

LAPORAN KEGIATAN PENELITIAN



**KARAKTERISASI UNSUR KIMIA, METALOGRAFI, DAN
MEKANIK DALAM SISTEM PENGECORAN VAKUM PADUAN
ALUMINIUM MAGSIMAL-59**

Oleh :
**Ir. Winarno Yahdi Atmodjo.,MT
Putu Hadi Setyarini.,ST,MT**

Dilaksanakan Atas Biaya Dana Pengembangan Pendidikan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Tahun 2009 Berdasarkan Surat Perjanjian Pelaksanaan Kegiatan Penelitian dengan Kontrak Nomor : 08/J10.1.31/PG/2009
Tanggal : 20 April 2009

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS BRAWIJAYA
SEPTEMBER 2009**

LEMBAR IDENTITAS DAN HALAMAN PENGESAHAN KEGIATAN PENELITIAN

1. Judul Penelitian : Karakterisasi Unsur Kimia, Metalografi, dan Mekanik dalam Sistem Pengecoran Vakum Paduan Aluminium Magsima

2. Ketua Peneliti
 - a. Nama : Ir. Winarno Yahdi Atmodjo, MT
 - b. Jenis Kelamin : Laki-laki
 - c. NIP/Golongan : 19460804 198303 1 001/ IV a
 - d. Jabatan Fungsional : Lektor Kepala
 - e. Fakultas/Jurusan : Teknik/Teknik Mesin

3. Anggota Pelaksana : 1 (satu) orang

4. Lokasi Penelitian : Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UB

5. Jangka Waktu Penelitian : 8 (delapan) bulan

6. Biaya Penelitian : Rp. 10.000.000,- (sepuluh juta rupiah)

7. Sumber Dana : Dana DIPA Tahun Anggaran 2009



Mengetahui,
Ketua BPP Fakultas Teknik
Universitas Brawijaya

Dr. Ir. Mohammad Bisri, MS
NIP. 19581126 198609 1 001

Malang, 30 September 2009

Ketua Peneliti,

Ir. Winarno Yahdi Atmodjo, MT
NIP. 19460804 198303 1 001

Menyetujui,
Dekan Fakultas Teknik
Universitas Brawijaya



Prof. Ir. Harnen Sulistio, M.Sc., Ph.D
NIP. 19570527 198403 1 002



KATA PENGANTAR

Atas rahmat Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga Peneliti dapat menyelesaikan laporan penelitian yang berjudul : Karakterisasi Unsur Kimia, Metalografi, dan Mekanik dalam Sistem Pengecoran Vakum Paduan Aluminium Magsimal-59. Kegiatan penelitian ini dimaksudkan untuk mengembangkan pengetahuan dan teknologi pengecoran paduan aluminium khususnya pada pengecoran vakum

Pada kesempatan ini tak lupa Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dekan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
2. Ketua Badan Pertimbangan Penelitian Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Ketua Laboratorium : Pengecoran Logam, dan Uji Material Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Ketua Laboratorium Lingkungan Jurusan Kimia Fakultas MIPA Universitas Brawijaya.
5. Semua pihak yang telah membantu penelitian dan penulisan laporan penelitian

Segala saran dan kritik sangat Penulis harapkan demi perbaikan penyusunan laporan kegiatan penelitian di masa yang akan datang.

Malang, September 2009

Peneliti

RINGKASAN

Paduan aluminium merupakan jawaban atas bertambahnya kebutuhan logam untuk industri komponen otomotif yang ringan dengan kekuatan tinggi (kekuatan luluh minimum 180 MPa) dan aman (perpanjangan patah minimum 15%). Paduan Al-Si dengan pengecoran cetakan pasir atau *die casting* tidak dapat mencapai perpanjangan patah minimum 15%, tetapi dengan teknologi pengecoran yang relative baru (*vacuum casting*) nilai duktilitas tersebut akan terpenuhi. Prinsip pengecoran cakum ini merupakan dasar pengontrolan unsur paduan, metalografi, dan retak mikro. Duktilitas paduan Al-Si tuang sangat ditentukan oleh morfologi kerapuhan silikon eutektik dan duktilitas tersebut dapat diperbaiki dengan unsur Magnesium atau silikon spheroidisasi.

Percobaan yang dilakukan adalah melebur ingot aluminium murni, powder gelas, dan batang magnesium dalam mangkok tanah liat pada tungku vakum. Aluminium murni, powder gelas dan magnesium ditambahkan sebagai unsur paduan aluminium Magsimal-59 dalam mangkok berdasarkan analisa berat. Spark spectrometry digunakan dalam riset ini untuk menentukan kandungan unsur dalam bahan baku. Temperatur pemanasan tungku vakum untuk pembuatan paduan aluminium Magsimal-59 sekitar 800 °C dan dibiarkan pada temperatur tersebut selama 15 menit untuk menghasilkan paduan homogen. Penuangan Magsimal-59 melt pada cetakan permanen yang telah dipanasi sekitar 200 °C dan dilanjutkan dengan pendinginan dalam ruang vakum. Setelah solidifikasi, hasil pengecoran dikeluarkan dari cetakan dan dilanjutkan dengan proses pemotongan untuk pembuatan specimen uji porositas gas.

Observasi yang telah dilakukan menghasilkan klasifikasi porositas gas secara dimensional dan non dimensional yang disebabkan oleh mekanisme penyusutan dan gas terjebak dalam pengecoran Magsimal-59 secara berurut ke dalam makroporositas dan mikroporositas, bentuk bulat dan bentuk tak beraturan. Riset karakterisasi dalam paduan aluminium Magsimal-59 mengindikasikan porositas meningkat dengan bertambahnya unsur paduan, karena bertambahnya *primary dendrite arm spacing* dan *Secondary arm spacing* dalam daerah eutektik dimana porositas muncul dalam antarmuka *Secondary dendrite arm spacing*. Pori-pori pada gas porositas secara berurut pada kandungan paduan tinggi dan rendah lebih tidak beraturan dan lebih bulat.

Kata kunci :

Cetakan pasir, Perpanjangan patah, Pengecoran vakum, Magsimal-59, Silikon eutektik

SUMMARY

Aluminium alloy is the answer for more of metal need for light automotive industry component with high power (180 MPa minimum for yield tensile) and safe (15 % minimum for fracture elongation). Al - Si alloy by cast of sand mold or die casting can't reach 15 % minimum for fracture elongation, but by casting technology that quite new (vacuum casting), the ductility value can be reach. Vacuum casting principle is a basic of element combination control, metallography, and micro crack. Al - Si pour combination ductility a given by morphology of eutectoid silicon brittleness and that ductility can be fix by magnesium element or spheroidation silicon.

Experiment that made is, melt pure aluminium ingot, glass powder, and magnesium rod in clay bowl in vacuum furnace. Pure aluminium, glass powder and magnesium has been add as the element of Magsimal-59 Aluminium in a bowl based on weight analysis. Spark spectrometry used for this research is to determine element content on material. Needed 800 degree celcius Vacuum furnace reheating temperature and left for 15 minutes to result homogen combination. Melt Magsimal-59 pouring to permanent mold that has been heated around 200 degree celcius and continued by cooling in a vacuum room. After solidification, cast result foul form the mold and continued by cutting process to made gas porosity test specimen.

Observation that had been made, produce gas porosity classification in dimensional and non dimensional already, that cause by shrinkage mechanism and gas has been trapped in the Magsimal-59 cast by sequence in to macroporosity and microporosity, round shape and irregular shape. Characterization research in the Magsimal-59 aluminium fusion, indicated rise of porosity by element combination increasingly. Cause of primary dendrite arm spacing and Secondary dendrite arm spacing increasingly in the eutectic area, pores in porosity gas by chronological to high and low alloy content, more irregular and round.

Key note :

Sand mold, Fracture elongation, Vacuum casting, Magsimal-59, Eutectic silicon

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
KATA PENGANTAR	ii
RINGKASAN	iii
SUMMARY	iv
DAFTAR ISI	v
BAB I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	6
1.3. Tujuan Penelitian	6
BAB II. TINJAUAN KEPUSTAKAAN	
2.1. Aluminium dan Paduan	7
2.2. Sifat Mampu Alir	9
2.3. Viskositas Logam Cair	16
2.2. Solidifikasi Logam	18
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	
3.1. Rancangan Penelitian	25
3.2. Prosedur Pengoperasian Tungku	27
3.3. Peralatan Pengecoran dan Penelitian	28
3.4. Alur Penelitian	29
BAB IV. DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1. Data Penelitian	30
4.2. Pembahasan	32
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. Kesimpulan	40
5.2. Saran	40
DAFTAR PUSTAKA	41



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Aluminium dan paduannya merupakan material teknik terbesar setelah baja yang digunakan sebagai bahan baku pembuatan komponen transportasi. Dari berbagai sifat logam ternyata aluminium dan paduannya mempunyai *strength weight ratio*, *thermal and electric conductivity weight ratio* yang paling tinggi dibandingkan material logam yang lain. Menyimak perkembangan industri nasional yang didasarkan pada Riset Unggulan Nasional¹, satu diantaranya menitik beratkan pada industri otomotif. Hal ini tidak berlebihan karena industri otomotif di Indonesia sudah dua puluh tahun lebih beroperasi namun belum menunjukkan hasil-hasil kemajuan yang signifikan. Pengecoran merupakan transformasi bahan baku menjadi produk akhir dengan proses peleburan dan pembekuan. Ternyata proses transformasi sederhana ini mengakibatkan pengaruh metalurgi yang kompleks mulai dari sumpuran (*shrinkage*) dan porositas, bentuk dan ukuran butir, fasa atau struktur. Adanya pengaruh metalurgi tersebut berakibat pada sifat fisik dan mekanik dari produk coran. Oleh karena itu dalam pengecoran aluminium paduan khususnya yang berkaitan dengan proses pembekuan harus dirancang dengan benar yaitu memperhitungkan kontraksi termal, kelarutan gas dalam logam cair dan dimensi produk yang akan dicor. Pada prinsipnya aluminium dan paduannya dikelompokkan atas dua jenis yaitu aluminium tuang dan aluminium canai (*wrought*). Silumin adalah paduan aluminium (Al-Si) merupakan jenis aluminium tuang yang paling baik karena mempunyai mampu tuang yang tinggi, duralumin adalah paduan aluminium (Al-Cu) yang paling terkenal karena mempunyai kekuatan tinggi dan dapat dikeraskan dengan perlakuan panas. Jenis paduan aluminium yang mempunyai *wroughtability* yang tinggi adalah paduan Al-Mg. Secara umum aluminium dan

paduannya mempunyai *strength to weight ratio* yang tinggi pada temperatur rendah dibandingkan jenis paduan logam yang lain. Dan paduan titanium juga mempunyai *strength to weight ratio* yang tinggi pada temperatur tinggi dibandingkan jenis paduan logam yang lain.

Satu atau beberapa kesalahan *design*, pemilihan material, *manufacturing*, pemakaian, perawatan dan perbaikan serta faktor lingkungan dapat mempercepat terjadinya kerusakan komponen mesin tersebut. Dalam memilih material untuk kebutuhan *engineering* didasarkan pada spesifikasi *performance* dan spesifikasi produk. Spesifikasi *performance* merencanakan persyaratan utama fungsional produk yaitu menyatakan parameter utama dari rancangan yang dikembangkan. Spesifikasi produk didefinisikan sebagai kondisi rancangan komponen yang dibuat. Sifat-sifat material merupakan bagian penting pada spesifikasi produk. Sifat fisik dan mekanik logam merupakan suatu parameter penting untuk menentukan kualitas produk khususnya produk-produk dari logam. Mikrostruktur merupakan karakteristik metalografi yang terdiri dari bentuk dan ukuran butir, segregasi dan inokulasi, senyawa logam, dan cacat mikro. Pengontrolan dan pembentukan mikrostruktur logam yang baik dan benar akan menghasilkan sifat-sifat: fisik, mekanik, kimia dan sifat mampu bentuk seperti yang diinginkan (mudah dibentuk dan *service life* lama). Proses solidifikasi merupakan salah satu metode pengontrolan dan pembentukan yang efektif dan efisien dibandingkan metode yang lain. Kekurangan produk lokal aluminium cor disebabkan oleh tingkat porositas tinggi, kekuatan rendah, retak-retak mikro, struktur mikro tidak homogen dan tidak terkontrolnya bahan baku.

Penelitian dengan menambah unsur paduan kedalam aluminium cor telah dilakukan sebagai upaya meningkatkan kekuatan tetapi tingkat porositas masih tinggi (Avner, 1987; Wahyono, 1998; Dwi Surahman, 2000). Cacat coran aluminium paduan bertambah seiring dengan meningkatnya ketebalan (Muhammad Nur, 2000). Unsur

pembentuk gas seperti hidrogen dalam aluminium mempunyai kelarutan yang rendah dalam logam padat dibandingkan dengan logam cair. Gas-gas yang terbentuk tersebut akan bergerak kepermukaan dan ini menyebabkan porositas sehingga kekuatan permukaan menjadi berkurang (Yusri Sulaiman, 2002). Dengan semakin lamanya waktu solidifikasi akan meningkatkan pembentukan gas-gas dalam logam cair. Pada akhirnya gas-gas yang terbentuk dan /atau berada dalam logam cair akan membentuk porositas logam cor. Adanya porositas dalam aluminium cor yang dipakai dalam sistem struktur akan menimbulkan berbagai permasalahan baru, seperti; *stress corrosion cracking* meningkat, *segregation* bertambah, *micro crack* pada permukaan meningkat, *fatigue resistance* menurun, *density* menurun dan lain sebagainya.

Pada umumnya penelitian pengecoran paduan aluminium bertujuan untuk memperbaiki karakteristik, sifat-sifat mekanik dan metalografi. Penelitian dengan judul Karakterisasi Unsur Kimia, Metalografi, dan Mekanik dalam Sistem Pengecoran Vakum Paduan Aluminium Magnesium-59 tidak saja menghasilkan perbaikan tetapi juga untuk meningkatkan produktivitas coran paduan aluminium. Cacat rongga, porositas, *flash* dan pekerjaan *finishing* merupakan faktor-faktor yang merugikan dalam pengecoran baik secara kualitatif dan kuantitatif. Adanya rongga dan porositas secara signifikan mengurangi karakteristik dan sifat mekanik material. Pengaturan parameter solidifikasi merupakan salah satu upaya mengurangi atau menghilangkan faktor-faktor yang merugikan dalam pengecoran. Tujuan khusus penelitian ini adalah meningkatkan produktivitas pembuatan coran aluminium dipadu dengan magnesium dan silikon. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental nyata yaitu pembuatan produk coran paduan Al-Si-MG yang dituang dalam cetakan permanen dan divakumkan.

Ditemukan banyak kasus cacat mikro dalam teknologi pengecoran paduan aluminium yang disebabkan tidak terkontrolnya temperatur tuang, komposisi kimia, dan

kondisi cetakan (M.Di Sabatino et.al, 2005; Niyama Eisuke et.al, 1997). Hasil penelitian perilaku getaran pada solidifikasi aluminium, menyatakan bahwa frekuensi getar semakin tinggi akan merapatkan dan memperpendek lengan dendrit sehingga porositas berkurang (Wahyono et.al,2006). Korelasi mikrostruktur aluminium paduan terhadap sifat mekanik sudah banyak diteliti, hasil penelitiannya menyatakan ukuran butir *finer* meningkatkan sifat mekanik (Opie, W.R., at.al, 1980; Wang, Y.H. at.al, 1986; Furukawa., at.al, 2002; L.J. Zheng., 2006; Wahyono at.al, 1998, 2007). Porositas coran akan meningkat seiring dengan kelarutan hidrogen karena kenaikan temperatur logam cair (Wahyono, 2002). Pengujian pada *superheated* yang berbeda untuk 4 variasi tekanan, hasilnya menyatakan fluiditas paduan aluminium secara proposional linier dengan akar dari tekanan hisap. Jean-Christophe, 2003, melakukan penelitian kontrol pencegahan cacat porositas, salah alir, kekasaran permukaan, sifat mekanik akibat absorpsi gas hidrogen dan oksigen selama peleburan dan penuangan. Korelasi kelarutan gas terhadap tekanan logam cair sebagai penyebab porositas.

Dalam proses pengecoran dan pengelasan logam kelarutan tersebut dikenal dengan hydrogen embrittlement. Kelarutan *hydrogen* dalam aluminium padat dan cair cukup besar. Aluminium cair bereaksi secara cepat dengan *carbon monoxide* dan *carbon dioxide* dan juga bereaksi dengan uap air dalam lingkungan atmosfer, menyerap air. adanya air seperti lapisan hidrasi oksida pada *scrap* dan air yang terserap atau kombinasi dalam refraktori. Aluminium padat juga bereaksi dengan moisture dalam lingkungan *furnace* sehingga terbentuk *oxide* dan *hydrogen*. Seperti reaksi sumber *hydrogen* dalam material padat disebabkan oleh difusi dari permukaan. Jumlah *hydrogen* dalam aluminium cair lebih besar dari pada kesetimbangan jumlah kelarutan, karena dipicu reaksi *metal-moisture*. S.Kuyucak, 2000; melaporkan kasus-kasus kelarutan hydrogen

dalam aluminium dapat menyebabkan terjadinya kerapuhan dan kejadian ini sangat membahayakan. Menurut M.Di Sabatino et.al, 2005, penyebab utama cacat tersebut adalah faktor fluiditas yang diakibatkan tidak terkontrolnya temperatur, komposisi kimia, material cetakan dan coating, dan viskositas.

Pembentukan *semi-solid metal* (SSM) merupakan pengembangan duktilitas baru paduan Al-Si-Mg tanpa perlakuan T6 (*spheroidization*). SSM memberikan banyak keuntungan dibandingkan teknik pembentukan konvensional, salah satu keuntungannya adalah *weldability* dan *heat treatability*. Kombinasi SSM dan proses perlakuan panas menghasilkan peningkatan kekuatan dan keuletan tinggi pada logam ringan memberikan hasil yang memuaskan. Duktilitas paduan Al-Si tuang sangat ditentukan oleh morfologi kerapuhan silikon eutektoid dan duktilitas tersebut dapat diperbaiki dengan unsur Sr atau Na atau silikon spheroidisasi. Duktilitas paduan Al-Si tuang merupakan nilai penting yang sangat dibutuhkan dalam aplikasi. Pengembangan baru paduan Al-Si-Mg untuk pembentukan SSM menunjukkan nilai *fracture-elongation* yang terbatas sebelum *ageing* (T5). Selama perlakuan pelarutan panas T6 spheroid-spheroid eutektid silikon memberikan respon yang baik untuk nilai perpanjangan patah dalam kondisi T6 kekuatan tinggi. Temperatur perlakuan panas yang tinggi dapat menghilangkan gelembung sehingga didapat duktilitas tinggi ($\epsilon > 15\%$) pada tingkat tegangan ($YS > 180$ MPa) seperti tuntutan dalam industri otomotif untuk menghasilkan komponen logam yang ringan dan aman. Fluiditas maksimum paduan Al-1,6%Si selama *squeeze casting* dengan menggunakan tekanan 30 MPa. Interval waktu antara penuangan dan penekanan 6s, dan kecepatan plunyer 50 mm/s. Fluiditas meningkat karena *superheat*, kandungan silikon dari 12,0% - 20,0% dan sebaliknya menurun karena modifikasi *eutectic* dan *primary silicon refinement*. Fluiditas paduan tuang dapat diukur dengan berbagai cara, dua uji fluiditas yang sering digunakan adalah uji fluiditas spiral dan uji fluiditas vacuum.

1.2. Rumusan Masalah

Pengaruh tekanan vakum terhadap hilangnya unsur paduan khususnya Magnesium dalam proses pengecoran dan akibat yang ditimbulkan pada sifat dan karakteristik mikrostruktur, fisik dan mekanik.

1.3. Tujuan Penelitian

1. Mengetahui fenomena penguapan magnesium dalam pengecoran dan akibat yang ditimbulkannya.
2. Memprediksikan hubungan matematis magnesium sebagai unsur paduan dalam magsimal-59.



BAB II

TINJAUAN KEPUSTAKAAN

2.1. Aluminium dan Paduannya

Aluminium paduan komersil merupakan sistem eutektik dengan larutan padat yang terbatas. Solidifikasi aluminium paduan dalam logam lasan berupa aluminium yang diperkaya dendrit oleh pertumbuhan epitaxial pada proeutektik. Uji mikrostruktur merupakan prinsip dasar evaluasi paduan dan produk untuk menentukan pengaruh pabrikan dan perlakuan panas sampai pengaruh prosedur baru dan untuk menganalisis sebab *failure*. Beberapa perubahan yang muncul secara bersamaan dalam pengujian makro dan mikrostruktur aluminium seperti; *freezing, homogenization, preheat, hot or cold reduction, annealing, or solution or precipitation heat treatment* pada aluminium paduan. Interpretasi mikrostruktur yang baik pada *sample* dapat mengetahui historis logam secara menyeluruh. Untuk mendapatkan berbagai sifat yang diinginkan biasanya sulit diperoleh dari satu jenis material murni oleh karena itu dibuat sistem paduan. Reaksi aluminium dengan macam-macam unsur metalik menghasilkan fasa binery intermetalik. Dimana, bentuk utama komposisi larutan cair fasa padat pada reaksi pendinginan didahului adanya fasa padat dan tertinggalnya rongga larutan cair (reaksi peritektik). Sifat mekanis paduan ini dapat ditingkatkan lagi dengan berbagai macam cara, seperti, laku panas, sistem pengecoran dan pengerjaan.

Pada prinsipnya aluminium dan paduannya dikelompokkan atas dua jenis yaitu aluminium tuang dan aluminium canai (*wrought*). Silumin adalah paduan aluminium (Al-Si) merupakan jenis aluminium tuang yang paling baik karena mempunyai mampu tuang yang tinggi, duralumin adalah paduan aluminium (Al-Cu) yang paling terkenal karena

mempunyai kekuatan tinggi dan dapat dikeraskan dengan perlakuan panas. Jenis paduan aluminium yang mempunyai *wroughtability* yang tinggi adalah paduan Al-Mg. Secara umum aluminium dan paduannya mempunyai *strength to weight ratio* yang tinggi pada temperatur rendah dibandingkan jenis paduan logam yang lain. Dan paduan titanium juga mempunyai *strength to weight ratio* yang tinggi pada temperatur tinggi dibandingkan jenis paduan logam yang lain.

Paduan aluminium Al-Si banyak digunakan untuk berbagai keperluan karena mampu tuang, ketahanan korosi dan sifat mekaniknya yang baik. Untuk memperbaiki kekuatannya tergantung pada jumlah Cu dan Mg. Unsur Cu dan Mg membentuk fasa kedua seperti Al_2Cu dan Mg_2Si yang akan menghilangkan pengaruh jelek dari partikel intermetalik Fe seperti $Al_{15}(Fe,Mg)_3Si_2$ yang menyebabkan morfologi kompleks. Dari beberapa studi dilaporkan bahwa Si berhubungan dengan sifat tarik dan umumnya *failure* yang terjadi dalam tiga tingkat, yaitu:

1. *Cracking* partikel Si pada regangan plastik rendah (1-2%).
2. Perkembangannya partikel *crack* umumnya berupa pita-pita geser yang berbentuk *micro-crack* oleh partikel-partikel *crack*.
3. Gabungan *micro-crack* berkembang yang akhirnya menyebabkan *fracture*.

Partikel-partikel *fracture* Si, Cu, dan Fe selalu terjadi dalam partikel-partikel *brittle* khususnya Si dan Fe. *Fracture* pada Al_2Cu disebabkan oleh dekatnya $Al_{15}(Fe,Mg)_3Si_2$. *Cooling-rate* selama solidifikasi berpengaruh retakan partikel-partikel silikon dalam paduan terlarut (T4) pada Cu rendah dan Cu tinggi yang terpengaruh oleh tegangan yang terjadi. Nilai keretakan partikel silikon meningkat dengan naiknya tegangan yang terjadi. Nilai SDAS tinggi (46 μm) dengan tingkat Cu rendah dan Cu tinggi (3,0% dan 3,8%) memberikan nilai keretakan partikel-partikel silikon yang tinggi. Nilai SDAS rendah (27

μm) dengan tingkat Cu rendah dan Cu tinggi (3,0% dan 3,8%) memberikan nilai keretakan partikel-partikel silikon yang rendah.

Pada umumnya aluminium tempa dibuat dari ingot dan dilanjutkan dengan pemrosesan mekanik dan termal sampai beberapa tingkat perubahan struktur as-cast. Modifikasinya relatif kecil untuk tempa besar seperti bentuk forging, ketebalan plat dan ekstrusi berat pada hot working. Modifikasi menjadi besar seperti jumlah total reduksi dalam luas penampang awal yang ditingkatkan dengan pengerjaan panas dan dingin dan kebanyakan dengan perlakuan panas, seperti annealing dan *solution heat treating*. Modifikasi yang dapat dilakukan berupa :

- Pengaturan komposisi dan struktur kristal phase karena reaksi peritektik dapat ditunda selama casting.
- Larutan pada phase dapat larut dan *spheroidization* dan *coalesce* mengurangi energi permukaannya.
- Presipitasi temperatur tinggi insur mempunyai supersaturated larutan padat as-cast.
- Kerusakan mekanik pada kerapuhan phase intermetalik dan dikembalikan oleh partikel ini dengan prinsip arah pengerjaan.
- Deformasi pada originalbutiran matrik tuang dan dilanjutkan recovery atau rekristalisasi.

2.2. Sifat Mampu Alir

Umumnya aliran fluida dianalisis berdasarkan molekuler yang dirumuskan secara Newtonian, akan tetapi pada logam cair rumusan Newtonian kurang tepat karena pada cairan logam berlaku aktivasi. Sifat mampu alir (*fluidity*) logam cair digunakan untuk memperkirakan kemampuan logam cair mengisi rongga cetakan sehingga diperoleh



ketepatan bentuk dan dimensi, dan cacat yang terjadi dapat dieleminasi. Fluiditas didefinisikan sebagai kemampuan alir logam cair dalam cetakan sampai akhirnya berhenti karena terjadi solidifikasi, terutama untuk bagian-bagian yang tipis sehingga seluruh logam cair akan mengikuti bentuk dari cetakannya. Suatu aliran logam cair dapat berhenti mengalir akibat terjadinya proses solidifikasi dendrit yang tebal pada bagian ujung aliran sehingga menghambat aliran logam dibelakangnya akibatnya akan terjadi *cold shuts* dan *mis run*.

Fluidity erat kaitannya terhadap sifat mampu cor (*castability*) dari suatu logam. Dengan sifat fluiditas yang semakin baik permasalahan cacat coran (*reject*) dapat ditekan. Nilai fluiditas logam cair dipengaruhi oleh temperatur, komposisi, kebersihan logam cair, viskositas dan tegangan permukaan.

- Aliran logam, aliran transisi bila Reynolds number ($Re > 2100$) $Re = \frac{\bar{V}.D}{\nu}$
- Laminer atau streamline terjadi sliding pada lapisan yang sangat tipis atau partikel-partikel tersusun menyerupai lapisan. Gaya dalam aliran laminer dinyatakan dengan $\frac{F}{A} = \eta \frac{V}{Y}$ atau tegangan geser dua lapisan adalah $\tau_{YX} = \eta \frac{dV_X}{dy}$ yang mana, η = viskositas [poise], Y = arah momentum, X = komponen kecepatan (arah X).
- Turbulent partikelnya bergerak secara tidak beraturan dan menyebabkan kecepatannya berfluktuasi, kejadian semacam ini menyebabkan gangguan pada cairan. Faktor eksternal yang menyebabkan terjadinya turbulensi adalah kekasaran permukaan.

Viskositas gas diasumsikan dengan :

Molekul-molekul gas berupa bola-bola keras, diameter d, massa m dengan jumlah tak terhingga. Gaya molekul-molekul tersebut independent kecuali kalau bertumbukan.

Tumbukannya elastis dan mengikuti hukum konservasi momentum dan energi Molekul terdistribusi merata dalam konsentrasi n per unit volume aliran gas. Butiran terpisali cukup besar dibandingkan diameternya. Arah kecepannya sama dengan nilai dari nol sampai tak terhingga sehingga dapat dirumuskan bahwa;

Kecepatan Maxwellian; $\bar{v} = \sqrt{\frac{8K_B T}{\pi m}}$ Newton; $\eta = \frac{2}{3\pi^{3/2}} \frac{(m \cdot K_B \cdot T)^{1/2}}{d^2}$

Chapman dan Enskog; $\eta = 2,67 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{M T}}{d^2 \cdot \Omega}$

Yang mana, δ = jarak interatomik dalam kristal close-pocked pada 0 K [Å], m = berat molekuler [gram-mol], σ = diameter molekul [Å], Ω = integral collision teori Chapman-Enskog yang merupakan fungsi temperatur $K_B T/\epsilon$ pada persamaan tersebut nilainya mendekati σ dan ϵ/K_B , parameter ini digunakan untuk berbagai zat, untuk lebih jelasnya harga integral Ω dilihat pada tabel 2.1. dan nilai eksperimental ϵ/K_B dalam tabel 2.2.

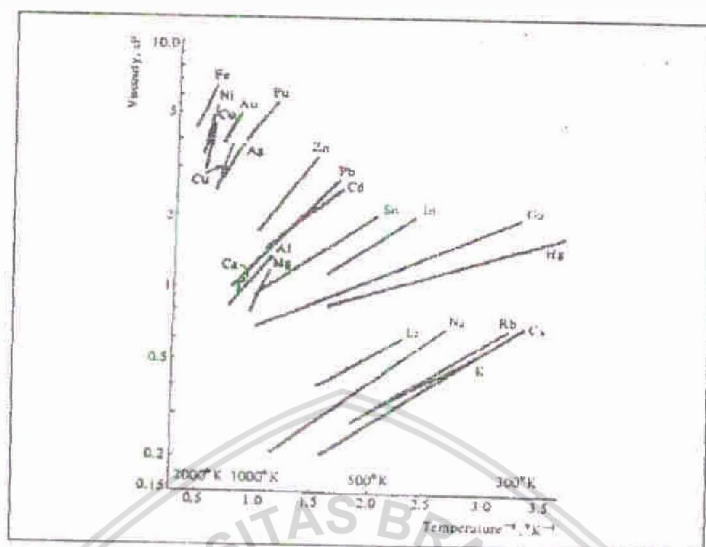
Tabel 2.1. Nilai integral Ω untuk viskositas dan fungsi $(K_B T/\epsilon)$ dari Lennard-Jones

$K_B T/\epsilon$	Ω	$f(K_B T/\epsilon)$
0,5	2,257	0,3134
1,0	1,587	0,6302
2,0	1,175	1,2048
10	0,8242	3,866
20	0,7432	6,063
40	0,6718	9,488
60	0,6335	12,324
80	0,6076	14,839
100	0,5882	17,137
200	0,5320	26,80
400	0,4811	41,90

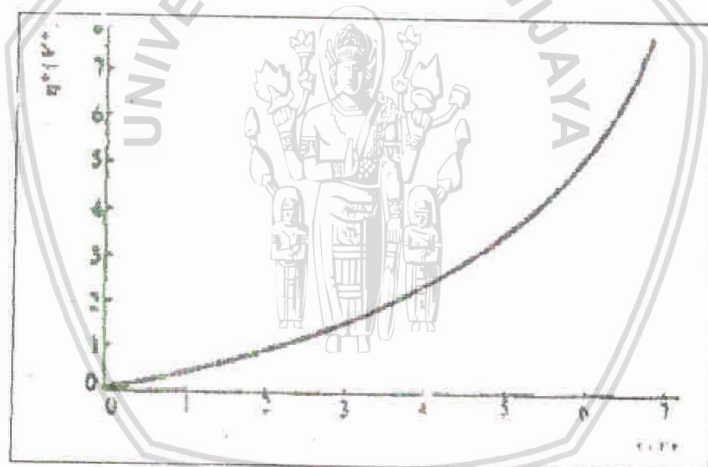
Tabel 2.2. Nilai eksperimental ϵ/K_B (dari Chapman)

Logam	Δ [Å]	ϵ/K_B [K]
Mg	3,20	4,300
Al	2,86	4,250
Ca	4,02	5,250
Fe	2,52	10,900
Ni	2,50	9,750
Cu	2,56	6,600
Zn	2,74	4,700
Sn	3,16	2,650
Au	2,88	6,750
Pb	3,50	2,800
Pu	3,10	5,550

Asumsi menurut data hubungan fungsional viskositas-temperatur untuk semua logam murni dan hubungan praktisnya dengan mengatur parameter ϵ/K_B dapat dilihat pada gambar 2.1. dan gambar 2.2.



Gambar 2.1. Viskositas Logam Cair

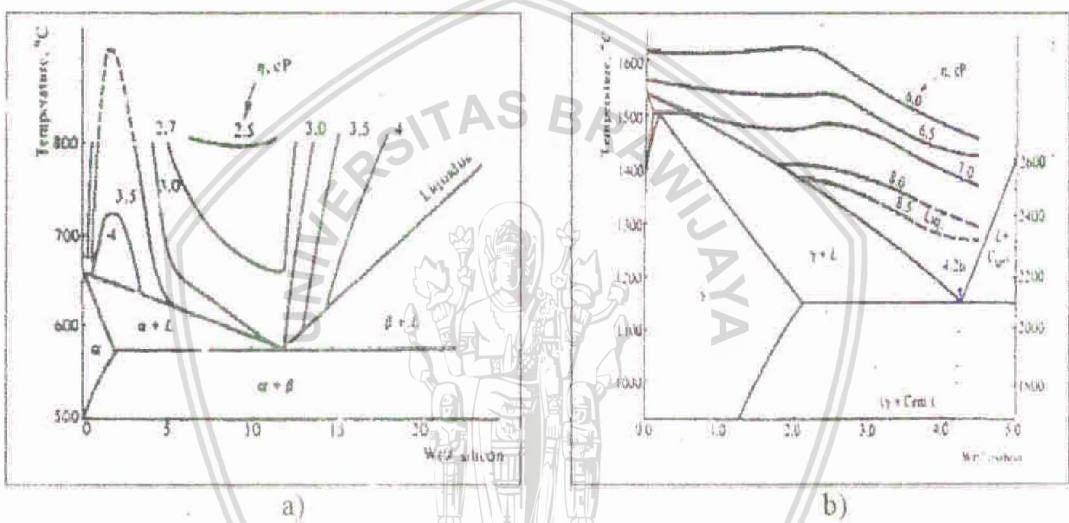


Gambar 2.2. Kurva Hubungan Viskositas Logam

Proses solidifikasi semakin lama maka logam akan mengalir semakin jauh, hal tersebut menandakan bahwa nilai fluiditas semakin baik. Peningkatan temperatur akan menurunkan viskositas logam cair sehingga logam cair akan mudah mengalir dalam saluran atau cavity yang berarti nilai fluiditas logam cair tersebut akan semakin tinggi.

Tetapi harus diperhatikan bahwa peningkatan temperatur tuang dapat menimbulkan cacat coran, seperti, porositas dan *shrinkage* sehingga sifat mekaniknya turun. Oleh karena itu temperatur tuang dalam proses pengecoran umumnya ditentukan 50 – 100 °C diatas temperatur leburnya.

Pada pengecoran logam viskositas sistem binary Aluminium-Silikon dan Ferro – Carbon sangat penting yang ditempatkan diatas diagram tersebut untuk menggambarkan besarnya pengaruh unsur paduan pada viskositas seperti ditunjukkan dalam gambar 2.3. Adanya penyimpangan daerah pada diagram tersebut sudah diobservasi untuk sistem paduan yang lain.



Gambar 23. Viskositas pada a). Paduan Al-Si, dan b). Paduan Fe-C

Menurut **Bambang Suharno, 2006**, Aluminium paduan ADC 12 (Al-12% Si) merupakan salah satu jenis aluminium yang memiliki kemampuan alir yang baik sehingga tepat dipakai dalam proses *high pressure die casting*. Tetapi hal tersebut masih terhambat oleh tingginya *reject* akibat cacat yang timbul dari sifat mampu alir yang rendah karena adanya gas hidrogen yang terlarut. Pengurangan kelarutan gas dapat dilakukan dengan metode vacuum, sehingga aluminium cair akan lebih lama membeku. Analisa penyebab

kenaikan fluiditas terjadi karena penambahan waktu degasing pada temperatur 680 dan 700 °C sehingga gas hydrogen yang terlarut dalam logam semakin berkurang jumlahnya dan porositas dalam aluminium padat semakin kecil.

Industri pengecoran pada umumnya melakukan pengujian fluiditas dengan alat ukur metode spiral, test piece dan vacuum (lihat gambar 2.4 atau dengan analisa composition factor (CF) dalam satuan cm. Untuk besi tuang CF dirumuskan sebagai berikut ; $CF = \%C + 0,25 \times \%S + 0,5 \times \%P$.

Hasil pengukuran fluiditas secara eksperimental dengan alat ukur metode spiral untuk besi tuang kelabu oleh **Rao, P.N, 1990**, dirumuskan;

$$\text{Fluiditas} = 37,846 \times CF + 0,228 \times T - 389,5 \text{ [cm]}$$

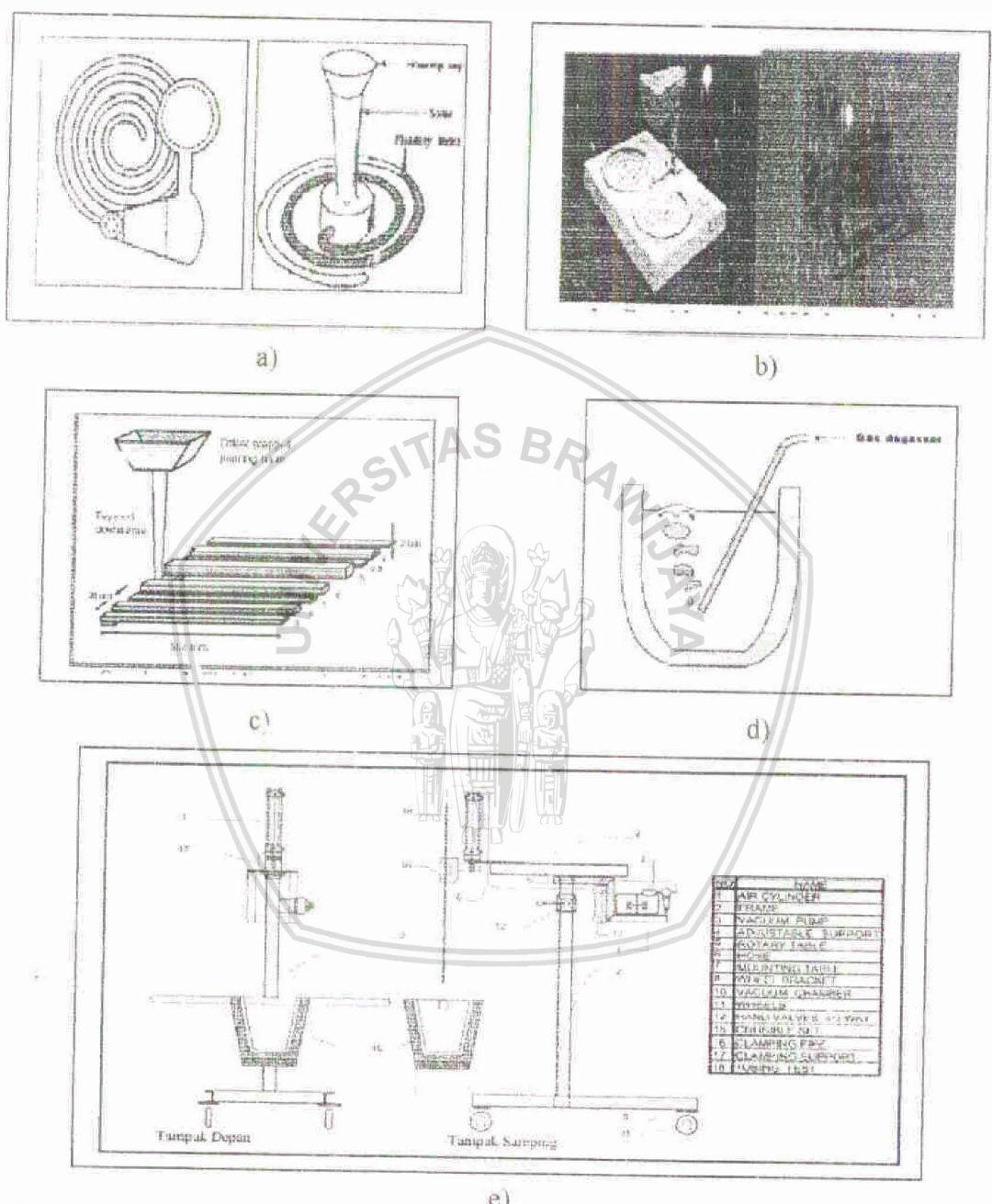
Dengan faktor komposisi diatas dapat pula ditentukan waktu penuangan yang tepat dalam

satuan detik untuk logam cair dengan rumus; $t = K \left(1,41 + \frac{T}{14,59} \right) \sqrt{W}$

Yang mana, K = faktor kemampuan alir, T = ketebalan rata-rata penampang lintang rongga cetakan [mm], dan W = masa logam cair [kg].

Metode spiral adalah metode tradisional dan sederhana, umumnya digunakan pada paduan aluminium dengan cetakan terbuat dari baja. Pada metode spiral ini, parameter-parameter yang sangat penting untuk menentukan fluiditas tidak terkonrol dengan baik tetapi semuanya tergantung pada keahlian operatornya, dan penuangan dengan menggunakan ladle dapat menyebabkan inklusi oksida yaitu kontaknya logam cair dengan udara. Fluiditas test piece merupakan salah satu jenis pengujian yang dikembangkan di Birmingham University, UK. Pengujian ini mempunyai kelebihan karena selain mengetahui kemampuan alir (panjang fluiditas) juga dapat mengetahui ketebalan yang dapat dilalui oleh logam cair melalui proses penuangan. Metode vacuum dikembangkan untuk mengurangi kondisi yang berfluktuasi pada saat penuangan logam

cair seperti yang terjadi pada penuangan dengan metode spiral. Pada alat ini logam dialirkan melalui pipa copper, stainless steel atau pyrex yang ditarik oleh tekanan vacuum. Teknik ini mendekati kondisi ideal dalam mengurangi variabel cetakan, termasuk ketepatan temperatur saat pengujian karena tidak menggunakan ladle.



Gambar 2.4. Alat Uji Fluiditas, a). Metode Spiral, b). Metode Double dan Rectangular spiral, c). Metode Test piece, d). Metode Vacuum dan e). Metode Vacuum Hasil Inovasi dari Bambang Suharno (UI)

2.3. Viskositas Logam Cair

Chapman memodelkan viskositas logam cair pada struktur atom yang spherical dan mempunyai potensial diantara atom yang diekspresikan sebagai fungsi $\phi(r)$ jarak diantara atom dan energi, seperti yang dikerjakan oleh **Lennard-Jones**, pada potensial

$$\phi(r) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\delta}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\delta}{r} \right)^6 \right]$$

Perubahan ekspresi ke waktu rata-rata pada interaksi diantara atom-atom, bila gerakan molekuler normal yang terdistribusi oleh gradient kecepatan, dan yang disebabkan oleh semua fluk momentum ke gaya intermolekuler (dengan mengabaikan kontribusi sangat kecil dari gerak kinetik atom). Hubungan diantara viskositas, parameter energi ϵ , dan jarak pemisahan δ . Selanjutnya dengan asumsi semua logam cair mengikuti fungsi $\phi(r)$ mempunyai penurunan viskositas η yang merupakan fungsi penurunan temperatur T^* dan volume V^* sehingga menghasilkan hubungan; $\eta^* (V^*)^2 = f(T^*)$ dan

$$\eta^* = \frac{\eta \delta^2 N_0}{\sqrt{MRT}}, \quad T^* = \frac{K_B T}{\epsilon} \quad \text{dan} \quad V^* = \frac{1}{n \delta^3}$$

Yang mana, δ = jarak interatomik dalam kristal pada 0 K [\AA], ϵ = karakteristik energi logam spesifik, N_0 = bilangan Avogadro, M = berat atomik, R = konstanta gas, K_B = konstanta Boltzmann, n = jumlah atom per unit volume.

Dari gambar 2.1, semua logam mengikuti fungsi hubungan data viskositas-temperatur untuk logam murni yang dihubungkan dengan parameter ϵ/K_B sampai semua data untuk logam pada kurva turun satu point seperti ditunjukkan pada gambar 2.2. Tabel 2.2, nilai ϵ/K_B dimulai dengan mengetahui (mengukur) harga untuk sodium dan potasium. Kenyataannya dengan mengatur parameter yang tidak diketahui, memungkinkan hubungan semua viskositas logam-cair pada kurva tunggal dapat diketahui. Dalam teori peleburan menunjukkan titik lebur proposional terhadap ϵ (ini sudah diobservasi untuk

jenis material yang lain). Penentuan harga ε/K_B secara empirik seperti dalam tabel 2.2. yang diplot sebagai fungsi temperatur lebur absolut mengikuti persamaan :

$$\frac{\varepsilon}{K_B} = 5,2.T_{lebur}$$

Untuk logam titik leburnya tinggi, dapat dipergunakan untuk memprediksi viskositas.

Dalam proses pengecoran, logam cair dalam ladle yang bergerak dalam lokasi penuangan harus tetap cair sebelum dituang kedalam cetakan. Oleh karena itu perlu diketahui waktu yang diperlukan logam cair berada dalam ladle. Dari persamaan

$$\text{Bernoulli; } \frac{\bar{V}^2}{2\beta} + g\Delta Z + E_f = 0$$

Yang mana, E_f = merupakan factor gesekan akibat kontraksi nozle pada ladle yang dapat diprediksi dengan persamaan, $E_f = \frac{1}{2}e_f\bar{V}^2$, sampai ladle habis β berubah demikian

juga e_f yang merupakan fungsi bilangan Reynolds. Secara teknis kecepatan aliran dinyatakan dengan, $\bar{V} = \sqrt{2gh}$ dengan adanya koefisien pancaran $C_D = \frac{1}{\sqrt{(\frac{1}{\beta} + e_f)}}$

sehingga kecepatan aliran logam cair dari ladle ke cetakan dirumuskan:

$$\bar{V} = \frac{1}{\sqrt{(\frac{1}{\beta} + e_f)}} \sqrt{2gh}$$

Waktu yang diperlukan untuk menuang habis logam cair dalam ladle dirumuskan dengan,

$$t_f = \frac{\pi D_L^2}{2A_N C_D} \left(\frac{h_0}{2g}\right)^{1/2}$$

Yang mana, D_L = diameter ladle, A_N = luas penampang nozzle dan h_0 = tinggi logam cair dalam ladle. Distribusi kecepatan pada gambar 2.5. maka distribusi kecepatannya

dirumuskan sebagai berikut : $V_2 = \frac{\rho \cdot g \cdot \delta^2 \cdot \cos \beta}{2\eta} \left[1 - \left(\frac{x}{\delta} \right)^2 \right]$ dengan bentuk

parabolik, profil kecepatannya dan besarnya dapat dihitung :

a). Kecepatan maksimum, V_2^{\max} , kecepatan pada $x = 0$.

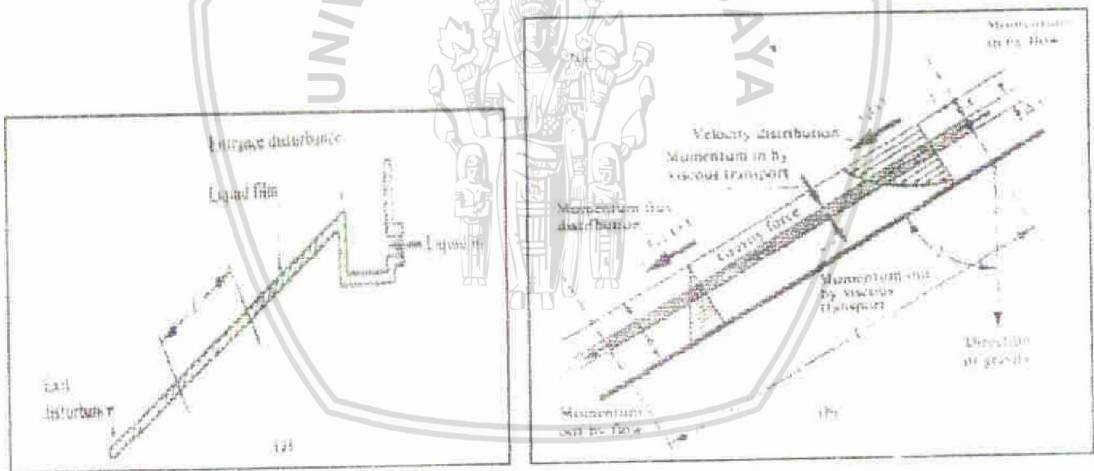
$$V_2^{\max} = \frac{\rho \cdot g \cdot \delta^2 \cdot \cos \beta}{2\eta}$$

b). Kecepatan rata-rata,

$$\bar{V}_2 = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \frac{\rho \cdot g \cdot \delta^2 \cdot \cos \beta}{2\eta} \left[1 - \left(\frac{x}{\delta} \right)^2 \right] dx = \frac{\rho \cdot g \cdot \delta^2 \cdot \cos \beta}{3\eta}$$

c). Volume aliran, yang dihasilkan pada kecepatan rata-rata dan aliran penampang

melintang, $Q = V_2 (W \delta) = \frac{\rho \cdot g \cdot W \cdot \delta^3 \cdot \cos \beta}{3\eta}$

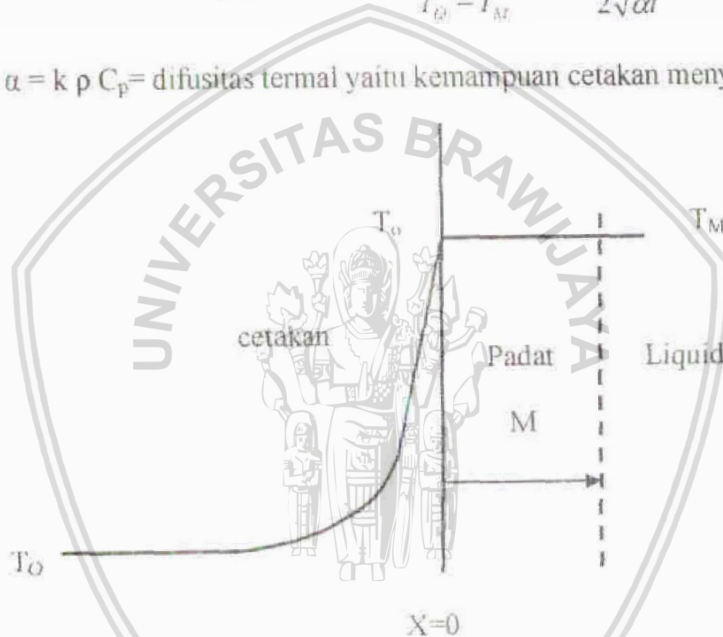


Gambar 2.5. Aliran film miring

2.4. Solidifikasi Logam

Pada umumnya logam cair dituang ke dalam cetakan pasir kecuali untuk tujuan tertentu. Cetakan pasir merupakan konduktor panas yang jelek sehingga laju

solidifikasinya terhambat dan menghasilkan struktur logam yang *coarseness* dan *fineness*. *Gradient* panas selama pembekuan juga mempengaruhi terjadinya mikro porositas dalam paduan. Logam murni cair tanpa panas lanjut dituang kedalam cetakan akan menumbuk dinding rongga cetakan pada konduktor yang jelek. Gambar 2.6, menunjukkan distribusi temperatur logam dan cetakan waktu solidifikasi. Karena semua aliran panas ditahan dalam cetakan maka temperature permukaan T hampir sama dengan temperatur logam cair T_M . Selama pembekuan temperature turun, selanjutnya logam membeku sebagian dan *interface* logam-cetakan temperaturnya konstan $T_S \approx T_M$ pada kondisi seperti ini temperatur dalam cetakan dinyatakan dengan $\frac{T - T_M}{T_0 - T_M} = \text{erf} \frac{X}{2\sqrt{\alpha t}}$ yang mana, X = jarak ke cetakan, $\alpha = k / \rho C_p$ = difusitas termal yaitu kemampuan cetakan menyerap panas.



Gambar 2.6. Distribusi temperatur selama solidifikasi logam dalam cetakan pasir

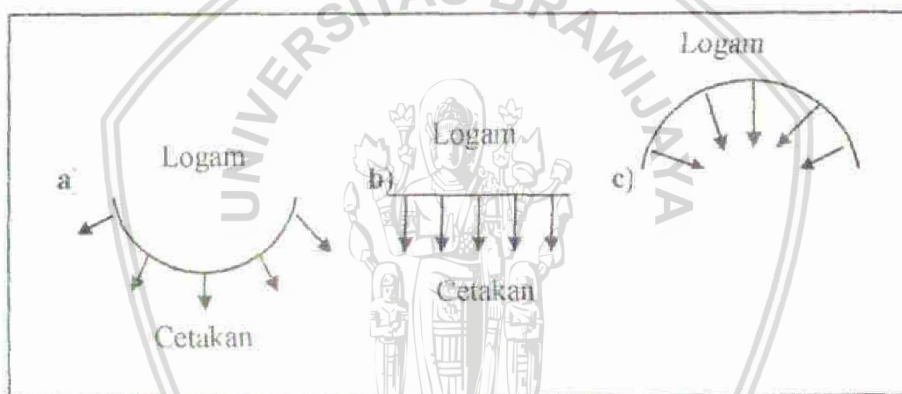
$$\text{Flux panas masuk ke cetakan dirumuskan } q|_{x=0} = \frac{\sqrt{k\rho C_p}}{\sqrt{\pi t}} (T_M - T_0)$$

Yang mana, C_p = kemampuan cetakan menyerap panas. Laju panas laten yang terbentuk pada proses solidifikasi per unit luas adalah $\rho H_f \frac{dM}{dt}$, yang mana M merupakan ketebalan logam padat yang dinyatakan dalam rumus sebagai berikut;

$$M = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{T_M - T_0}{\rho H_f} \right) \sqrt{\frac{k\rho C}{\rho}} \sqrt{t}$$

Dari persamaan diatas, jumlah solidifikasi tergantung pada karakteristik logam $(T_M - T_0)$, H_f dan difusitas panas cetakan, $k\rho C$.

Pendinginan pada cetakan dinding datar secara praktis umumnya tidak masalah, permasalahan sering muncul pada saat dinding cetakan mempunyai bentuk yang kompleks. Pada cetakan dinding contour akan mempengaruhi waktu solidifikasi. Contoh pada gambar 2.7, aliran panas mencolok pada dinding *convex* dan *concave* dibandingkan dinding cetakan datar. Aliran panas masuk dinding *convex* adalah divergen dengan secara langsung dan lebih cepat dibandingkan dinding datar, dan aliran panas masuk permukaan *convergent* lebih lambat dibanding dengan dinding datar.



Gambar 2.7. Pengaruh bentuk pada fluk panas kedalam cetakan
a). Permukaan convex, b). Permukaan datar, c). Permukaan concave

Pengaruh bentuk dalam pengecoran logam sering diabaikan karena daerah pemanasan dalam cetakan adalah tipis dan perbedaan aliran panas antara datar, convex dan concave kecil. Secara umum untuk semua bentuk dengan luasan A cetakan menyerap

panas Q dalam waktu t , dirumuskan $Q = \frac{2Ak(T_M - T_0)}{\sqrt{\pi\alpha}} \sqrt{t}$

Solidifikasi menyeluruh pada pengecoran dengan volume V semua panas latennya harus dihilangkan, dimana panas laten $Q_L = \rho'VH_f$, bila panas laten dimasukkan persamaan, maka waktu solidifikasi pengecoran dalam perbandingan volume terhadap luas permukaan dirumuskan, $t = C \left(\frac{V}{A} \right)^2$ dimana harga $C = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\rho' H_f}{T_m - T_o} \right)^2 \left(\frac{1}{k\rho C_p} \right)$

Persamaan tersebut mengacu pada hukum Chvorinov's dan C merupakan konstanta Chvorinov yang dapat dipergunakan untuk menentukan waktu solidifikasi dengan perbedaan bentuk dan ukuran. Pengecoran dengan hasil geometris yang baik harus memperhatikan bahan cetakan yang dapat menjadi jenuh oleh panas dan ada atau tidaknya inti dalam cetakan tersebut. Keberhasilan menghubungkan cetakan menyerap panas per unit luas yang dilepaskan logam tidak saja membawa keberhasilan dalam bentuk coran tetapi juga ukurannya.

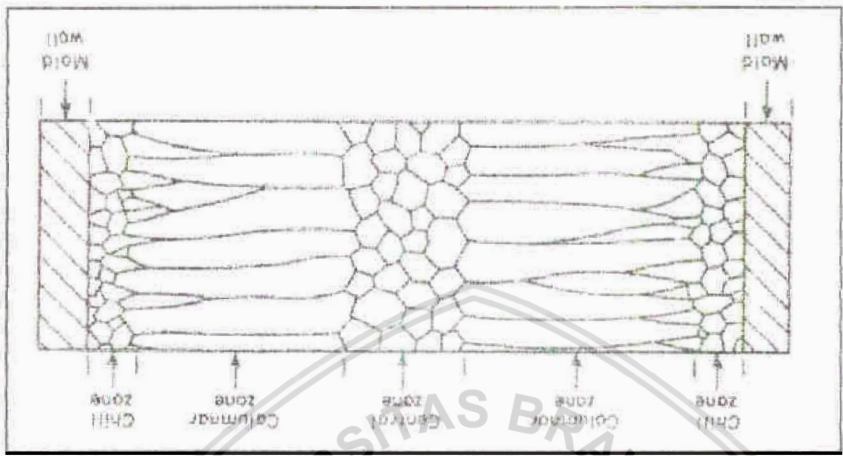
Untuk aplikasi yang memerlukan kepresisian perlu dimasukkan pengaruh bentuk cetakan pada solidifikasinya. Kuantitas efek bentuk dalam pengecoran terdiri tiga bentuk dasar, yaitu; 1). bentuk datar, 2). bentuk silinder dan 3). bentuk bola. Pertama, definisi dua parameter dimensi, β dan γ . Dimana $\beta = \frac{V}{A\sqrt{at}}$ dan $\gamma = \left(\frac{T_m - T_o}{\rho' H_f} \right) \rho C_p$

Dengan parameter ini, waktu solidifikasi ketiga bentuk dapat dibandingkan, seperti bentuk datar, $\beta \equiv \gamma \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \right)$, silinder, $\beta \equiv \gamma \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} + \frac{1}{4\beta} \right)$ dan bola, $\beta \equiv \gamma \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \right) + \frac{1}{3\beta}$

Pengecoran secara komersil dilakukan dengan membekukan logam dari phase cair dan bentuk intermeditnya disebut ingot yang akan dikerjakan menjadi produk akhir. Pembuatan ingot dalam pengecoran merupakan proses yang sangat penting untuk pembuatan produk tempa, seperti plate dan beam yang dikerjakan secara plastis menjadi produk akhir. Disamping pengecoran banyak logam yang dikerjakan dengan transformasi



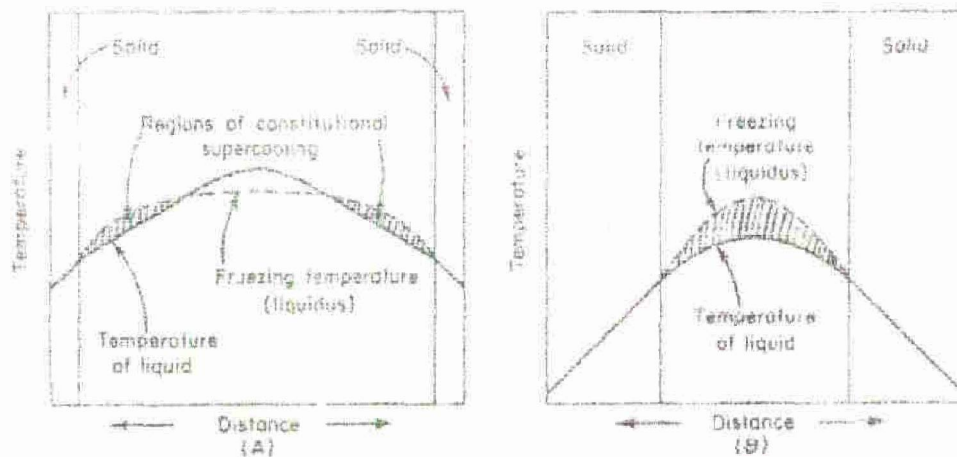
Gambar 2.7. Penampang Melintang Ingot dengan tiga daerah struktur



Pengecoran ingot merupakan tahapan manufaktur yang penting untuk menghasilkan produk tempa. Bila ingot dibekukan ada tiga fase terpisah dalam pembekuan, tiap phasesnya memberikan aturan struktur yang terdiri dari karakteristik ukuran dan bentuk butir, struktur tersebut diilustrasikan dalam gambar 2.8. Daerah pendinginan cepat (chill) terdiri dari butiran equiaxed kecil yang orientasinya secara acak. Semakin kedalam ukuran butirnya semakin besar dengan bentuk pipih yang panjangnya sejajar arah aliran panas (normalnya kearah dinding cetakan). Butiran ini mempunyai orientasi yang kuat dengan arah sejajar pertumbuhan butir, karena bentuknya disubordinasi dengan butiran equiaxed lebih besar-besar dari daerah chill. Pada logam murni yang dituang ke mold dengan temperatur sangat rendah terjadi pendinginan sangat cepat pada daerah kontak mengakibatkan logam cair yang dekat dengan cetakan turun dibawah keseimbangan temperatur pembekuan. Karena cepatnya temperatur turun sehingga menghasilkan supercooling. Bila laju nucleasi relatif cepat akan diperoleh ukuran butir yang kecil. Bentuk kristal ini tidak tergantung dengan orientasi yang acak.

anda-cair, seperti partikel-partikel paduan dilakukan hot pressing dan sintering. Ternyata sifat akhir dari logam ditentukan dari proses solidifikasinya.

Pembuaan ingot dalam pengecoran merupakan tahapan yang sangat penting dalam pembuatan produk tempa, seperti plate dan beam yang dikerjakan secara plaslis menjadi produk akhir. Apabila logam cair dituang kedalam cetakan, supercooling menyebabkan pembentukan dendrit yang terjadi karena panas yang rendah. Dalam paduan menambah panas disebabkan unsur-unsur supercooling. Apabila disini terjadi pembekuan dendrit dari observasi, hasilnya sama dengan orientasi jenis yang diatas yaitu arah pertumbuhan dendrit dengan butiran columnar sejajar arah aliran panas. Mekanisme pertumbuhan dendrit dalam pengecoran paduan mengurangi sedikit keuntungan orientasi kristal yang berbeda dari logam murni. Hasil yang penting pada pemilihan supercooling dalam paduan merupakan penambahan keuntungan pada daerah pusat equiaxed. Interface padat-cair diawali dari sisi cetakan yang berbeda masing-masing dipusat ingot yang besar, disini terlihat adanya overlap. Secara skematik gambar 2.8. bagian kanan menunjukkan tingkat awal pembekuan dan bagian kiri menunjukkan akhir pembekuan bila kedua daerah tersebut terjadi secara bersamaan. Pada daerah ini, supercooling sangat besar dapat terjadi dalam cairan yang dekat pusat ingot. Disini ada dua penyebab utama, pertama, konsentrasi larutan dalam cairan hanya didepan interface cenderung bertambah dengan meningkatkan pertumbuhan butir daerah columnar, yang kebutuhannya kecil dan temperaturnya rendah pada interface untuk solidifikasi selanjutnya. Kedua, temperatur pusat ingot cenderung menyamai interfacenya seperti penutup bersama. Pengaruh kedataran countour pada kurva temperatur-jarak dalam cairan. Apabila daerah pusat equiaxed terlihat dlm ingot, berarti menunjukkan perubahan supercooling yang terjadi dalam daerah ini dan dapat berkembang ke titik nuklasi dalam cairan ada pusat pengecoran. Kristalisasi plam daerah ini terjadi, selanjutnya terjadi pertumbuhan kristal baru dan pertumbuhannya tidak dilanjutkan oleh kristal yang memanjang pada daerah columnar.



Gambar 2.8. Perubahan daerah *supercooling* pada pusat paduan ingot yang menghasilkan pusat daerah *equiaxed*

Pada umumnya logam yang diproduksi didunia diperoleh dengan proses pengecoran dengan berbagai bentuk, berbagai ukuran tetapi hanya 20% saja yang memenuhi sifat-sifat fungsionalnya. Rendahnya kualitas logam coran terjadi karena adanya unsur-unsur pengotor, mikrostruktur dan porositas yang tidak terkontrol. Pengontrolan kualitas logam coran yang efektif dan efisien dilakukan pada saat logam cair mengalami proses solidifikasi. Pengecoran logam secara komersil interface solid-liquid berupa dendritik. Seperti telah diuraikan diatas bahwa solidifikasi dimulai dari interface liquid-solid arah longitudinal dalam pembentukan/penyusunan dendrit. Transport secara longitudinal memberikan peningkatan adanya pemisahan makro dalam hubungan paralel ke sumbu dendrit. Dan transport larutan memberikan peningkatan mikro dengan arak tegak lurus sumbu dendrit.

BAB III

METODE PENELITIAN

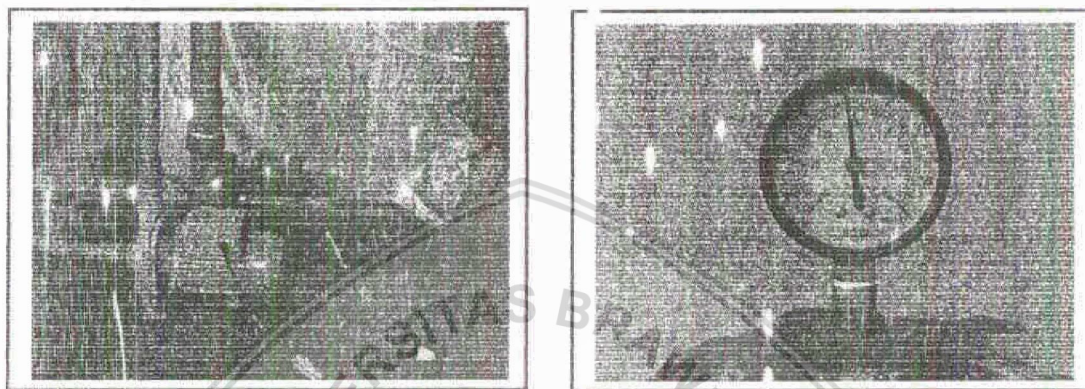
3.1. Rancangan Penelitian

Penelitian eksperimental nyata ini diawali dengan melebur aluminium skrap (kusen) dalam tungku reverberatory untuk mendapatkan ingot aluminium murni yang digunakan sebagai bahan dasar membuat Magsimal-59. Ingot aluminium murni tersebut berukuran diameter rata-rata 6,5 cm dan tinggi 3,0 cm yang dituang dalam cetakan permanen. Selanjutnya ingot aluminium murni tersebut diuji komposisi kimia dengan spark spektrometry (hasil pengujian dapat dilihat dalam Bab IV). Magsimal-59 dibuat dengan memadukan ingot aluminium murni dengan silikon dan magnesium dalam tungku reverberatory. Setelah paduan aluminium-silikon-magnesium tersebut melebur dibuat ingot yang dituang dalam cetakan permanen, seperti pembuatan ingot aluminium murni. Ingot magsimal-59 tersebut digunakan sebagai bahan baku untuk pembuatan pengecoran disk dalam sistem pengecoran vakum.

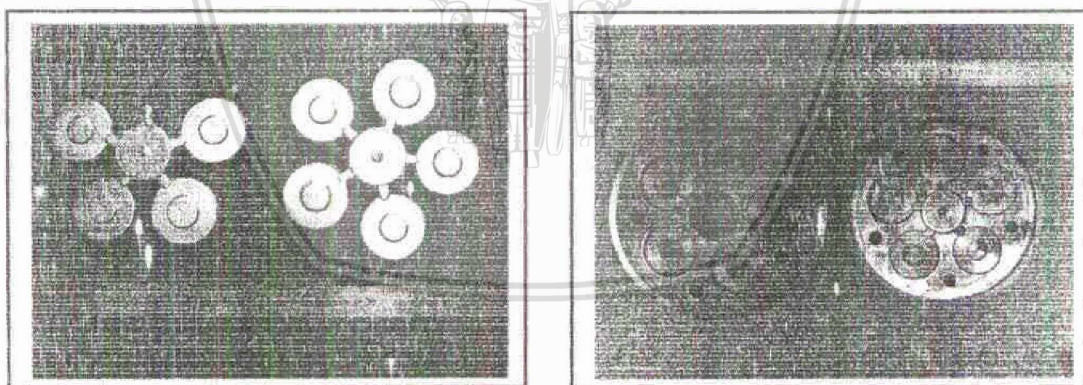
Tahap selanjutnya, ingot magsimal-59 diproses dengan sistem pengecoran vakum (melt, pouring, dan solidification). Bentuk dari hasil coran Magsimal-59 adalah disk. Dalam sekali tuang tercetak 5 disk dengan ukuran ketebalan yang bervariasi (5; 7,5; 10; 12,5 dan 12,5). Untuk mencegah panas kejut yang terjadi pada cetakan dan memberi waktu logam cair mengisi rongga cetakan maka cetakan permanen dipanasi terlebih dahulu sampai temperatur 300 °C.

Dalam penelitian ini parameter tekanan pengecoran (vakum) sebagai variabel bebas (760, 600, 500, 400, 300 mmHg), instalasi pembangkit tekanan vakum dalam sistem pengecoran dan hasil pevakuman tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.1. Sebagai

variabel terikat dalam penelitian adalah metalografi (mikro struktur dan porositas), sifat mekanik (kekerasan), sifat fisik berat jenis. Hasil penelitian ini dirumuskan dalam bentuk korelasi variabel terikat dan variabel bebas. Untuk lebih jelasnya lihat dalam data dan pembahasan pada BAB IV, benda uji (casting product) dan cetakan permanen yang digunakan dalam penelitian seperti terlihat dalam Gambar 3.2. Sebagai parameter kontrol dalam penelitian penuangan Magsimal-59 dilakukan pada temperatur 800 °C.



Gambar 3.1. Instalasi pembangkit vakum dan tekanan pevakuman



a)

b)

Gambar 3.2. Hasil fisik pengecoran vakum
a). Casting product dan b) cetakan permanen

3.2. Prosedur Pengoperasian Tungku Vakum

1. Timbang dan masukan 7 kg ingot paduan aluminium-silikon-magnesium (*as-cast* aluminium yang sudah teridentifikasi unsur kimianya) kedalam mangkok peleburan (*stainless steel* yang dipasivasi).
2. *Setting* cetakan logam dalam ruang tuang sehingga lubang *pouring basin* cetakan tersebut tepat berada dibawah lubang tapping pada mangkok peleburan. Penuangan Magsimal-59 melt kedalam cetakan menggunakan sistem otomatis yaitu pengisian cetakan tanpa merubah posisi mangkok peleburan atau mengambil logam cair dengan ladle (mangkok kecil).
3. Tutup rapat-rapat pintu kaca (tungku peleburan) dan pintu besi *stainless steel* pada ruang *pouring* dan pastikan udara luar tidak dapat masuk kedalam ruang peleburan dan ruang tuang.
4. Jalankan pompa air, sehingga air akan bersirkulasi dan udara dalam ruang peleburan dan ruang tuang tertarik oleh saluran air dalam nozzle. Biarkan pompa tersebut beroperasi sampai tekanan ruang peleburan dan ruang tuang turun sesuai dengan rancangan percobaan (760, 600, 500, 400, 300 mmHg).
5. Hubungkan tungku tahanan listrik peleburan dengan sumber listrik dan *setting* pada temperatur peleburan *as-cast*, setelah isi dalam mangkok *stainless steel* mencair (500 – 600 °C). Selanjutnya temperatur tungku dinaikkan menjadi 700 °C dengan laju pemanasan 5 °C/menit.
6. *Checking* dan pastikan dari pintu kaca bahwa *as-cast* dalam mangkok *stainless steel* sudah mencair keseluruhannya.
7. Hubungkan tungku tahanan listrik ruang tuang dengan sumber listrik dan *setting* temperaturnya sehingga cetakan logam dalam ruang tuang bersuhu 300 °C.

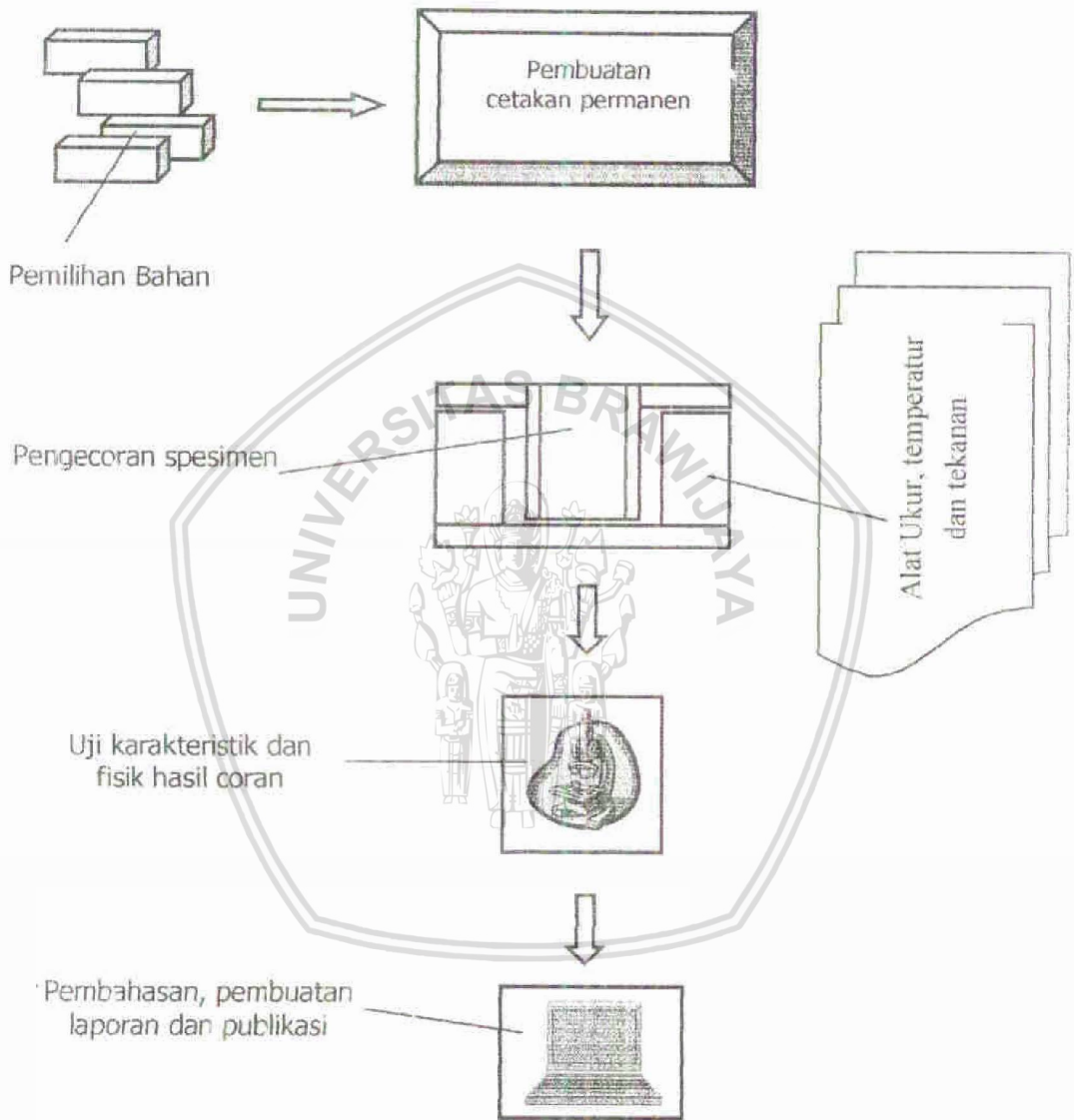
8. Apabila no 5 dan no 6 sudah tercapai tuas cerat pada ruang peleburan diangkat dengan memutar roda akibatnya paduan aluminium cair dalam mangkok peleburan mengalir kedalam *gating system* cetakan pada ruang tuang.
9. Biarkan paduan aluminium cair dalam cetakan permanent membeku (solidifikasi), stop kerja pompa, putus aliran listrik kesistem tungku *vacuum* dan buka pintu kaca dan pintu *stainless steel*.
10. Keluarkan cetakan logam dari ruang penuangan, buka cetakan dan ambil produk cor dari cetakan logam.
11. Timbang produk coran, pisahkan dan timbang paduan aluminium beku dan *dross* yang tersisa dalam mangkok peleburan *vacuum*.

3.3. Peralatan Pengecoran dan Penelitian

1. Manometer *vacuum* untuk melihat tekanan dan perubahan tekanan dalam ruang peleburan dan ruang penuangan selama proses pengecoran.
2. Unit *thermocouple* (terdiri dari *thermocouple*, *thermo regulator*, dan *thermo monitor*) untuk memonitor energi panas peleburan yang masuk kedalam ruang peleburan dan ruang penuangan dengan cara melihat temperaturnya.
3. Cetakan permanent dari baja carbon sedang digunakan untuk pembuatan *test piece* coran. Dari *test piece*, fluiditas logam yang dituang dapat diketahui.
4. Timbangan *electric digital* berskala centigram untuk menimbang material yang dilebur dan 1 spesimen yang diuji densitasnya.
5. *Spark Spectrometry (SS)* untuk melihat unsur kimia yang terdapat dalam *as-cast* dan produk hasil coran.

6. *Optic microscope* untuk melihat bentuk, ukuran, distribusi, dan fasa/struktur mikro yang terdapat dalam produk coran.

3.4. Alur Penelitian



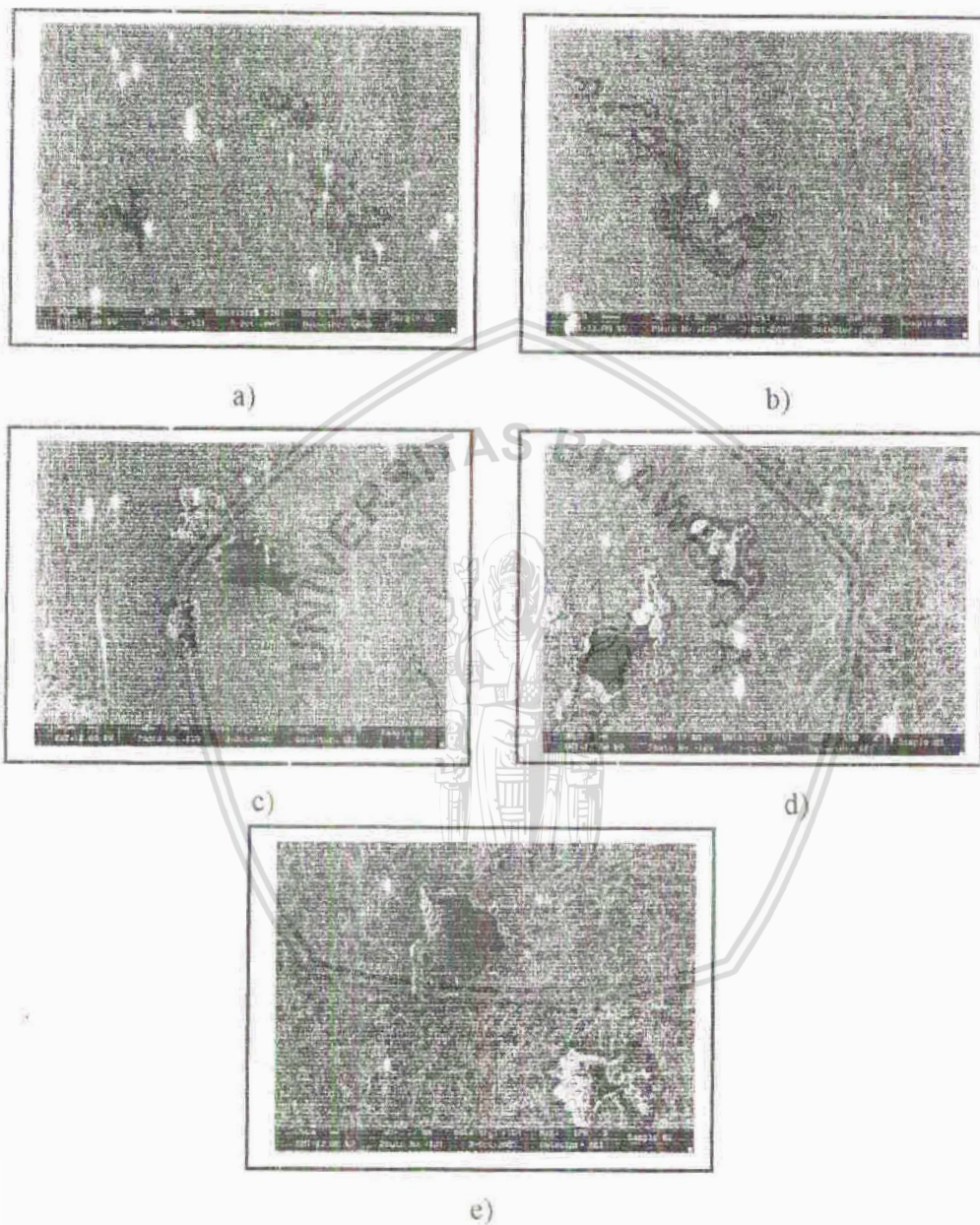
Gambar 3.3. Alur kegiatan penelitian

BAB IV

DATA DAN PEMBAHASAN

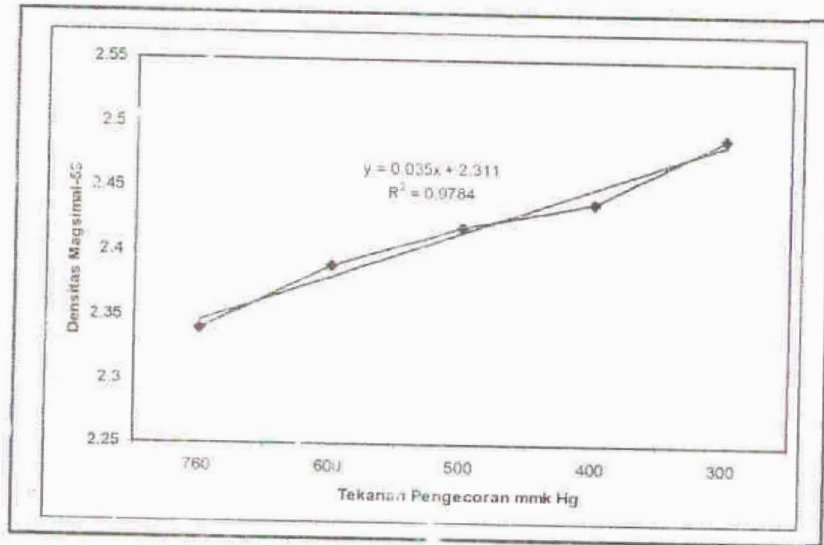
4.1. Data Penelitian

1. Metalografi



Gambar 4.1. Mikrostruktur dan porositas pada Magsimal-59
 a). Tekanan 760 mmHg, b). Tekanan 600 mmHg, c). Tekanan 500 mmHg
 d). Tekanan 400 mmHg, e). Tekanan 300 mmHg

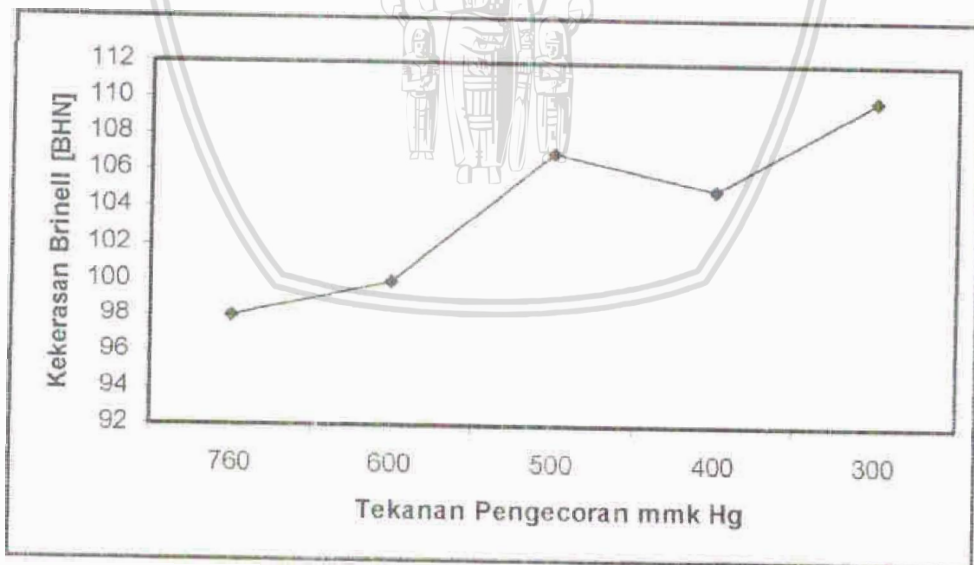
2. Densitas Magsimal-59



Gambar 4.2. Grafik densitas Magsimal-59

Grafik densitas maksimal diperoleh dari pengukuran Piknometer dengan replikasi 5 kali dan standar deviasi pada tekanan 760, 600, 500, 400, dan 300 mmk Hg masing-masing 0,06; 0,15; 0,11; 0,14; dan 0,13.

3. Sifat Mekanik



Gambar 4.3. Grafik kekerasan Magsimal-59

4.2. Pembahasan

Menurut Geaman, V.; Jiman, V. & Stoicanescu Maria.; 2008, porositas penyebab utama *reject* dan *rework* nya produk coran dalam industri pengecoran. Porositas disebabkan oleh kebocoran *feeding* sehingga terjadi *shrinkage* selama solidifikasi atau pengaruh gas yang terlarut. Terakhir model porositas untuk pengecoran paduan aluminium, termasuk pengaruh kelarutan hidrogen. Porositas yang terjadi karena kebocoran aliran *feeding* (*shrinkage-related porosity*), volume pori akan meningkat dengan laju pendinginan solidifikasi. Hal ini terjadi karena adanya hubungan kriteria Niyama, yang berbasis pada penurunan tekanan liquid memotong daerah *mushy*. Secara matematis kriteria Niyama dinyakan dengan perbandingan gradient temperatur dengan laju pendinginan (G/\sqrt{T}). Kriteria Niyama ini hanya berlaku untuk *shrinkage porosity* saja, bukan untuk porositas gas. Pada umumnya *shrinkage porosity* meningkat dengan berkurangnya nilai kriteria Niyama (yaitu dengan bertambahnya laju pendinginan). Jika porositas dikaitkan dengan gas, sampai saat ini masih dicari keterangan mengapa porositas gas berkurang dengan bertambahnya laju pendinginan. Suatu kemungkinan mekanisme fisik untuk pembentukan pori (*pore*) dalam percobaan didekati dengan pengontrolan difusi hidrogen dalam leburan sehingga terbentuk pori, seperti yang diusulkan oleh Lee dan pekerjanya. Jika kejadian ini dilanjutkan dengan peningkatan laju pendinginan akan menurunkan porositas, karena waktu yang digunakan selama solidifikasi gas yang terdifusi ke pori-pori, dan para periset akan mencari isu ini secara detail. Jumlah porositas ditentukan dengan rumusan :

$$\text{Porositas}[\%] = \frac{\text{densitaspaduan} - \text{densitascoran}}{\text{densitaspaduan}} \times 100\%$$

Seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.2. yang mana densitas paduan Magsimal-59 meningkat dengan berkurangnya tekanan atau meningkatnya kevakuman. Pengoperasian rumusan porositas dengan memasukan densitas Magsimal-59 yang meningkat menghasilkan porositas *casting product* berkurang. Dan secara metalografi, struktur lengan dendrit utama (PDAS) dalam Gambar 4.1, terlihat lebih jelas dan lebih pendek dalam kevakuman yang lebih tinggi (300 mmk Hg) dibanding tingkat kevakuman yang lebih rendah (di atas 300 mmk Hg seperti, 400, 500, 600, dan 760 mmk Hg). Porositas pada tingkat kevakuman yang lebih rendah, terlihat terdistribusi secara sporadis sedang pada tingkat kevakuman yang lebih tinggi porositas terkonsentrasi pada bagian tertentu. Penyebaran sporadis porositas terjadi karena gas hidrogen yang terlarut dalam Magsimal-59 melt tidak sempat keluar selama proses solidifikasi dan terjebak dalamnya.

Paduan aluminium komersil merupakan sistem eutektik dengan larutan padat yang terbatas. Solidifikasi paduan aluminium dalam logam lasan berupa aluminium yang diperkaya dendrit oleh pertumbuhan epitaxial pada proeutektik. Uji mikrostruktur merupakan prinsip dasar evaluasi paduan dan produk untuk menentukan pengaruh pabrikan dan perlakuan panas sampai pengaruh prosedur baru dan untuk menganalisis sebab *failure*. Beberapa perubahan yang muncul secara bersamaan dalam pengujian makrostruktur dan mikrostruktur aluminium seperti; *freezing, homogenization, preheat, hot or cold reduction, annealing, or solution or precipitation heat treatment* pada paduan aluminium. Interpretasi mikrostruktur yang baik pada *sample* dapat mengetahui historis logam secara menyeluruh. Pengaruh paduan dalam aluminium akan berpengaruh pada sensitifitas retak pembekuan dan retak pembekuan maksimum akan terjadi aluminium murni artinya aluminium murni tidak mampu mengurangi terjadinya retak dalam proses pembekuan.



Penyusutan merupakan faktor yang harus dipertimbangkan dalam pembuatan model dan bahan cor yang digunakan. Bahan aluminium mempunyai penyusutan volume sebesar 1,65 dan bahan atau unsur yang hilang selama proses pengocoran (mulai tempat penyimpanan sampai produk coran) berkisar antara 5 %. Penyebab terjadinya cacat coran seperti salah alir dan *cold shuts* yaitu logam cair tidak mampu mengalir sehingga menimbulkan diskontinuitas hasil coran, cacat semacam ini biasanya disebabkan oleh temperatur tuang, ukuran dan penempatan lubang *pouring* atau *sprue* dan *riser* atau *feeder* yang kurang proposional. Pada umumnya besarnya temperatur tuang ditentukan dari ketebalan produk yang akan dibuat, semakin tipis produk maka temperatur tuangnya semakin tinggi. Salah satu metode pencegahan cacat coran tersebut dapat dilakukan dengan menghitung waktu *pouring*.

Pada umumnya paduan aluminium tuang mempunyai struktur butir *equiaxed* yang kecil untuk memperbaiki ketahanan *hot tearing* dan *mass feeding*, mempertinggi sifat mekanik dan karakteristik penyelesaian permukaan. Disamping itu yang sangat penting adalah untuk mempercepat keluarnya gas terlarut (*soundness*) dan meningkatkan homogenisasi secara keseluruhan. Struktur yang homogen dapat mengurangi segregasi sehingga produk tuang sangat baik untuk di *heat treatment* dan cacat seperti, porositas, unsur intermetalik akan terdistribusi secara merata dan kekurangannya akan menurun. Porositas dalam aluminium paduan tuang pada umumnya tersebar atau bergabung dengan gas atau memperpanjang lubang interdendritik seperti *shrinkage*. Ini akan terjadi bila *feeding* tidak mencukupi selama tuangan mengalami proses solidifikasi.

Struktur penting yang lain adalah jarak lengan dendrit atau jarak sel dendrit, ukuran dan distribusi fase silikon utama dalam paduan-paduan hypereutectic, dan jenis fase intermetalik. Dari hasil pengukuran jarak lengan dendrit atau jarak sel dendrit

memberikan informasi tentang laju solidifikasi material sehingga kekuatan material dapat diprediksikan. Misal, material dengan ukuran sel dendrit yang kecil mempunyai kekuatan tinggi. Pengukuran jarak lengan dendrit atau jarak sel dendrit dinyatakan dalam ukuran butir (*grain size*). Mikrostruktur solidifikasi dendrit merupakan karakteristik tuang aluminium paduan. Berbagai macam struktur seperti, cetakan pasir, permanen, investment dan cetakan tekan terlihat mempunyai ukuran dan bentuk berbeda. Umumnya pada cetakan pasir mempunyai ukuran butir lebih besar dari cetakan permanen dan ukuran butir cetakan permanen lebih besar dari cetakan tekan atau secara matematis dinyatakan $d_{cs} > d_p > d_{ct}$. Keseragaman ukuran butir *finer* mempunyai sifat yang optimum dalam produk-produk *wrought*. Penghalusan butir juga dapat meningkatkan ketahanan *hot cracking* selama pengecoran.

Menurut P.S.Chen, A.K. Kuruvilla, T.W. Malone, and W.P. Stanton, 1998, model pembentukan pori selama solidifikasi paduan aluminium merupakan dasar pendekatan baru pada mikrosegresi gas terlarut dalam leburan. Model ini memprediksi jumlah dan ukuran porositas dalam solidifikasi pengecoran. Perhitungan skala mikro-makro transport gas dalam leburan yang dihubungkan dengan simulasi aliran *feeding* dan perhitungan tekanan setempat. Laju pertumbuhan pori dihitung berdasarkan tingkat lokasi *supersaturation* gas dalam leburan. Studi parameter solidifikasi satu-dimensinal mengenai gradient temperature dan laju pendinginan merupakan fenomena penting yang diamati dalam pembentukan porositas dalam paduan aluminium.

Pengujian mikrostruktur pada umumnya diawali dengan pembesaran tinggi yang dimaksudkan untuk menginterpretasikan secara detail. Dalam uji mikrostruktur juga harus dipilih lokasi pengamatan yang baik (representatif). Uji mikrostruktur dan makrostruktur sederhana dilakukan dengan mikroskop cahaya (optik). Bila bidang amatan yang sangat

kecil seperti struktur yang kecil atau bidang amatan kecil dilakukan pembesaran dengan *electron microscope*. Dengan menggunakan etza tertentu *electron microscope* dapat menentukan *microchemical* seperti pada presipitat.

Pengujian kerusakan permukaan diperlukan untuk menentukan model dan arah perambatan retak. *Fractographic* tidak dapat dilihat dengan mata biasa dan akan jelas bila dilakukan dengan pembesaran dan hindari spesimen dari kontaminasi sebelum dilakukan pengujian. Tiga metode yang digunakan untuk menentukan model kerusakan pada aluminium paduan yaitu: 1. mikroskop cahaya, 2. mikroskop elektron transmisi (*transmission electron microscope*), 3. mikroskope elektron scanning (*scanning electron microscope*). Pada kesempatan ini akan dibahas karakteristik dan phase gabungan dalam aluminium dan aluminium paduan dari struktur tempa, cacat dan kerusakan struktur tempa, struktur tuang, las-lasan dan sambungan *brased* dengan menggunakan mikroskop cahaya.

Pada umumnya aluminium tempa dibuat dari ingot dan dilanjutkan dengan pemrosesan mekanik dan termal sampai beberapa tingkat perubahan struktur as-cast. Modifikasinya relatif kecil untuk tempa besar seperti bentuk forging, ketebalan plat dan ekstrusi berat pada hot working. Modifikasi menjadi besar seperti jumlah total reduksi dalam luas penampang awal yang ditingkatkan dengan pengerjaan panas dan dingin dan kebanyakan dengan perlakuan panas, seperti annealing dan *solution heat treating*. Modifikasi yang dapat dilakukan berupa :

- Pengaturan komposisi dan struktur kristal phase karena reaksi peritektik dapat ditunda selama casting.
- Larutan pada phase dapat larut dan *spheroidization* dan *coalescence* mengurangi energi permukaannya.

- Presipitasi temperatur tinggi unsur mempunyai supersaturated larutan padat as-cast.
- Kerusakan mekanik pada kerapuhan phase intermetalik dan dikembalikan oleh partikel ini dengan prinsip arah pengerjaan.
- Deformasi pada orginalbutiran matrik tuang dan dilanjutkan recovery atau rekristalisasi.

Struktur butir

Umumnya aluminium paduan tuang mempunyai struktur butir equiaxed yang kecil untuk memperbaiki ketahanan *hot tearing* dan *mass feeding*, mempertinggi sifat mekanik dan karakteristik penyelesaian permukaan. Disamping itu yang sangat penting untuk mempercepat keluarnya gas terlarut (*solvilness*) meskipun kontribusi equiaxed dibandingkan struktur butir columnar nonuniform yang penting meningkatkan homonegisasi secara keseluruhan. Struktur yang homogen dapat mengurangi segregasi sehingga produk tuang sangat baik untuk di *heat treatment* dan cacat seperti, porositas, unsur intermetalik akan terdistribusi secara merata dan kejelekannya akan berkurang. Porositas dalam aluminium paduan tuang pada umumnya tersebar atau bergabung dengan gas atau memperpanjang lubang interdendritik seperti *shrinkage*. Ini akan terjadi bila *feeding* tidak mencukupi selama tuangan mengalami proses solidifikasi.

Struktur penting yang lain adalah jarak lengan dendrit atau jarak sel dendrit, ukuran dan distribusi phase silikon utama dalam paduan-paduan hypereutectic, dan jenis fase intermetalik. Dari hasil pengukuran jarak lengan dendrit atau jarak sel dendrit memberikan informasi tentang laju solidifikasi material sehingga kekuatan material dapat diprediksikan. Misal, material dengan ukuran sel dendrit yang kecil mempunyai kekuatan tinggi. Pengukuran jarak lengan dendrit atau jarak sel dendrit dinyatakan dalam ukuran

butir (*grain size*). Mikrostruktur solidifikasi dendrit merupakan karakteristik tuang aluminium paduan. Berbagai macam struktur seperti; cetakan pasir, permanen, investment dan cetakan tekan. Keseragaman ukuran butir finer mempunyai sifat yang optimum dalam produk-produk *wrought*. Penghalusan butir juga dapat meningkatkan ketahanan *hot cracking* selama pengecoran.

Percobaan tahun 1950 yang mengaubbungkan solidifikasi dendrit tuang untuk menentukan nomor aluminium paduan. Hasil percobaan tersebut menyatakan bahwa jarak antar lengan dendrit mengecil dengan berkurangnya waktu solidifikasi. Hubungan antara jarak lengan dendrit dan waktu solidifikasi dirumuskan ; $d = 7,5 \theta^{0,39}$ yang mana d : jarak lengan dendrit [μm], θ : waktu solidifikasi [detik]. Pada umumnya komposisi mempengaruhi bertambahnya kandungan larutan pada laju pendinginan konstan yang menurunkan jarak lengan dendrite. Jenis struktur kristal dendrit *fine* dan *coarse*. Lebih disukai bila struktur jarak lengan dendrit *finer* dapat bergabung dengan partikel unsur yang kecil yang terdistribusi uniform. Tetapi, rentang yang finer tidak selalu dapat digabungkan dengan struktur butir yang dimaksud. Pada umumnya rentang lenga dendrit sangat penting dalam ingot untuk mampu laku panas paduan dan mampu bentuk dalam pabrikasi.

Struktur butir columnar mempunyai karakteristik solidifikasi dengan kelarutan paduan yang rendah dalam tingkat gradien temperatur dengan sedikit turbulensi dalam peleburan memberikan pengaruh pengalusan butir oleh pelepasan lengan dendrit. Adanya turbulensi dalam aliran logam menyebabkan struktur logam paduan terdiri dari butiran columnar dan equiaxed. Inoculant pengalusan butir yang banyak digunakan dalam industri aluminium adalah titanium dan titanium plus boron. Adanya penghalusan butir menyebabkan struktur menjadi fine, butiran uniform dan mengurangi terbentuknya *center*

crack. Struktur butir coarse dan terdistribusi nonuniform seperti pada paduan aluminium seri 6063 yang dicor tanpa penambahan unsur penghalus butir dan besar butir secara drastis berubah dengan penambahan unsur penghalus butir. Selain dengan penambahan unsur penghalus butir, ukuran butir dapat dikontrol dengan teknik vibrasi, stirring dan aliran logam yang memberikan nucleasi dengan memisahkan atau memotong lengan dendrit. Ingot aluminium paduan tanpa unsur perhalus butir umumnya struktur kristalnya mengalami pertumbuhan columnar kembar (*twinned/feather*) yang mungkin terjadi pada paduan kelarutan rendah atau kelarutan tinggi. Struktur kristal kembaran ini seperti terjadi pada interface solidifikasi dengan tingkat gradien temperatur yang tinggi atau bila penambahan unsur penghalus butir tidak sebanding. Pada pembesaran tinggi struktur *feather* berisi butir-butir columnar kembaran.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari data percobaan dan pembahasan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Berkurangnya derajat kevacuuman pada ruang ruang (rongga cetakan) menyebabkan berat jenis coran Magsimal-59 bertambah, dan kekerasannya meningkat. Secara statistik, penuangan Magsimal-59 cair kedalam cetakan vacuum akan memberikan pengaruh linieritas positif terhadap fluiditas dan kekerasan.
2. Cacat coran pada pengecoran Magsimal-59 terjadi karena adanya koefisien termal dan pengkerutan volume yang tidak terkontrol. Jenis cacat pada pengecoran Magsimal-59 tersebut dapat diklasifikasikan dalam 3 kategori, yaitu: 1. *hot cracking*, 2. *thermal shock* dan 3. *shrinkage*.
3. Eksperimental pengecoran yang dilakukan paduan aluminium-silikon-magnesium menunjukkan tingkat produktifitas yang meningkat.

5.2. Saran

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dan analisa serta pembahasan, maka dapat diambil saran-saran sebagai berikut :

Untuk menghindari terjadinya penyimpangan antara rancangan penelitian dan pelaksanaan penelitian perlu dilakukan pengamatan dilapangan yang menyangkut sarana dan prasarana.

Daftar Pustaka

- E. Kasehnitz, M. Kublbock,; 2008, Thermal Diffusivity of the Aluminum Alloy Al-5Mg-2Si-Mn (Magsimal-59) in thr Solid and Liquid States, High Temperatur-High Pressure, Vol 37, pp. 221-230, Published by License under the OCP Science Imprint
- Furukawa M, Zenji Horita, Nemoto M, and Langdon T.G., *The Use of Severe Plastic Deformation for Microstructural Control*, Materials Science and Engineering A, Volume 324, Issues 1-2, 15 February 2002.
- Geaman,V.; Jiman, V. & Stoicanescu Maria,; 2008, The Increasing of Mechanical Properties to Isostatically Compacted Pieces Made from Duralumin Alloys by Applying Heat Treatment, 6th Internattional DAAAM Baltic Conference INDUSTRIAL ENGINEERING 24-26 April 2008, Tallinn, Estonia.
- M.Di Sabatino, F. Syversten, L. Amberg and A. Nordmark., 2005, *An Improved Method for Measurment gy Grafity Casting of Spiral in Sand Casting*, International Journal of Casting Metals Research, Vol. 18 No. 1 591.
- Niyama Eisuke, Ansai Koichi, Funakabo Tatsuya, Hiratsuka Sadato., 1997, *Some Basic Research for Thin-Wall Casting Technology*, Journal of Materials Processing Technology
- Niraj Nayan,; Govind, K.; Suseelan Nair,, M.C. Mittal,; K.N Sudhakaran,; 2007, Studies on Al-Cu-Li-Mg-Ag-Zr Alloy through Vacuum Induction Melting (VIM) Technique, Materials Science and Engineering 500-5007, Elsevier 2007.
- Opie, W.R and Grant, N.J., 1980, *Hydrogen Solability in Alumimun and Some Aluminum Alloys*, Transaction of AIME, Vol 75.
- P.S.Chen,;A.K. Kuruvilla,; T.W. Malone, and W.P. Stanton,; 1998, The Effects of Artificial Aging an the Microstructure and Fractur Toughness of Al-Cu-Li Alloy 2195, Journal of Material Engineering and Performance, JMEPEG 7:682-690, ASM International.
- Rao P.N., 1990, *Manufacturing Technology*, Second Printed, New Delhi; McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- Robert E., 1992, *Physical Metalurgy Principle*, Thrid Edit on, PWS-Kent, Publishing Company, Boston.
- TU-Wien,; 2002, Development of Al-Si-Mg Alloys for Semi-Solid Processing and Silicon Spheroidization Treatment (SST) for Al-Si Cast Alloys, A dissertation submitted for the degree of Doctor of Technical Sciences, SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
- Wahyono Suprpto, Agung S.W, Viktor M, Subagyo., 2006, *Pengaruh Getaran Terhadap Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Metalografi pada Pengecoran Paduan Aluminium*, Jurnal Ilmu-ilmu Teknik, Volume 18 No.2, Oktober 2006.
- Wang, Y.H, Kou, S., 1986, *in Proceeding of Modelling and Control of Casting and Welding Processes*, edited by S. Kou and R. Mehrabian. The Metallurgical Society of AIME.

