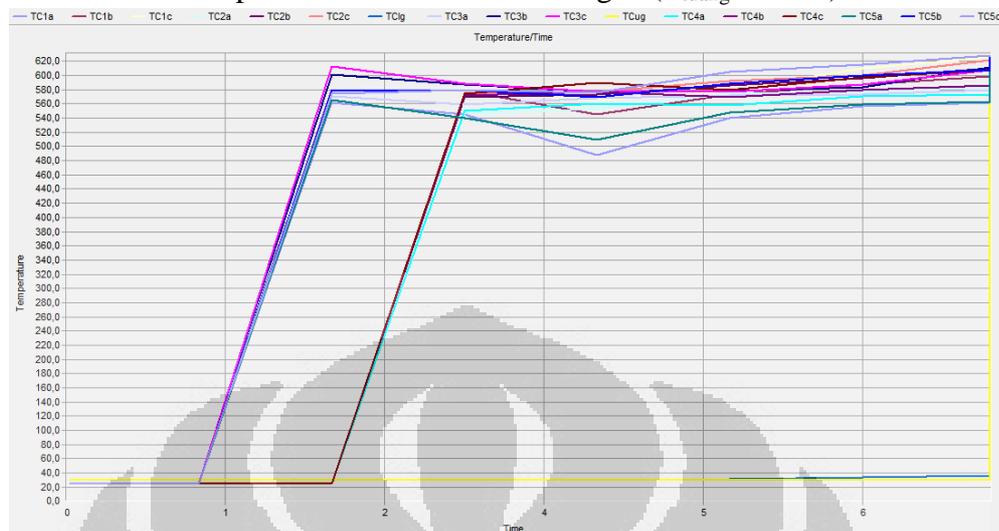
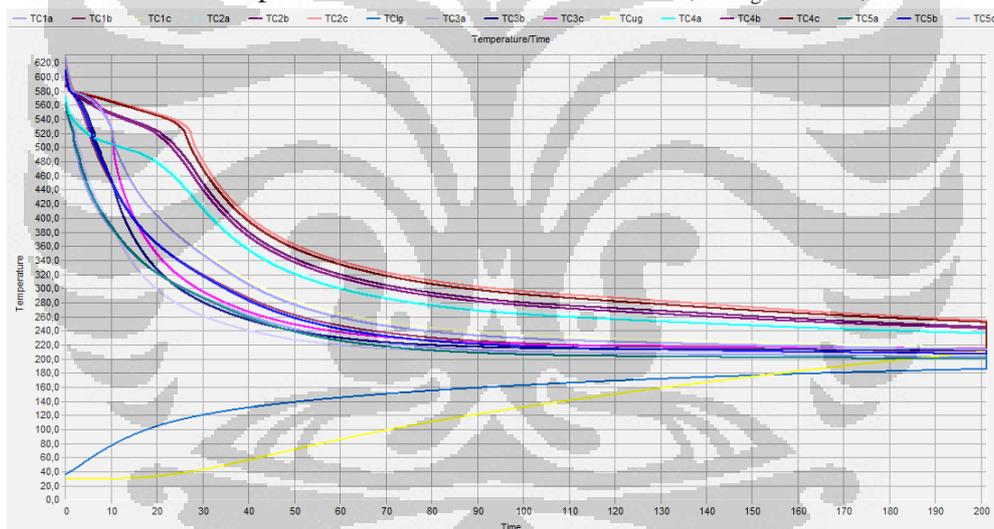
Temperatur vs Time dari Penuangan ($T_{tuang} = 730^{\circ}\text{C}$)



Temperatur vs Time dari Pembekuan ($T_{tuang} = 730^{\circ}\text{C}$)



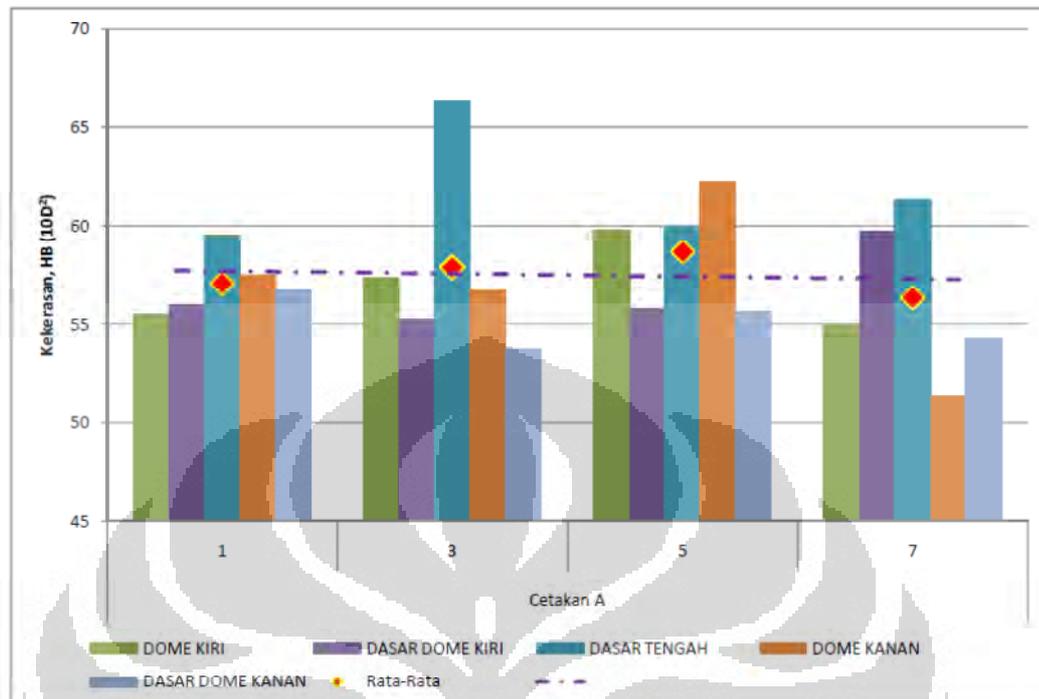
Lampiran 10: Temperatur vs. Waktu pada Penuangan dan Pembekuan (Lanjutan)

Temperatur vs *Time* dari Penuangan ($T_{\text{tuang}}: 690^{\circ}\text{C}$)Temperatur vs *Time* dari Pembekuan ($T_{\text{tuang}}: 690^{\circ}\text{C}$)

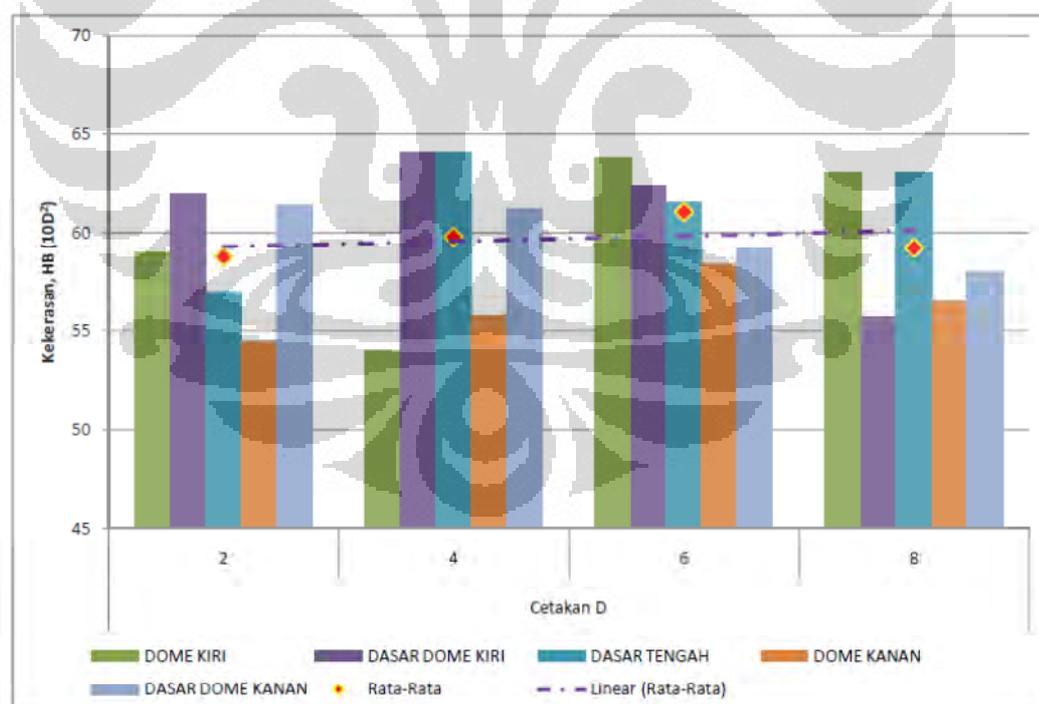
Lampiran 11: Hasil Pengukuran Kekerasan pada Bagian Bawah *Cylinder Head*

PENGUJIAN KEKERASAN PERMUKAAN BAWAH CYLINDER HEAD									
Daerah		Casting Design A				Casting Design D			
		1	3	5	7	2	4	6	8
DASAR TENGAH	1	58	54	60	55	57	63	58	56
		61	71	60	62		65	65	64
			74		67				69
	Rata-rata	59,5	66,3	60,0	61,3	57,0	64,0	61,5	63,0
Std Deviasi	2,1	10,8	0,0	6,0		1,4	4,9	6,6	
DOME KIRI	2	46	47	58	55	55	52	63	59
		49	57	60	55		52	63	
		61	58	62	58		55	65	
		62	61	63	58				
			63	64	60				
			65		60				
	3	47	48	52	46	58	50	64	67
		51	55	54	51	60	61		
		55	55	55	52	63			
		58	58	61	54				
		59	59	63	56				
		60	60	63					
		63	60	63					
		Rata-rata	55,5	57,4	59,8	55,0	59,0	54,0	63,8	63,0
Std Deviasi	6,3	5,2	4,1	4,2	3,4	4,3	1,0	5,7	
DASAR DOME KIRI	A	48	47	59	53	63		60	
		54	54		63			65	
			56		60				
			58						
			62						
			65						
	B	52	51	48	48	63		62	57
		63	53	50	58			63	
			54	53	65			65	
			56	54					
			61	56					
				62					
	C	63	46	49	55		64	65	56
			47	61	61				59
			49		63				
			55		64				
			57		65				
			57						
D	51	60	53	62	60	64	54	51	
	61	62	60				65	51	
								60	
Rata-rata	56,0	55,3	55,8	59,8	62,0	64,0	62,4	55,7	
Std Deviasi	6,2	5,5	5,4	5,3	1,7	0,0	3,9	3,9	
DOME KANAN	4	47	53	58	60	50	49	48	55
		64		62			62	50	58
				63				59	
				64				61	
	5							63	
		58	58	64	46	59	53	63	
		61	59		46	59	65		
					48				
					48				
					60				
Rata-rata	57,5	56,7	62,2	51,3	54,5	55,8	58,4	56,5	
Std Deviasi	7,4	3,2	2,5	6,8	6,4	3,9	6,7	2,1	
DASAR DOME KANAN	E	58	49	52	59	56	58	68	58
		59				61			
	F	47	49	57	46	60	57	59	46
		47	51	58	51				
		58	51	59	55				
		59	53	60	58				
		61	55		63				
		62	56						
	G		60						
		55	58	49	49	65	62	56	
				49	53		62	61	
				49					
				52					
				53					
	H			59					
				61					
				64					
		58				65	63		63
60			57			65	52	65	
		54							
	54								
	55								
Rata-rata	56,7	53,8	55,6	54,3	61,4	61,2	59,2	58,0	
Std Deviasi	5,1	3,4	4,9	5,6	3,8	3,1	6,0	8,5	

Lampiran 11: Hasil Pengukuran Kekerasan pada Bagian Bawah *Cylinder Head* (Lanjutan)

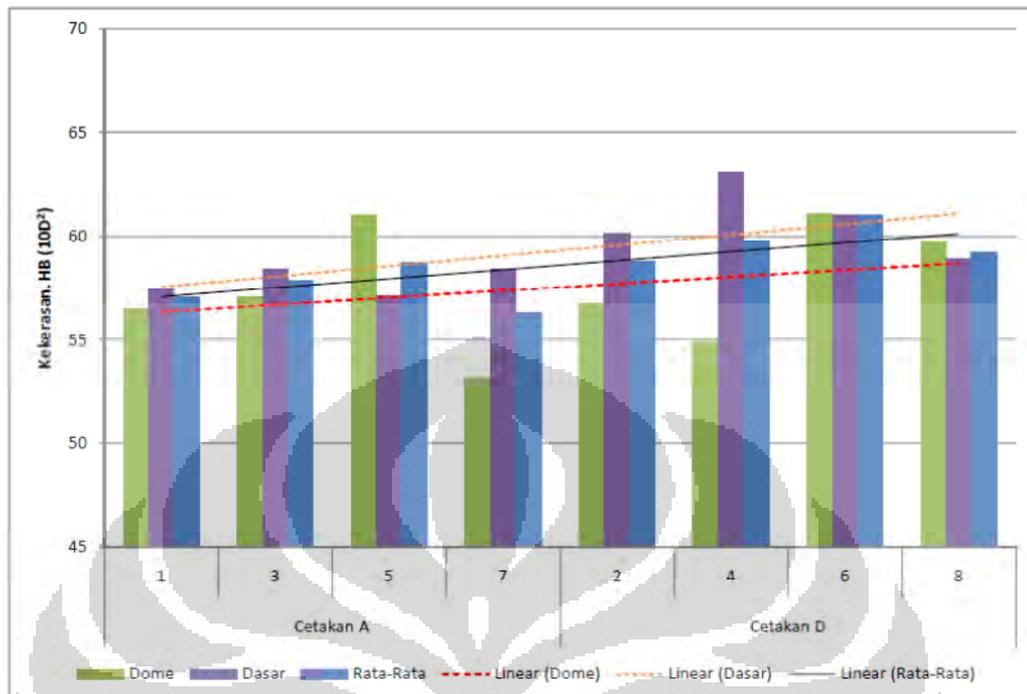


Nilai kekerasan bagian bawah *cylinder head* pada *Casting Design A*.



Nilai kekerasan bagian bawah *cylinder head* pada *Casting Design D*.

Lampiran 11: Hasil Pengukuran Kekerasan pada Bagian Bawah *Cylinder Head* (Lanjutan)



Pengaruh *casting design* dan penambahan Ti terhadap kekerasan pada permukaan bawah.

Lampiran 12: Hasil Pengukuran Kekerasan pada Penampang Melintang *Cylinder Head*

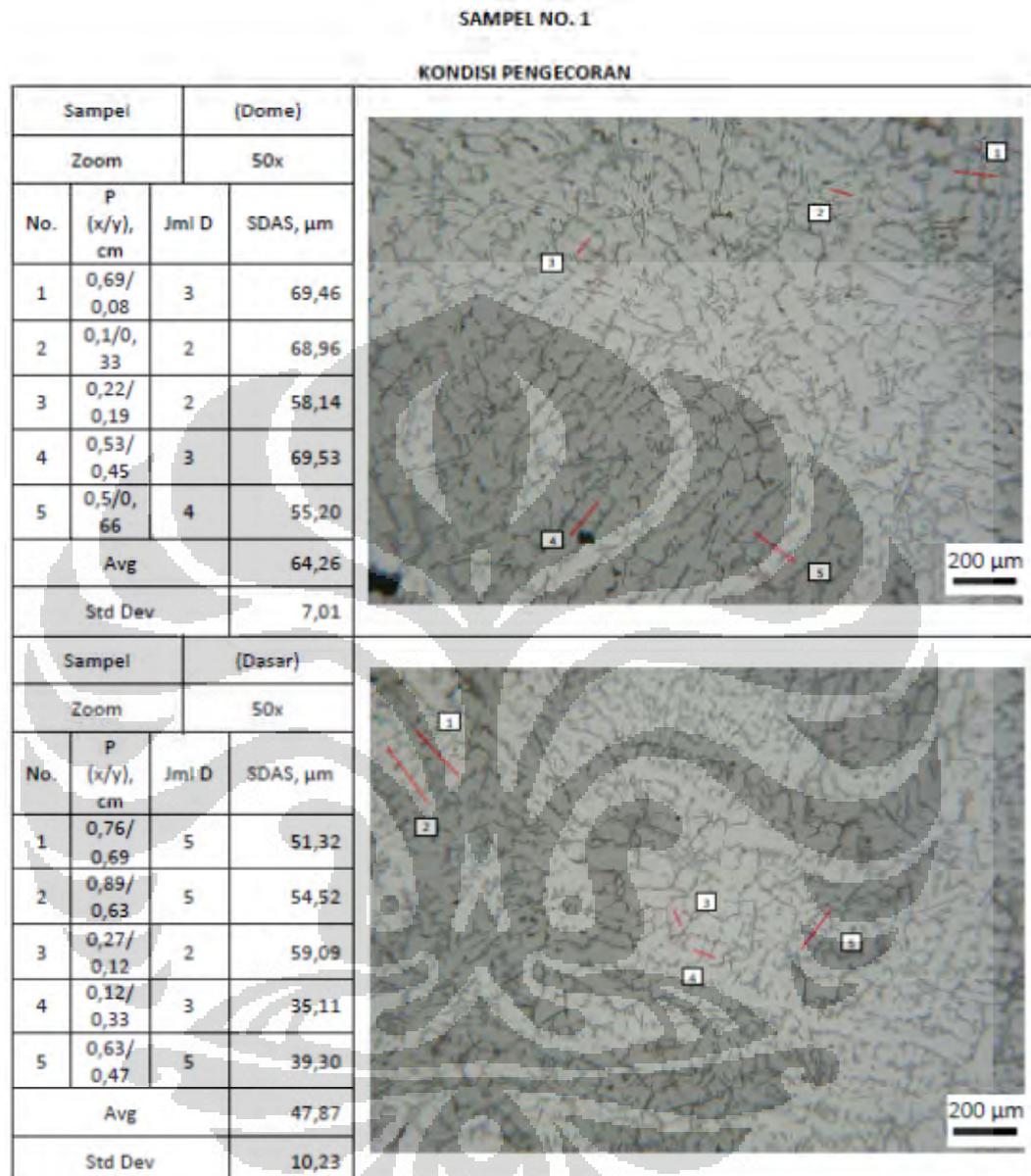
KODE		1			2			3			4			
Desain		A			D			A			D			
Temp. Tuang		730						690						
Cairan		AC4B												
		d	HV	HB ⁽¹⁾	d	HV	HB ⁽¹⁾	d	HV	HB ⁽¹⁾	d	HV	HB ⁽¹⁾	
As-Cast	Dome	1	0,4	68,5	44,6	0,3	78,3	57,8	0,3	77,4	56,6	0,3	79,3	59,0
		2	0,4	67,3	43,1	0,3	79,3	59,0	0,3	81,1	61,5	0,3	77,9	57,2
		3	0,4	69,2	45,6	0,3	82,6	63,5	0,3	81,1	61,5	0,3	78,3	57,8
		Avg		68,3	44,4		80,1	60,1		79,9	59,9		78,5	58,0
		Std Deviasi		0,9	1,2		2,2	3,0		2,1	2,9		0,7	0,9
	Dasar	1	0,3	79,3	59,0	0,3	81,6	62,2	0,3	81,1	61,5	0,3	77,9	57,2
		2	0,3	80,2	60,3	0,3	79,3	59,0	0,3	79,3	59,0	0,3	79,3	59,0
		3	0,3	81,6	62,2	0,4	75,7	54,2	0,3	78,8	58,4	0,3	79,7	59,6
		Avg		80,4	60,5		78,9	58,5		79,7	59,6		79,0	58,6
			Std Deviasi		1,2	1,6		3,0	4,0		1,2	1,7		1,0	1,3
As-T6	Dome	1	0,3	99,0	85,3	0,3	112,5	103,4	0,3	104,4	92,5	0,3	114,9	106,6
		2	0,3	101,0	88,0	0,3	135,0	133,4	0,3	105,1	93,5	0,3	125,3	120,4
		3	0,3	99,7	86,2	0,3	123,5	118,0	0,3	103,0	90,7	0,3	108,7	98,3
		Avg		99,9	86,5		123,7	119,2		104,2	92,2		116,3	108,4
		Std Deviasi		1,0	1,3		11,3	15,0		1,1	1,4		8,4	11,2
	Dasar	1	0,3	111,8	102,3	0,3	122,6	116,8	0,3	122,6	116,8	0,3	107,2	96,3
		2	0,3	111,0	101,3	0,3	126,2	121,6	0,3	117,4	109,9	0,3	92,2	76,3
		3	0,3	108,7	98,3	0,3	113,3	104,4	0,3	123,5	118,0	0,3	94,0	78,7
		4				0,3	130,0							
		Avg		110,5	100,7		123,0	114,3		121,2	114,9		97,8	83,8
	Std Deviasi		1,6	2,1		7,2	8,9		3,3	4,4		8,2	10,9	

Keterangan:
⁽¹⁾ HB = (HV - 35) / 0,75 diperoleh dari hasil riset tahun 2006.

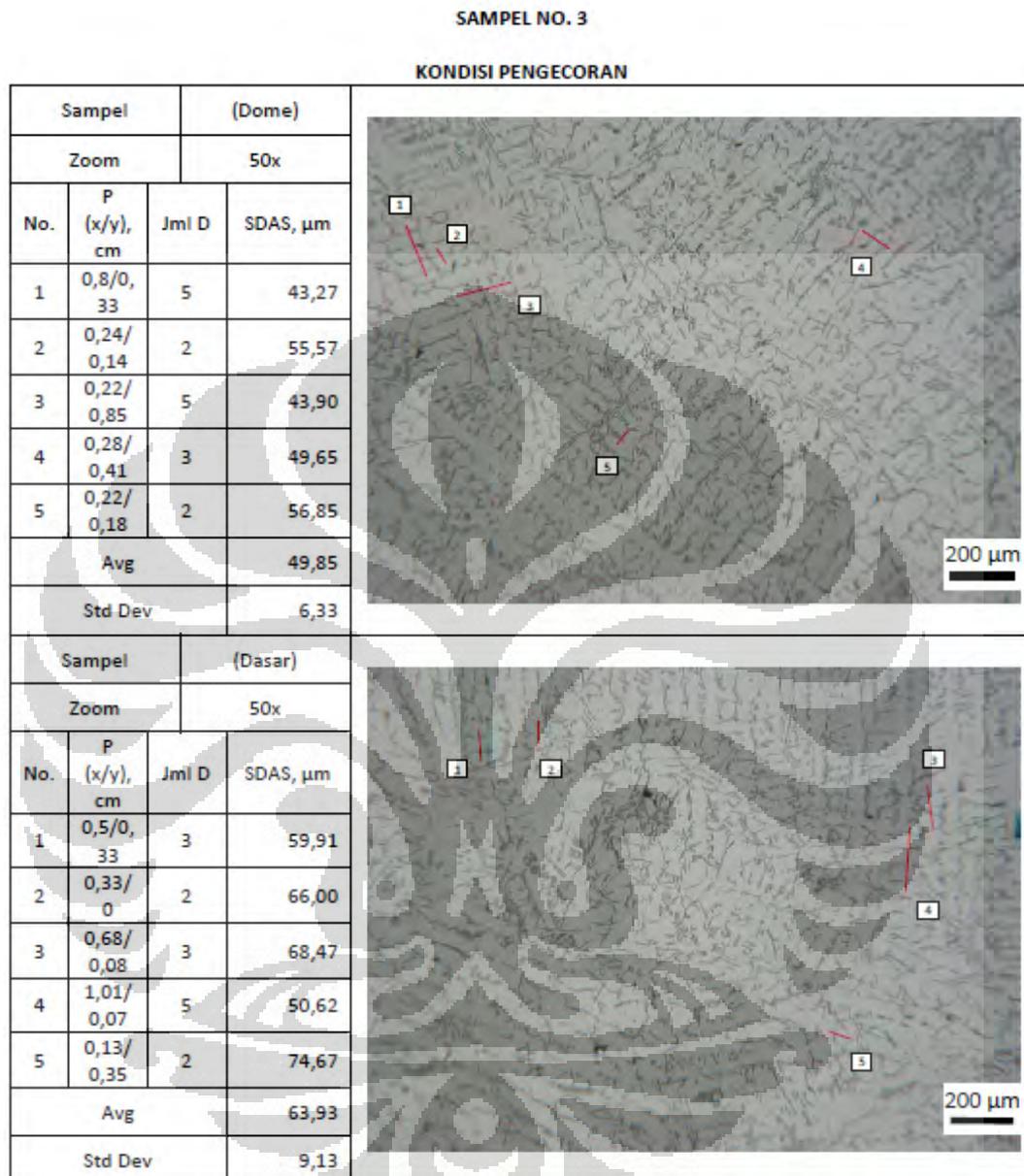
KODE		5			6			7			8			
Desain		A			D			A			D			
Temp. Tuang		730						690						
Cairan		AC4B+Ti												
		d	HV	HB ⁽¹⁾	d	HV	HB ⁽¹⁾	d	HV	HB ⁽¹⁾	d	HV	HB ⁽¹⁾	
As-Cast	Dome	1	0,338	81,14	61,5	0,357	72,73	50,3	0,345	77,88	57,2	0,35	75,67	54,2
		2	0,356	73,56	51,4	0,35	75,67	54,2	0,34	80,19	60,3	0,351	75,24	53,7
		3	0,35	75,67	54,2	0,338	81,14	61,5	0,341	79,72	59,6	0,348	76,55	55,4
		Avg		76,79	55,7		76,52	55,4		79,26	59,0		75,82	54,4
		Std Deviasi		3,91	5,2		4,27	5,7		1,22	1,6		0,66	0,9
	Dasar	1	0,348	76,55	55,4	0,324	88,31	71,1	0,323	88,85	71,8	0,334	83,10	64,1
		2	0,337	81,62	62,2	0,337	81,62	62,2	0,327	86,69	68,9	0,337	81,62	62,2
		3	0,342	79,26	59,0	0,329	85,64	67,5	0,33	85,12	66,8	0,334	83,10	64,1
		Avg		79,14	58,9		85,19	66,9		86,89	69,2		82,61	63,5
			Std Deviasi		2,54	3,4		3,36	4,5		1,87	2,5		0,85	1,1
As-T6	Dome	1	0,282	116,57	108,8	0,29	110,23	100,3	0,308	97,72	83,6	0,278	119,95	113,3
		2	0,295	106,52	95,4	0,285	114,13	105,5	0,3	103,00	90,7	0,284	114,93	106,6
		3	0,29	110,23	100,3	0,298	104,39	92,5	0,301	102,32	89,8	0,281	117,40	109,9
					0,277	120,81	114,4							
					0,26	137,13	136,2							
					0,3	103,00	90,7							
	Avg		111,11	101,5		114,95	99,4		101,01	88,0		117,43	109,9	
		Std Deviasi		5,08	6,8		12,68	6,5		2,87	3,8		2,51	3,3
	Dasar	1	0,285	114,13	105,5	0,3	103,00	90,7	0,317	92,25	76,3	0,283	115,75	107,7
		2	0,307	98,36	84,5	0,324	88,31	71,1	0,32	90,53	74,0	0,28	118,24	111,0
3		0,28	118,24	111,0	0,308	97,72	83,6	0,321	89,96	73,3	0,286	113,33	104,4	
4														
Avg			110,24	100,3		96,34	81,8		90,91	74,6		115,77	107,7	
	Std Deviasi		10,50	14,0		7,44	9,9		1,19	1,6		2,45	3,3	

Keterangan:
⁽¹⁾ HB = (HV - 35) / 0,75 diperoleh dari hasil riset tahun 2006.

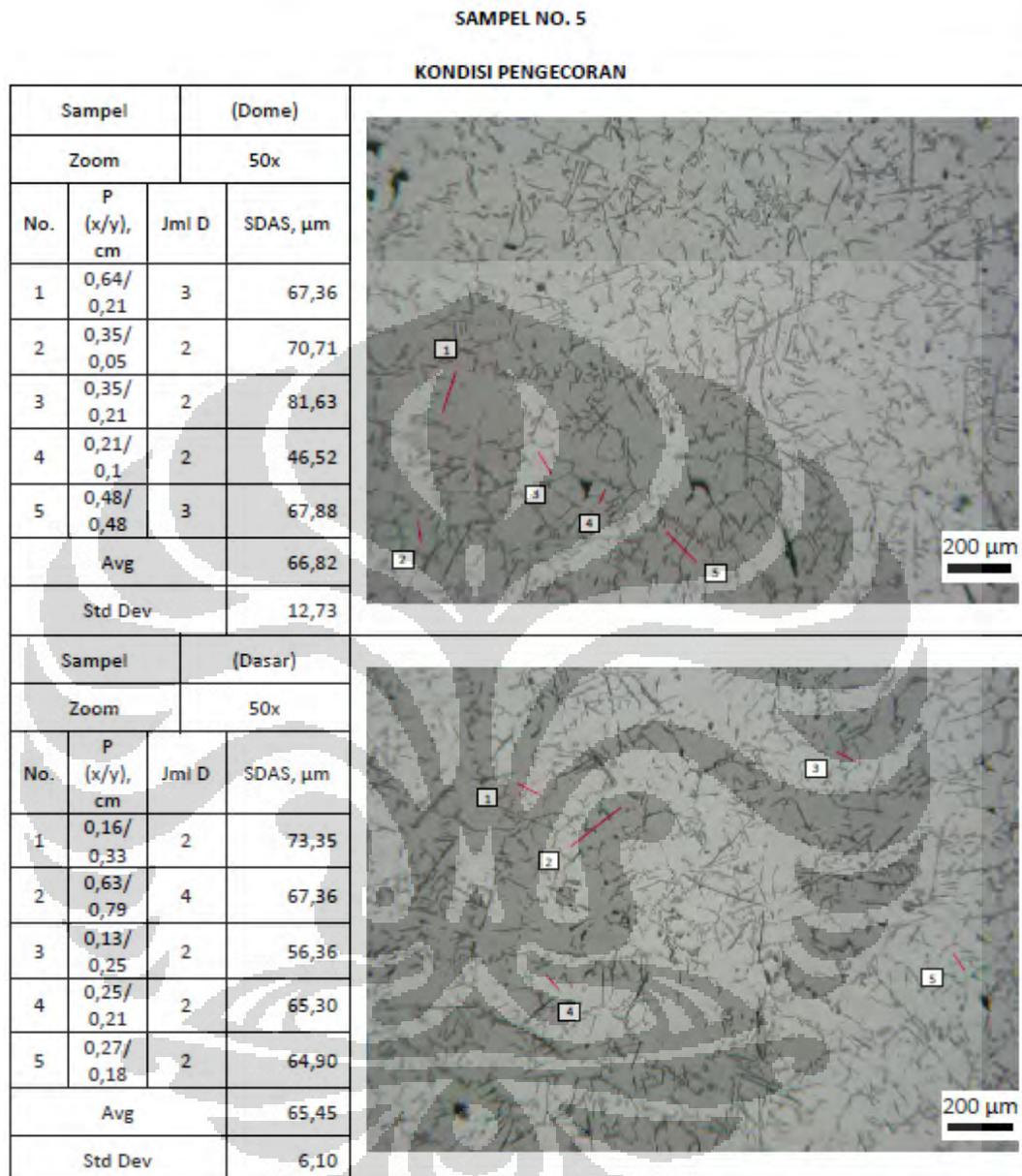
Lampiran 13: Hasil Pengukuran Nilai SDAS pada Penampang Melintang *Casting Design A*



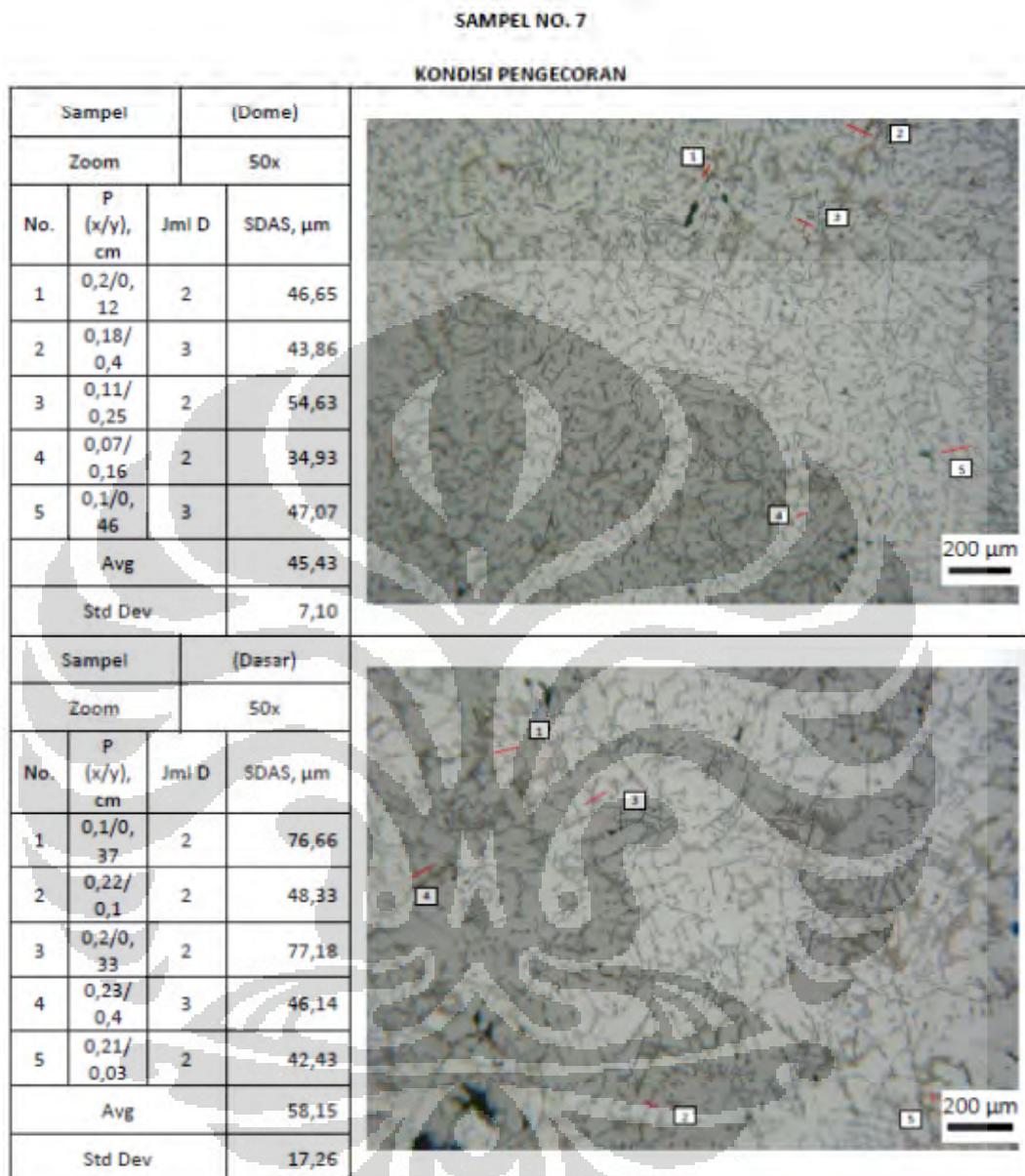
Lampiran 13: Hasil Pengukuran Nilai SDAS pada Penampang Melintang *Casting Design A* (Lanjutan)



Lampiran 13: Hasil Pengukuran Nilai SDAS pada Penampang Melintang *Casting Design A* (Lanjutan)



Lampiran 13: Hasil Pengukuran Nilai SDAS pada Penampang Melintang *Casting Design A* (Lanjutan)

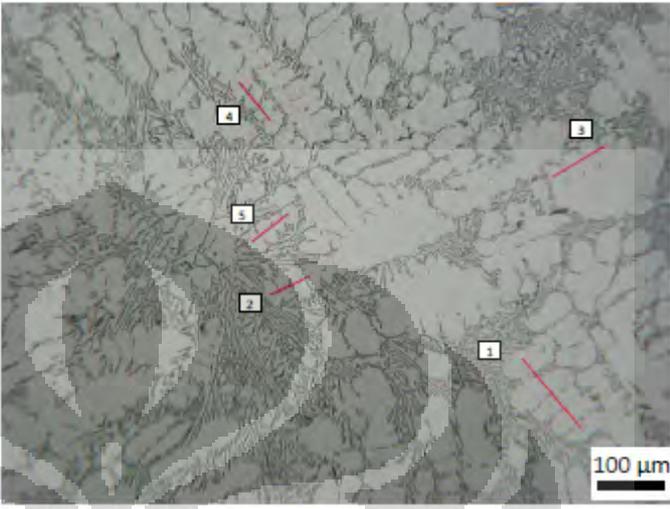


Lampiran 14: Hasil Pengukuran Nilai SDAS pada Penampang Melintang *Casting Design D*

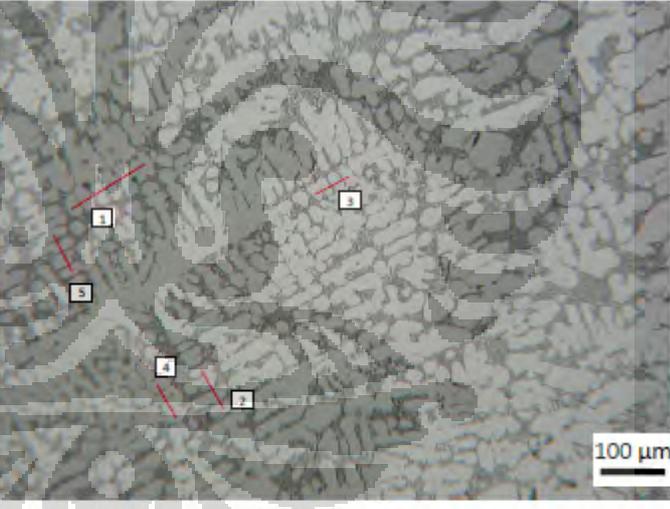
SAMPEL NO. 2

KONDISI PENGECORAN

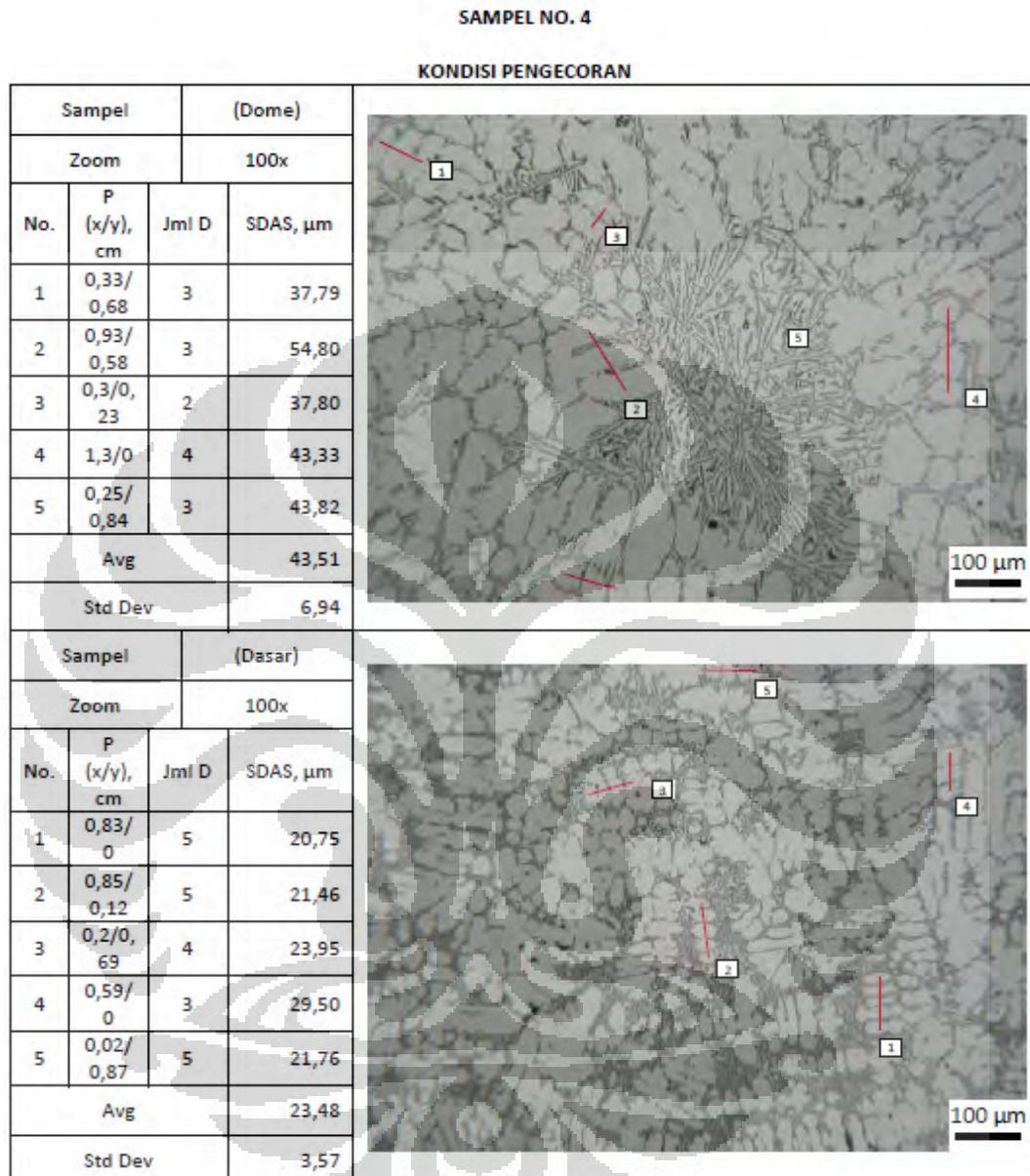
Sampel		2F1 (Dome)	
Zoom		100x	
No.	P (x/y), cm	Jml D	SDAS, μm
1	1,09/ 0,92	5	35,66
2	0,29/ 0,61	4	22,51
3	0,48/ 0,81	4	31,38
4	0,59/ 0,47	4	25,14
5	0,43/ 0,56	4	23,53
Avg			27,65
Std Dev			5,65

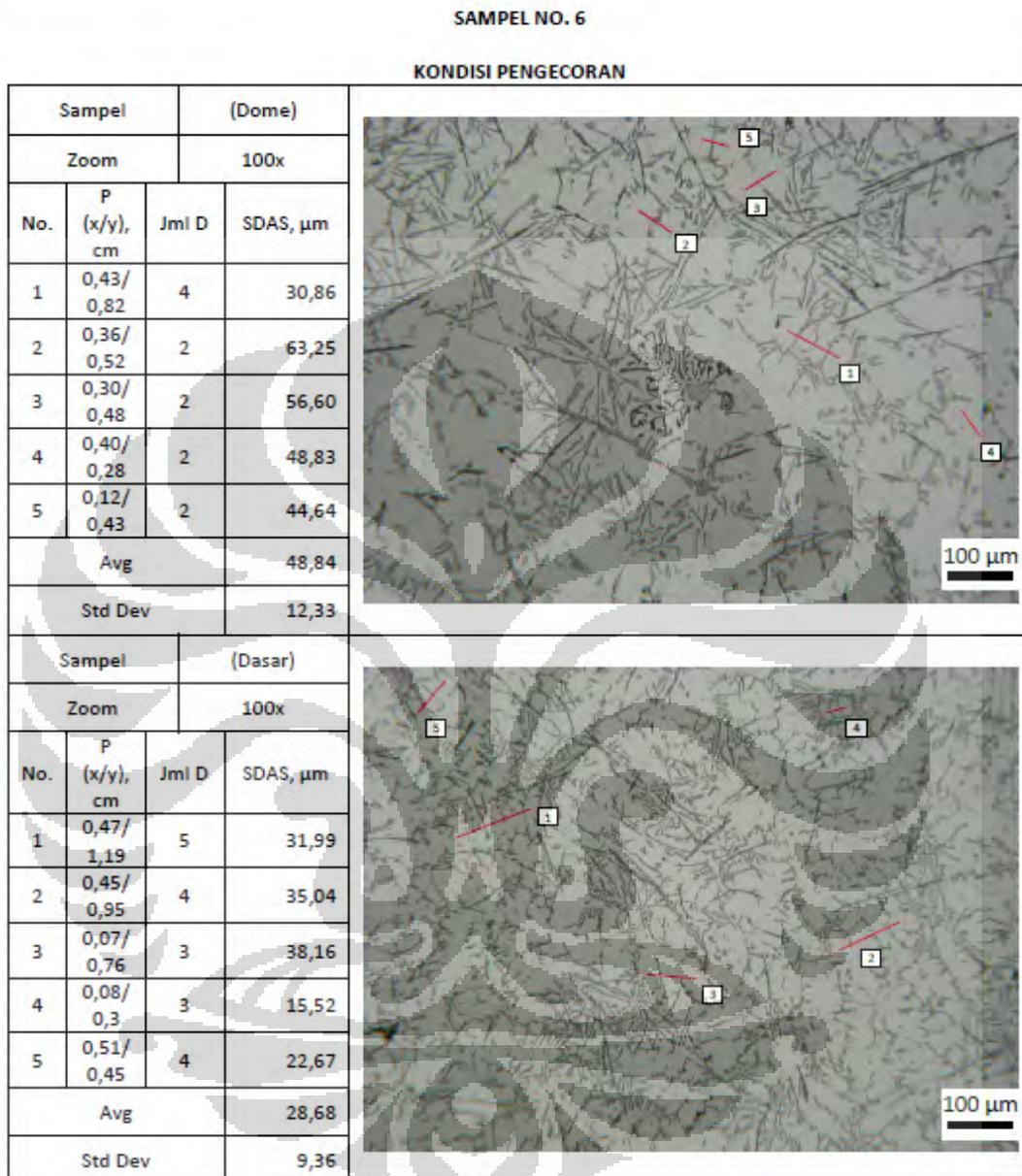


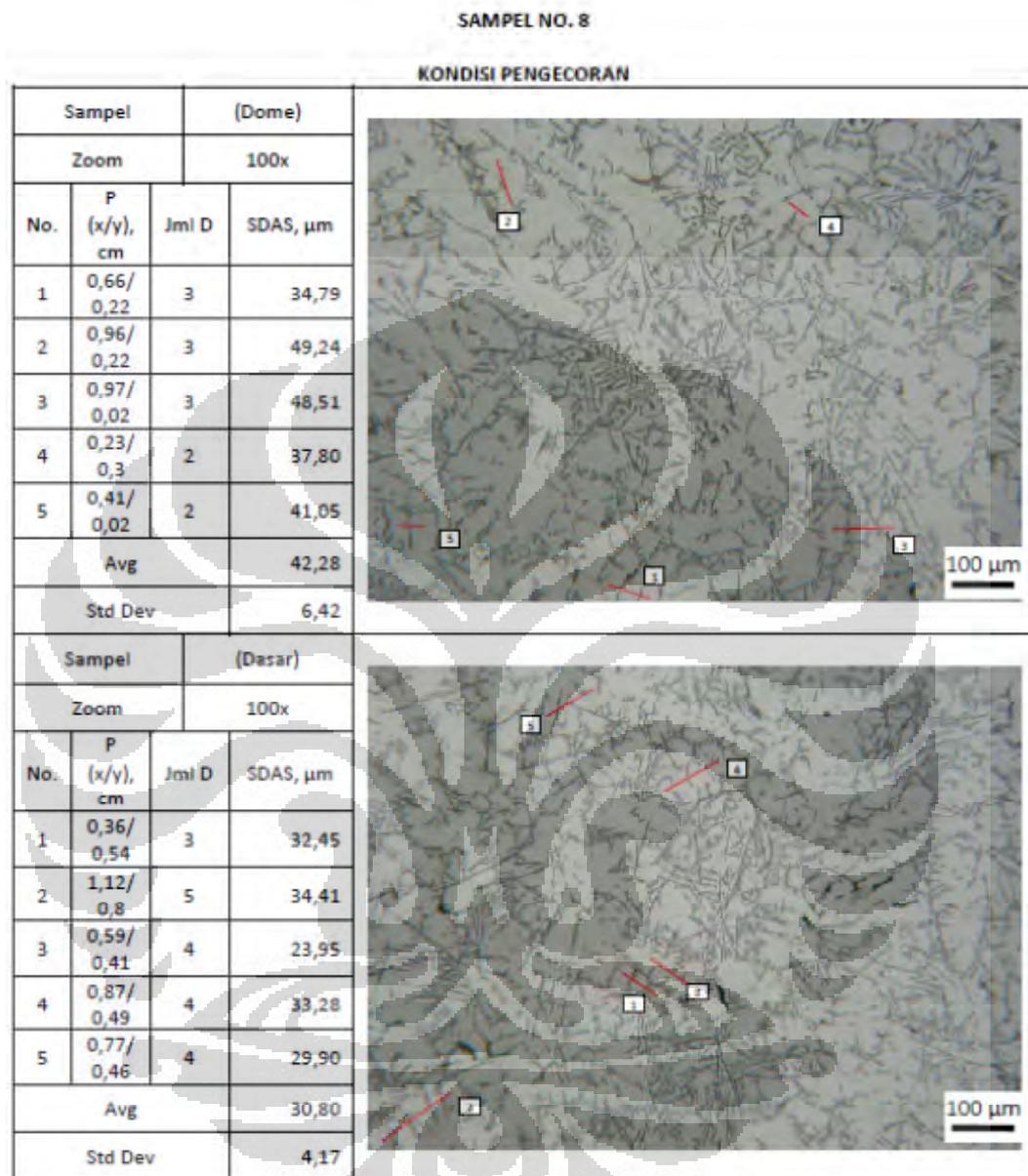
Sampel		2F2 (Dasar)	
Zoom		100x	
No.	P (x/y), cm	Jml D	SDAS, μm
1	0,7/1, 13	7	22,15
2	0,58/ 0,34	4	22,41
3	0,27/ 0,51	4	19,24
4	0,50/ 0,28	4	19,10
5	0,55/ 0,27	4	20,42
Avg			20,67
Std Dev			1,57



Lampiran 14: Hasil Pengukuran Nilai SDAS pada Penampang Melintang *Casting Design D* (Lanjutan)



Lampiran 14: Hasil Pengukuran Nilai SDAS pada Penampang Melintang *Casting Design D* (Lanjutan)

Lampiran 14: Hasil Pengukuran Nilai SDAS pada Penampang Melintang *Casting Design D* (Lanjutan)

Lampiran 15: Struktur Makro dari Berbagai Variasi



1	730°C	0,028 % berat Ti
3	690°C	0,028 % berat Ti
5	730°C	0,147 % berat Ti
7	690°C	0,147 % berat Ti



2	730°C	0,028 % berat Ti
4	690°C	0,028 % berat Ti
6	730°C	0,147 % berat Ti
8	690°C	0,147 % berat Ti