

PENGECORAN LOGAM (METODE EVAPORATIVE)

UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Suherman, S.T., M.T.

PENGECORAN LOGAM (METODE EVAPORATIVE)



**PENGECORAN LOGAM
(METODE EVAPORATIVE)**

Suherman

Desain cover

Nama

Sumber

link

Tata letak :

Ika Fatria

Proofreader :

Nama

Ukuran :

x, 116 hlm, Uk:15.5x23 cm

ISBN :

No ISBN

Cetakan Pertama:

Bulan 2018

Hak Cipta 2018, Pada Penulis

Isi diluar tanggung jawab percetakan

Copyright © 2018 by Deepublish Publisher

All Right Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini
tanpa izin tertulis dari Penerbit.

**PENERBIT DEEPUBLISH
(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)**

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

Jl.Rajawali, G. Elang 6, No 3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman

Jl.Kaliurang Km.9,3 – Yogyakarta 55581

Telp/Faks: (0274) 4533427

Website: www.deepublish.co.id

www.penerbitdeepublish.com

E-mail: cs@deepublish.co.id

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, akhirnya naskah buku ajar Pengecoran Logam (Metode Evaporative) ini dapat diselesaikan oleh penulis. Ada beberapa alasan yang mendorong penulis berusaha menerbitkan buku ajar ini. *Pertama*, buku ajar ini merupakan kristalisasi dari hasil penelitian yang telah dilakukan oleh para penulis sebelumnya, sehingga dengan penerbitan buku ini, maka hasil penelitian tersebut akan memberi manfaat maksimal bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya bidang Pengecoran logam.

Alasan *kedua* adalah kehadiran buku ini diharapkan akan memberikan sumbangan signifikan dalam upaya peningkatan kualitas pembelajaran di Program Studi Teknik Mesin. Dengan adanya buku ini, diharapkan mahasiswa akan lebih mudah dalam mengikuti dan memahami perkuliahan untuk mata kuliah Teknik Pengecoran Logam dengan lebih mudah dan fokus.

Ketiga, buku ajar Teknik Pengecoran harus selalu di-*up-date* karena di era Industrialisasi Proses pengecoran Logam menjadi salah satu bidang yang berkembang dengan pesat, sehingga buku ajar yang digunakan harus selalu diperbaharui. Perkembangan Teknologi Pengecoran Logam yang begitu pesat tersebut juga terus mendorong penulis untuk melakukan penelitian yang berkesinambungan, sehingga penulis mampu menyajikan karya

yang terus *up-date* dan segar kepada mahasiswa dan pembaca lainnya khususnya teknik Lost Foam Casting (Metode Evaporative).

Naskah buku Teknik Pengecoran Logam ini berisikan uraian komprehensif tentang teori-teori dasar di bidang Pengecoran Logam, termasuk di dalamnya bagaimana implementasi teori-teori Pengecoran metode Evaporative tersebut diimplementasikan dilingkungan industri. Di samping itu, sebagai bagian dari komitmen penulis terhadap visi pendidikan Vokasi, buku ini juga mengulas secara singkat tentang konsep dasar pengecoran logam, sehingga mahasiswa mampu membandingkan dan menemukan konsep ideal menurut kebutuhan industri kecil dan menengah yang ada di Indonesia.

Dalam kesempatan ini, perkenankan penulis mengucapkan terima kasih buat istri saya Mutia Dalila yang telah mendukung sepenuhnya dalam menulis buku ini. Ungkapan terima kasih tidak lupa pula kami haturkan kepada kolega khususnya dan seluruh dosen dan staf di Prodi Teknik Mesin serta semua pihak yang telah mendukung kami dalam menyusun naskah buku ajar ini. Secara khusus kami haturkan terima kasih atas bantuan Bapak Dr. Suyitno, M.Sc (Dosen Teknik Mesin UGM) yang telah memberikan masukan sehingga buku ini telah memenuhi untuk diterbitkan.

Terakhir, kami menyadari tidak ada gading yang tak retak, tidak ada pekerjaan manusia yang sempurna karena manusia juga tidak sempurna dan karena itu saran dan kritik dari pembaca buku ini sangat kami nantikan untuk kesempurnaan buku ini di masa datang.

Medan, 2 Oktober 2017

Penulis

DAFTAR ISI

Kata Pengantar.....	v
Daftar Isi	vii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Pendahuluan.....	1
1.2. Tahapan Pengecoran Lost Foam Casting (LFC).....	4
1.3. Beberapa Aspek sebagai pertimbangan dari Metode Lost Foam Casting (LFC).....	8
1.4. Keuntungan dan Kerugian Metode LFC.....	12
BAB II POLA STYROFOAM	14
2.1. Pengertian Pola.....	14
2.2. Pola Styrofoam	14
2.3. Proses pembuatan pola busa polistirena (EPS) yang diperluas.....	15
2.4. Pengaruh Densitas Styrofoam.....	17
2.5. Dekomposisi Polystyrene Foam.....	20
BAB III PASIR CETAK	23
3.1. Syarat Pasir Cetak	23
3.2. Macam-macam Pasir Cetak.....	23

3.3.	Pengaruh Ukuran Pasir dan Akurasi Ukuran Akhir.....	26
3.4.	Pengaruh Penggetaran (Vibration) Pada hasil Coran	29
3.5.	Efek Ukuran Pasir terhadap Fluidity	30
BAB IV	LAPISAN (COATING) POLA EPS	33
4.1.	Jenis-Jenis Bahan Coating Pola.....	34
4.2.	Proses Pelapisan Pola EPS	36
4.3.	Ketebalan Lapisan Pada Aluminium Paduan	37
4.4.	Porositas	43
4.5.	Jarak silikon eutektik.....	45
4.6.	Pengaruh Tebal Lapisan Terhadap Ketangguhan.....	47
4.7.	Permeabilitas Lapisan (Coating) Pola EPS	48
BAB V	PEMBUATAN POLA EPS DAN PERANGKAIAN	66
5.1.	Pembuatan Pola Sederhana	66
5.2.	Penyatuan Pola LFC	68
5.3.	Perangkaian	69
5.4.	Mekanisme dari Pembentukan Benda Cor	69
BAB VI	SUHU TUANG	73
6.1.	Pengaruh Suhu Tuang	73
BAB VII	PENGUJIAN FLUIDITAS (FLUIDITY TEST).....	77
7.1.	Pengertian Fluiditas (mampu alir)	77

7.2.	Metode pengujian fluiditas	77
7.3.	Metode beda ketebalan.....	81
BAB VIII	PENGARUH KETEBALAN DAN PENGGETARAN PASIR	83
8.1.	Ketebalan Benda Cor	83
8.2.	Penggetaran Pasir Silika	84
8.3.	Cara mengukur Butir dan SDAS.....	94
8.4.	Pengukuran Persentase Porositas Benda Cor	95
BAB IX	METODE LFC BERTEKANAN.....	97
9.1.	Pendahuluan.....	97
9.2.	Metode Lost Foam Casting Bertekanan.....	98
BAB X	PENGECORAN ALUMINIUM PADUAN AL- Si	106
10.1.	Mikrostruktur Aluminium Paduan Al-Si.....	107
10.2.	Phase Silikon.....	110
	Daftar Pustaka.....	113

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Pendahuluan

Pengecoran lost foam merupakan salah satu jenis pengecoran yang menggunakan bahan expanded polystyrene (EPS) sebagai bahan untuk membuat pola dan ditanam dalam pasir silika menjadi cetakan. Ketika logam cair dimasukkan ke dalam cetakan, expanded polystyrene akan mencair dan menguap sehingga tempat itu akan diisi oleh cairan logam (Askeland, 2001). Metode ini ditemukan dan dipatenkan oleh Shroyer pada tahun 1958 (Shroyer, 1958). Pada tahun 1964, konsep penggunaan cetakan pasir kering tanpa pengikat telah dikembangkan dan dipatenkan oleh Smith (Smith, 1964).

Lost foam casting (LFC) merupakan salah satu metode pengecoran dengan biaya yang efektif dan proses pengecoran yang ramah lingkungan. Pengecoran lost foam memiliki banyak keuntungan. Salah satu keuntungan dari lost foam casting adalah fleksibilitas dalam mendesign pola pengecoran. Pengecoran lost foam dapat memproduksi benda yang kompleks/bentuknya rumit, tidak ada pembagian cetakan, tidak memakai inti, mengurangi tenaga kerja dalam pengecorannya (Monroe, 1992). Cetakan dari pola berbahan polystyrene foam mudah dibuat dan murah (Barone, 2005). Pencemaran lingkungan karena emisi bahan-bahan pengikat

dan pembuangan pasir dapat dikurangi karena tidak menggunakan bahan pengikat dan pasir dapat langsung digunakan kembali (Kumar dkk, 2007).

Penggunaan cetakan foam meningkatkan keakuratan dimensi dan memberikan peningkatan kualitas coran dibandingkan dengan cetakan konvensional (Monroe, 1992). Sudut kemiringan draf dapat dikurangi atau dieliminasi (Barone, 2005). Metode pengecoran ini juga memiliki kekurangan dimana tingkat porositasnya lebih tinggi karena pengaruh polystyrene foam yang terbakar (Sutiyoko, 2011). Lost foam casting secara luas digunakan untuk coran paduan aluminium untuk menghasilkan komponen yang mempunyai bentuk yang kompleks (Guler dkk, 2014).

Harga produksi yang lebih rendah juga merupakan salah satu faktor penting dari metode pengecoran, karena pola pengecoran dibuat dari expanded polystyrene foam (EPS) dan peralatan untuk pengecoran tergolong sederhana dan tidak mahal, sehingga metode ini dapat digunakan untuk skala pengecoran kecil. Penelitian tentang pengecoran lost foam casting telah banyak dilakukan oleh beberapa peneliti sehingga penerapan metode pengecoran ini mengalami banyak peningkatan khususnya pada negara-negara maju. Penggunaan cetakan foam meningkatkan keakuratan dimensi dan memberikan peningkatan kualitas coran yang lebih baik dibandingkan dengan cetakan konvensional (Monroe, 1992). Pelapisan pola mengurangi permeabilitas gas, meningkatkan porositas, dan kekasaran permukaan akan terjadi jika tanpa pelapisan, serta dengan melakukan pemvakuman pada saat pengecoran akan meningkatkan pemindahan gas dan memiliki efek yang jelas pada penurunan porositas (Guler dkk, 2014). Pacyniak (2008) melakukan simulasi pengujian dan menjelaskan

efek lapisan permeabilitas refraktori terhadap laju pengisian cetakan, tekanan dalam, celah gas dan ukuran gap yang terbentuk. Hal ini juga memungkinkan untuk memilih permeabilitas lapisan refraktori terbaik, yaitu lapisan yang akan mampu menjamin paduan cairan logam mengisi dengan tepat pada rongga cetakan. Hasil penelitian Karimian (2012) menunjukkan bahwa meningkatkan viskositas dan waktu pencelupan, akan meningkatkan ketebalan lapisan pada pola EPS dan menghasilkan pengaruh yang signifikan terhadap keutuhan hasil coran dan struktur mikro.

Lapisan yang tipis akan menghasilkan pori-pori yang lebih banyak, dimana hal ini akan mempermudah gas keluar selama proses pengecoran dan mengakibatkan pengisian cetakan yang lebih baik dan porositas yang lebih sedikit. Pengecoran dengan metode lost foam casting perlu dilakukan pelapisan dengan material refraktori yang dikembangkan sebagai lapisan pada permukaan pola untuk memberikan dukungan terhadap berat pasir sebelum logam cair membeku. Pelapisan dengan refraktori harus tahan terhadap suhu tinggi logam cair. Salah satu faktor penting untuk memproduksi hasil coran berkualitas tinggi dengan metode lost foam casting adalah pelapisan pola expanded polystyrene dengan material refraktori.

Pengecoran *lost foam* merupakan langkah baru dalam memproduksi benda- benda dengan metode pengecoran. Pada saat ini belum banyak industri pengecoran logam yang banyak menggunakan metode ini dalam memproduksi benda cor. Sedikitnya industri yang menerapkan metode pengecoran ini mungkin dikarenakan mereka belum banyak mengetahui seluk beluk metode pengecoran *lost foam*.

Usaha penelitian dan perbaikan pada metode pengecoran *lost foam* telah banyak dilakukan oleh para peneliti baik dengan melakukan eksperimen langsung atau dengan pendekatan metode numerik untuk mensimulasi proses pengecoran ini.

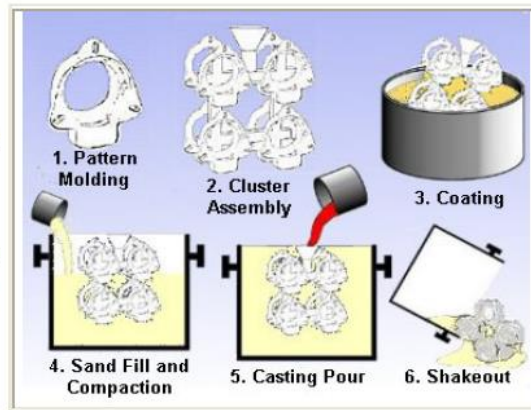
Pengecoran *lost foam (evaporative casting)* adalah salah satu metode pengecoran logam dengan menggunakan pola *polystyrene foam*. Metode ini ditemukan dan dipatenkan oleh Shroyer pada tahun 1958. Pada tahun 1964, konsep penggunaan cetakan pasir kering tanpa pengikat telah dikembangkan dan dipatenkan oleh Smith.

1.2. Tahapan Pengecoran Lost Foam Casting (LFC)

Pengecoran *lost foam* dimulaidengan membuat pola *polystyrene foam (styrofoam)* dengan kerapatan/massa jenis tertentu sesuai yang direncanakan. Dalam beberapa aplikasi, bagian-bagian pola dilem untuk mendapatkan bentuk keseluruhan dari benda yang komplek. Sistem saluran dirangkai dengan cara dilem menyatu dengan rangkaian pola. Beberapa pola dapat dilakukan pengecoran dengan dirangkai dalam satu sistem saluran. Pola yang telah terangkai dengan sistem saluran diistilahkan dengan *cluster*. Sistem saluran memiliki pengaruh besar terhadap adanya cacat pada benda cor misalnya saluran masuk bawah akan menyebabkan porositas dan cacat lipatan (*folded*) paling sedikit dibanding saluran samping atau atas (Shahmiri dan Karrazi, 2007).

The basic steps of the lost foam casting process are:

1. Pattern Molding -- Bead Preexpansion and Conditioning, Tool Preheat, Pattern Molding, Pattern Aging
2. Pattern/Cluster Assembly
3. Pattern Coating and Drying
4. Sand Fill and Compaction
5. Metal Casting and Cooling
6. Shakeout, Clean-up, and Finishing



Gambar 1.1 Tahapan-tahapan dalam pengecoran metode *Evaporative*

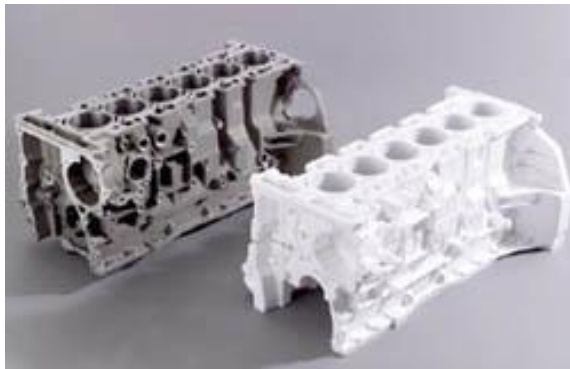
Proses pengecoran *lost foam* dilakukan dalam beberapa tahap (Gambar 2.2), Tahapan-tahapan yang dilakukan pada pengecoran metode *Evaporative* adalah sebagai berikut:

1. *Pattern Molding*, yaitu pembuatan pola dari *styrofoam* sesuai bentuk benda yang akan dibuat. Pembuatan pola ini dapat dilakukan dengan memotong *styrofoam* bentuk lembaran dengan pemotong listrik atau dengan mencetaknya dengan cetakan injeksi (*injection molded*).
2. *Pattern/Cluster Assembly*, yaitu merangkai pola menjadi bentuk komponen dengan menggunakan lem *styrofoam* dan pemberian sistem saluran masuk logam cair.
3. *Pattern Coating and Drying*, yaitu melapisi pola dengan bahan *coating* (bahan pelapis) dan mengeringkannya.

4. *Sand Fill and Compaction*, yaitu rangkaian memasukkan rangkaian pola kedalam kotak tempat pengecoran dan menimbunnya dengan pasir silika.
5. *Metal Casting and Cooling*, yaitu memasukkan cairan logam kedalam pola melalui saluran masuk dan mendinginkan hasil coran.
6. *Shakeout*, yaitu mengeluarkan hasil coran dari cetakan dan membersihkan dari sisa-sisa pasir yang menempel dipermukaan coran.

Logam cair dimasukkan melalui saluran tuang dan pola akan terurai karena panas logam cair saat masuk ke pola. Hasil uraian pola akan melewati lapisan dan keluar melalui pasir. Setelah cukup dingin, benda cor diambil dan dilakukan perlakuan panas jika diperlukan (Matson dkk, 2007).

Metode ini banyak digunakan untuk memproduksi komponen-komponen otomotif, diantaranya adalah kepala silinder, silinder blok, dan tranmisi pompa oli. Salah satu contoh komponen yang dibuat dengan menggunakan metode *Lost Foam Casting* adalah silinder mesin 6 silinder sebaris (Gambar 2.3), 4.2 liter yang digunakan untuk mobil jenis SUV buatan General Motor.



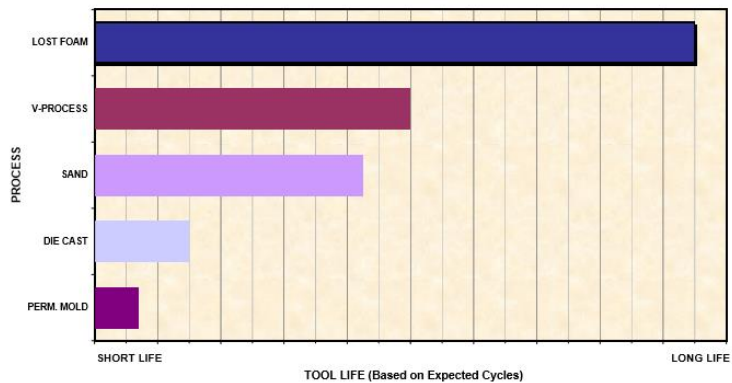
Gambar 1.2 Silinder mesin 6 silinder sebaris, 4.2 liter buatan General Motor.

Pengecoran *lost foam* memiliki banyak keuntungan seperti cetakan dari pola berbahan *polystyrene foam* mudah dibuat dan murah. Sudut-sudut kemiringan draf pola dapat dikurangi atau dieliminasi (Barone dan Caulk, 2005).

Pengecoran *lost foam* dapat memproduksi benda yang kompleks/bentuknya rumit, tidak ada pembagian cetakan, tidak memakai inti, mengurangi tenaga kerja dalam pengecorannya sehingga cepat untuk membuat benda-benda prototipe. Pengecoran *lost foam* dapat memproduksi benda-benda ringan (Kim dan Lee, 2005). Proses pembersihan dan pemesinan dapat dikurangi secara dramatis (Kumar dkk, 2007). Pencemaran lingkungan karena emisi bahan-bahan pengikat dan pembuangan pasir dapat dikurangi karena tidak menggunakan bahan pengikat dan pasir dapat langsung digunakan kembali (Kumar dkk, 2007)

1.3. Beberapa Aspek sebagai pertimbangan dari Metode Lost Foam Casting (LFC)

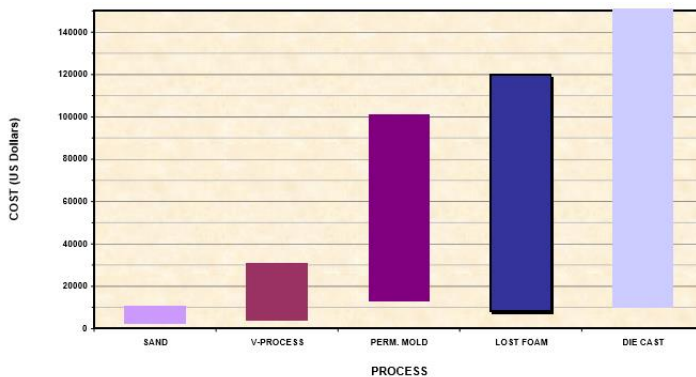
Umur pakai peralatan dengan jangka waktu penggunaan yang lama merupakan salah satu aspek yang kuat memilih proses LFC dalam memproduksi *part*. Alat yang digunakan untuk membuat *part* dengan metode LFC masih bertahan walaupun sudah ratusan ribu kali digunakan dan hanya membutuhkan biaya perawatan yang rendah. Proses cetakan permanen dan die cast merupakan jenis pengecoran dengan umur pakai peralatan yang paling rendah diantara metode lainnya.



Gambar 1.3 umur pakai peralatan beberapa metode pengecoran

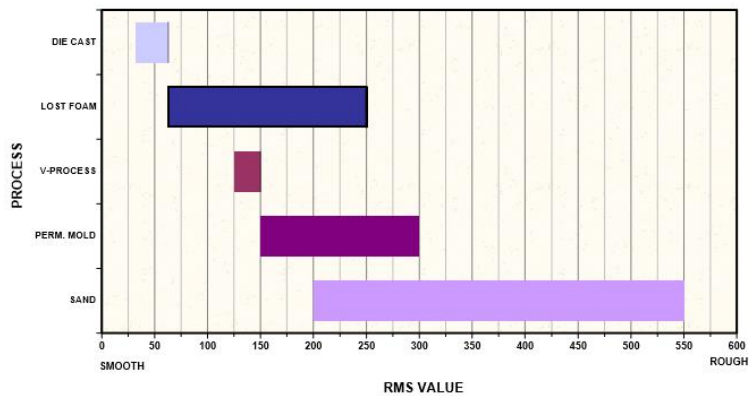
Metode cetakan pasir menawarkan investasi harga peralatan yang paling rendah, sedangkan metode V-proses hampir sebanding dengan metode cetakan pasir. Proses LFC merupakan metode dengan investasi peralatan yang cukup tinggi baik untuk memproduksi part dengan bentuk sederhana maupun

dengan bentuk yang rumit.



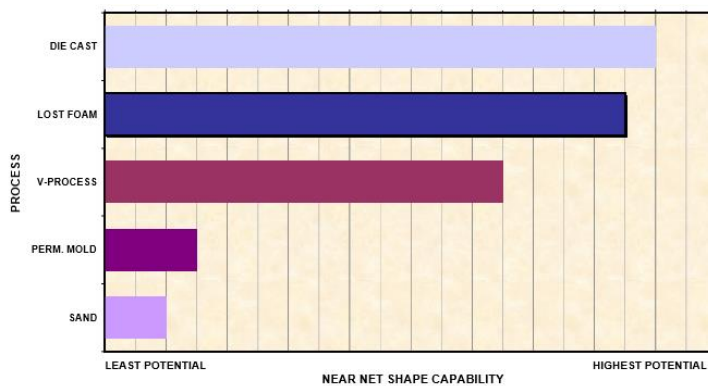
Gambar 1.4 biaya investasi peralatan beberapa proses pengecoran

Metode cetakan pasir menghasilkan permukaan akhir paling buruk dibanding metode pengecoran lainnya sedangkan metode die casting merupakan metode yang menghasilkan hasil benda cor yang paling baik. Metode LFC menghasilkan permukaan lebih baik dari pada semua metode kecuali metode *die casting* dengan permukaan akhir lebih konsisten sedang metode die casting dan cetakan permanen lebih memburuk seiring bertambahnya lama waktu penggunaan cetakan.



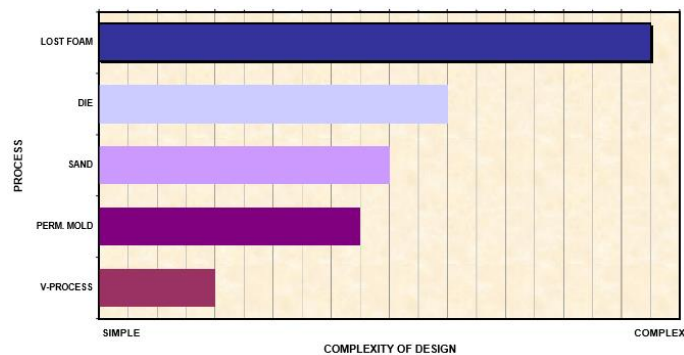
Gambar 1.5 perbandingan kekasaran permukaan beberapa proses pengecoran

Metode die casting menghasilkan kedekatan bentuk (*near net shape*) yang paling baik dibanding metode pengecoran lainnya. Kombinasi dari permukaan akhir, akurasi ukuran dan penambahan fitur membuat proses pengecoran metode LFC merupakan metode yang cukup baik dalam tingkat kedekatan dengan bentuk yang dibuat setelah metode Die casting. Sedangkan metode cetakan permanen dan cetakan pasir merupakan metode yang tidak potensial untuk menghasilkan kedekatan bentuk dengan benda tuang.



Gambar 1.6 kedekatan bentuk beberapa metode pengecoran

Proses pengecoran dengan lost foam sangat memungkinkan membuat disain part yang kompleks dari semua metode, foam dapat dirangkai dengan lem untuk menghasilkan benda tuang yang luar biasa rumit, sering dikombinasikan dua atau lebih benda cor dalam 1 saluran turun. Die casting dengan menggunakan inti (core) penarik dapat menghasilkan satu part yang rumit. V-proses casting tidak dapat digunakan inti dan sederhana. Proses pengecoran cetakan pasir dan cetakan permanen menggunakan inti



Gambar 1.7 kemampuan dalam membuat bentuk coran yang kompleks

1.4. Keuntungan dan Kerugian Metode LFC

A. Keuntungan Metode Pengecoran LFC

1. Biaya modal awal yang rendah 50% bila dibanding dengan metode pengecoran cetakan pasir dengan kapasitas produksi yang hampir sama.
2. Biaya alat rendah Meskipun alat itu mahal, umurnya panjang, jadi untuk jangka waktu panjang, dengan volume tinggi seperti pembuatan manifold dari aluminium, kepala silinder dan bagian otomotif lainnya, biaya alat jauh lebih rendah daripada metode pengecoran gravitasi atau tekanan rendah yang memiliki umur lebih pendek dan memerlukan beberapa alat karena dari waktu siklus yang panjang dibutuhkan untuk setiap casting Mengurangi proses pengerindaan (grinding) dan pengerjaan akhir (finishing). Ada keuntungan besar pada kebanyakan pengecoran karena proses pengerindaan dibatasi hanya

untuk menghilangkan saluran masuk.

3. Kemampuan membuat bentuk coran yang kompleks. Untuk aplikasi yang sesuai, kemampuan pola direkatkan dengan lem untuk membuat bagian yang kompleks merupakan keuntungan besar.
4. Mengurangi proses permesinan (machining). Pada banyak aplikasi, proses permesinan sangat berkurang dan dalam beberapa kasus tidak dilakukan sama sekali.
5. Mengurangi permasalahan lingkungan. Proses pengecoran LFC yang bebas asap, yang berisi sisa EPS yang mudah didaur ulang dengan proses pembakaran.

B. Kerugian Metode Pengecoran LFC

1. Prosesnya sulit diotomatisasi sepenuhnya, penyatuan pola dan pelapisan melibatkan tenaga kerja manual kecuali pabrik pengecoran lengkap untuk satu jenis pengecoran sehingga penanganan mekanik khusus dapat dikembangkan.
2. Metode casting masih banyak dilewatkan dan banyak eksperimen diperlukan sebelum hasil coran yang baik tercapai.
3. ukuran coran dapat dicapai namun hanya setelah beberapa modifikasi alat karena kontraksi busa dan pengecoran belum dapat diprediksi secara akurat.

BAB II

POLA STYROFOAM

2.1. Pengertian Pola

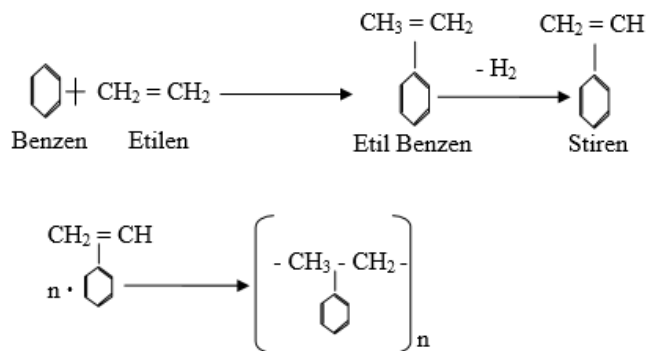
Pola adalah suatu bentuk yang terbuat dari kayu, logam, plastik atau material komposit yang diletakkan pada media cetak untuk menghasilkan rongga cetak. Sebagian besar pola dibuat terpisah dan diambil ketika rongga cetak telah terbentuk sehingga bisa digunakan untuk membuat banyak coran dengan bentuk yang sama (ASM Handbook, Volume 15).

2.2. Pola Styrofoam

Styrofoam adalah nama dagang dari polystyrene yang diproduksi dalam bentuk busa atau gabus, polystyrene merupakan salah satu thermoplastic polymer yang tersusun dari rangkaian monomer-monomer styrene yang dibuat dari benzena dan ethylene yang mengalami polymerization dengan panas, cahaya dan zat katalis. Polymerization adalah proses pembentukan molekul-molekul hydrocarbon kompleks dari molekul hydrocarbon sederhana karena adanya pengaruh dari suhu, tekanan dan zat katalis (Gupta, 2002).

Polystyrene mempunyai sifat-sifat sebagai seperti tidak berwarna dan merupakan resin transparan dan dapat diwarnai secara bening. Massa jenisnya rendah (1050 kg/m^3), sebagai isolator

yang baik, tahan terhadap asam, alkali, minyak bumi dan alkohol. Kestabilan panas dan kecairannya pada pencairan sangat baik, sedangkan untuk barang cetakan yang titik lunaknya rendah (70 °C) memiliki ketahanan impak yang rendah dan bersifat getas. Ketahanan terhadap retak regangan juga kurang baik.



Gambar 2.1 proses polimerisasi polystyrene

Polystyrene akan lunak pada temperatur sekitar 95 °C dan menjadi cairan kental pada 120-180 °C dan menjadi encer diatas 250 °C, kemudian terurai diatas 330 °C. Pencetakan injeksi adalah yang paling cocok digunakan. Akan tetapi karena tegangan dalam terjadi selama pencetakan, maka perlu dilakukan penganilan yang tepat. Penganilan dilakukan dengan memanaskan pada temperatur yang lebih rendah dari temperature ketahanan panasnya (70-80 °C) kemudian didinginkan secara perlahan (Surdia, 1999).

2.3. Proses pembuatan pola busa polistirena (EPS) yang diperluas

Polistiren yang dapat diupgrade adalah bahan baku yang digunakan untuk pencetakan pola busa polistiren yang diperluas.

Monomer stiren, air, inisiator dan zat pensuspensi dibebankan pada reaktor polimerisasi dimana monomer didispersi dalam air oleh bahan pensuspensi selama reaksi. Agen penangguhan terutama terdiri dari garam anorganik yang tidak larut seperti magnesium karbonat, yang ditambahkan untuk mencegah tetesan monomer dari penggabungan. Karena reaktor dipanaskan, polimerisasi terjadi di dalam tetesan pada suhu dan tekanan reaktor yang dikendalikan. Setelah polimerisasi, bubur polimer didinginkan dan disentrifugasi untuk memisahkan air dari butiran polimer. bead kemudian dikeringkan, dibagikan dengan ukuran dan disimpan di dalam tangki.

Manik-manik (bead), bersama dengan air dan zat peniup seperti pentana atau butana, ditambahkan ke reaktor impregnasi. Agen penghembuskan melarutkan dalam lelehan polimer dan sekitar 5-7% zat penghembus terperangkap di dalam manik-manik terpolimerisasi [2]. Pada tahap ini, ukuran manik-manik sekitar 0,1 inci dengan diameter [2]. Bubur (slurry) itu lagi dicuci, diairi, dikeringkan dan dicampur dengan aditif untuk memperbaiki karakteristik pengolahan. Manik-manik ini disebut sebagai manik-manik polistiren yang dapat diupgrade.

Istilah 'polistiren yang diperluas' mengacu pada busa plastik tertutup, ringan, kaku plastik [2]. Biasanya diproduksi dengan proses yang dikenal sebagai cetakan uap. Manik-manik polistiren yang dapat diupgrade dimasukkan ke dalam pre-expander dan uap diperkenalkan untuk memanaskan dan melunakkan polimer dan memperluas agen penguat gas yang terperangkap. Pengendalian kepadatan dan distribusi manik sangat penting. Setelah pra-ekspansi, manik-manik disimpan di tangki stabilisasi untuk menghilangkan kelebihan air yang terkandung di dalam dan di

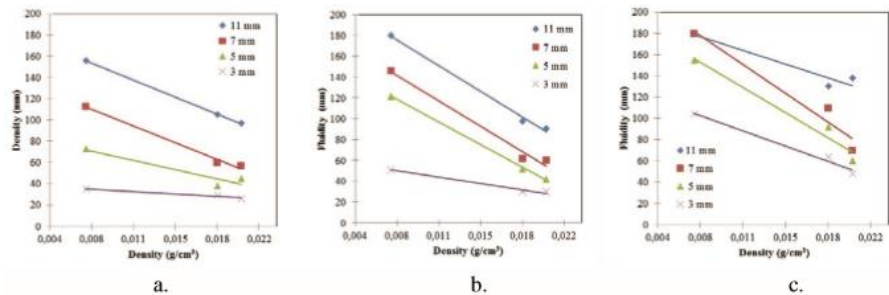
permukaan, yang jika tidak akan merugikan proses pencetakan. Rongga cetakan dipanaskan, diisi dengan manik-manik, dan lagi dipanaskan dengan uap. Hal ini menyebabkan manik-manik yang telah dikembangkan untuk lebih memperluas ke dalam rongga dan sekering menjadi cetakan yang kaku. Cetakan kaku ini, yang disebut polistirena yang diperluas, dipola menjadi bentuk yang diinginkan dan digunakan dalam proses LFC sebagai pola pengecoran. Gambar 1 adalah representasi skematis dari proses pembuatan pola busa yang diperluas.

2.4. Pengaruh Densitas Styrofoam

a. Pengaruh densitas terhadap sifat mampu alir

Kerapatan (*density*) dari pola EPS pada proses pengecoran evaporative sangat mempengaruhi sifat mampu alir/ fluiditas logam cair dengan berbagai suhu tuang. Kenaikan kerapatan busa EPS menyebabkan perbedaan tekanan pada permukaan kontak ke busa polystyrene EPS. Gas yang meleleh dan penguapan EPS polystyrene foam menyebabkan penurunan fluiditas. Kepadatan EPS yang lebih tinggi akan menyebabkan tekanan balik yang lebih tinggi yang mempengaruhi fluiditas selama pengecoran busa yang hilang. Fluktuasi cairan berkurang dengan meningkatnya densitas busa EPS pada setiap ketebalan EPS.

Ketebalan pola polysterin juga mempengaruhi fluiditas dari logam cair pada suhu tuang sebagaimana pada (gambar 2.2) dimana menunjukkan fluiditas sepanjang kerapatan busa EPS untuk beberapa ketebalan pola dengan variasi suhu penuangan.



Gambar 2.2 Panjang Fluiditas 4 ketebalan dengan temperatur tuang
a) 680, b) 710 and c) 740 °C

Fluktuasi cairan akan meningkat dengan meningkatnya ketebalan busa EPS, meningkatkan suhu penuangan untuk semua kerapatan EPS. Fluida meningkat dengan meningkatnya suhu penuangan dan meningkatkan ketebalan busa EPS (Gambar 4). Suhu penuangan sangat mempengaruhi fluiditas di mana suhu penuangan yang lebih tinggi, akan memperlama waktu pembekuan sehingga menyebabkan mampu alir lebih lama. Fluiditas mencapai maksimum pada suhu penuangan yang tinggi, karena logam cair memiliki viskositas dan tegangan permukaan berkurang dengan meningkatnya suhu pengecoran [10]. Kondisi ini menyebabkan kenaikan kecepatan pengisian logam cair. Hubungan ini juga ditunjukkan dalam ref. [1].

Pengamatan terhadap pengaruh ketebalan busa EPS pada fluiditas menunjukkan bahwa pola cetakan yang lebih tebal dapat mempermudah aliran. Hal ini karena busa EPS yang tebal meningkatkan volume logam cair yang melewati penampang melintang yang lebih luas. Temuan ini juga dikonfirmasi oleh ref. [1]. Ketajaman berbanding lurus dengan kenaikan ketebalan busa EPS.

Pengaruh Densitas Pola EPS

Massa jenis dan ukuran butiran polystyrene foam memegang peranan penting dalam pengecoran lost foam. Massa jenis yang rendah diperlukan untuk meminimalisir jumlah gas yang terbentuk pada saat pola menguap. Gas akan keluar ke atmosfer melalui coating/ pelapis dan celah-celah pasir. Jika pembentukan gas lebih cepat daripada keluarnya gas tersebut ke atmosfer maka akan terbentuk cacat dalam benda cor. Pembentukan gas tergantung pada massa jenis pola polystyrene foam dan temperatur penuangan. Gas terbentuk makin banyak apabila massa jenis pola dinaikkan pada temperatur tuang konstan. Jika massa jenis pola tetap dan temperatur tuang dinaikkan maka gas akan terbentuk lebih banyak karena pola akan terurai menjadi molekul-molekul yang lebih banyak pada temperatur lebih tinggi. Pengecoran pada baja memerlukan massa jenis polystyrene foam yang lebih rendah dibanding pada pengecoran besi cor kelabu, besi cor bergrafit bulat atau besi cor mampu tempa. Pengecoran besi cor memerlukan massa jenis polystyrene foam lebih rendah dibanding pada pengecoran tembaga dan pengecoran tembaga memerlukan massa jenis polystyrene foam lebih rendah dibanding pada aluminium (Kumar dkk, 2007).

Perbandingan luas permukaan dan volume pola harus diperhatikan. Gas yang terbentuk harus keluar melalui coating dipermukaan pola. Ukuran butir polystyrene foam yang lebih kecil akan meningkatkan kehalusan pola dan mampu untuk mengisi tempat-tempat yang sempit dari pola (Sikora, 1978). Massa jenis polystyrene foam secara umum berbanding terbalik dengan massa jenis hasil benda cor. Hal ini berarti jika pengecoran menggunakan

dengan massa jenis polystyrene foam lebih rendah maka massa jenis benda cor akan lebih tinggi (Kim dan Lee, 2007).

2.5. Dekomposisi Polystyrene Foam

Polystyrene yang digunakan dalam pengecoran lost foam terdiri dari 92% C dan 8% H (Niemann, 1980). Rantai benzena C_6H_5 dalam polystyrene relatif stabil sedangkan rantai $-CH=CH_2$ cenderung terurai pertama kali. Rantai benzena bertahan dalam bentuk cair dan bereaksi dengan cairan logam yang dapat menyebabkan cacat cor. polystyrene co-polymer dan polymethylmetacrylate (PMMA) dikembangkan untuk mengurangi karbon yang berhubungan dengan cacat cor pada pengecoran logam ferro (Shivkumar, 1993). PMMA sebagian besar (sekitar 80%) terdekomposisi menjadi fase gas pada suhu 700 °C sedangkan polystyrene hanya sekitar 40% pada suhu yang sama (Moilbog dan Littleton, 2001).

Hasil dekomposisi polystyrene foam akan menghalangi logam jika tidak segera keluar dari cetakan (Walling dan Dantzig, 1994). Analisa dan pemodelan tentang dekomposisi polystyrene foam telah diteliti oleh beberapa peneliti. Tsai dan Chen (1988), Hirt dan Barkhudarov (1998), Liu dkk (2002) menentukan koefisien perpindahan panas konstan pada pertemuan antara logam cair dan polystyrene foam. Mereka menghitung kecepatan aliran cairan muka dengan menghubungkan fluks panas yang diperoleh terhadap energi dekomposisi polystyrene foam. Wang dkk (1993) dan Gurdogan dkk (1996) mengasumsikan kecepatan aliran muka cairan sebagai fungsi linier terhadap temperatur dan tekanan logam dengan suatu koefisien empiris yang diperoleh dalam percobaan

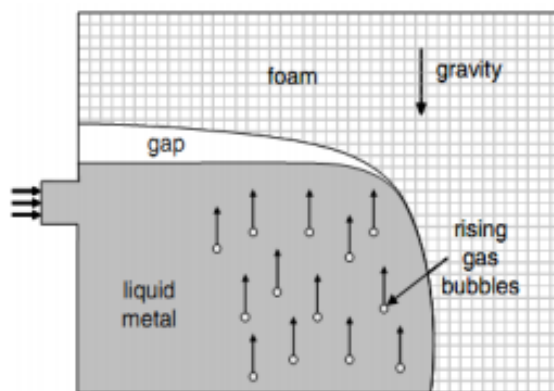
pengisian cairan satu dimensi. Shivkumar (1994) menetapkan kecepatan logam cair secara langsung berdasarkan data pengisian satu arah. Pendekatan-pendekatan ini mampu mendiskripsikan aliran logam cair dalam cetakan namun tetap belum mampu menjelaskan mekanisme fisik yang menghubungkan antara pengisian logam cair dengan porositas karena mekanisme dekomposisi polystyrene foam masih belum jelas. Untuk mendapatkan hasil yang baik, dekomposisi harus dimodelkan dalam proses fisis yang terpisah (Barone, 2005). Pola polystyrene foam yang dituang cairan logam dapat membentuk gap (adanya ruang pemisah) antara logam cair dan pola yang belum terkena cairan.

Pada pengecoran aluminium, pola terurai menjadi cair dan gas (Zhao dkk, 2003). Polystyrene foam terdekomposisi menjadi hidrogen dan karbon saat penuangan cairan. Sebagian karbon masih tersisa pada pori-pori dalam benda cor yang dibuktikan dari analisis WDS pada pengecoran ingot aluminium A 356.2 (Kim dan Lee, 2007). Gas hasil penguraian keluar dari cetakan dengan berdifusi melalui coating (pelapis). Coating menyerap cairan yang terurai dari polystyrene foam dan sisanya tertinggal dipermukaan dalam coating. Cairan logam langsung menyusul cairan yang tersisa tersebut dan menguapkannya menjadi gelembung-gelembung gas kecil. Gelembung-gelembung gas dari seluruh bagian cetakan akan bergerak naik ke bagian atas. Gelembung-gelembung ini akan mengalir dan saling bertemu pada bagian yang lebih tinggi dari cetakan dan membentuk gap/ pemisah antara cairan logam dan polystyrene foam (Gambar 2.3).

Dengan membesarnya ukuran gap, perpindahan panas konduksi dari logam cair ke polystyrene foam berkurang dan

kecepatan pengisian cairan berkurang sehingga polystyrene foam mengalami pengurangan lebih banyak dengan cara mencair daripada dengan cara terbakar (ablation). Ketika hal ini terjadi, kita katakan polystyrene foam terdekomposisi pada daerah gap. Gap yang terbentuk ini pada kenyataannya tidak terjadi pada satu tempat saja karena gelembunggelembung gas ini terjadi pada seluruh permukaan cairan logam dalam cetakan (Caulk, 2006).

Dekomposisi polystyrene foam akan menghasilkan tekanan balik yang berlawanan dengan aliran logam sehingga menghasilkan gaya tekan yang menahan cetakan tetap berada pada tempatnya (Ballmann, 1988).



Gambar 2.3 skema terbentuknya gap antara polystyrene foam dengan cairan logam (Caulk, 2006)

BAB III

PASIR CETAK

3.1. Syarat Pasir Cetak

Beberapa syarat Pasir untuk proses Pengecoran adalah sebagai berikut:

- a. Permeabilitas yang cocok. Yaitu kemampuan dari pasir cetak untuk melewati udara diantara butir- butir pasir.
- b. Distribusi besar butir yang cocok. Permukaan coran diperhalus kalau coran dibuat di dalam cetakan yang berbutir halus.
- c. Tahan panas terhadap temperatur logam yang dituang.
- d. Komposisi yang cocok. Butir pasir bersentuhan dengan logam yang dituang mengalami peristiwa kimia dan fisika karena logam cair mempunyai temperatur yang tinggi.
- e. Mampu dipakai lagi, pasir harus dapat dipakai berulang-ulang supaya ekonomis.
- f. Pasir harus murah.

3.2. Macam-macam Pasir Cetak

Pasir cetak yang biasa digunakan adalah pasir gunung, pasir pantai, pasir sungai dan pasir silika yang disediakan alam. Beberapa dari mereka dipakai begitu saja dan yang lain dipakai setelah dipecah menjadi butir- butir dengan ukuran yang cocok.

Pasir gunung umumnya digali dari lapisan tua. Mengandung lempung dan pada umumnya dapat dipakai setelah dicampur air. Pasir dengan kadar lempung 10%-20% dapat dipakai begitu saja. Pasir dengan kadar lempung kurang dari itu mempunyai adhesi yang lemah dan baru dapat dipakai setelah ditambahkan persentase lempung secukupnya. Pasir silika dalam beberapa hal didapat dari gunung dalam keadaan alamiah atau bisa juga dengan jalan memecah kwarsit. semuanya mempunyai bagian utama SiO_2 dan terkandung kotoran seperti mika dan felspar. Pasir pantai dan pasir kali berisi kotoran seperti ikatan organik yang banyak.. Pasir silika alam dan pasir silika buatan dari kwarsit yang dipecah berisi sedikit kotoran. Terutama yang terakhir ini mempunyai sedikit kotoran dan jumlah SiO_2 lebih dari 95%.

Pasir silika dapat diperoleh dari pasir silika alam yang terjadi secara alamiah digunung atau dapat juga dari proses memecah kwarsit. Semuanya mempunyai bagian utama SiO_2 dan terkandung kotoran-kotoran seperti mika atau feldspar (Surdia, 1999).

Pasir cetak dapat digunakan secara terus menerus selama masih mampu menahan temperatur cairan ketika dituangkan (Lal, 1981). Pasir silika, pasir zirkon, pasir olivine dan kromate dapat digunakan sebagai pasir cetak pada pengecoran lost foam. Penggunaan pasir yang mahal seperti pasir zirkon dan kromite dapat dilakukan untuk mendapatkan tingkat reklamasi pasir yang tinggi (Clegg, 1985). Kekuatan cetakan pasir ditentukan oleh resistansi gesek antar butir pasir. Kekuatan cetakan pasir akan lebih tinggi jika menggunakan pasir dengan bentuk angular walaupun jika menggunakan bentuk rounded/ bulat akan memberikan densitas yang lebih tinggi (Dieter, 1967; Green, 1982).

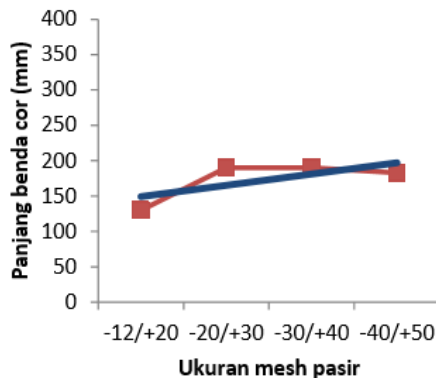
Perubahan bentuk pasir dari angular ke rounded akan menaikkan densitasnya sekitar 8-10% (Hoyt dkk, 1991). Densitas pasir cetak dapat ditingkatkan dengan digetarkan. Pasir leighton buzzard dapat dinaikkan densitasnya sebesar 12,5% dengan digetarkan (Butler, 1964). Waktu pengisian logam cair ke dalam cetakan akan lebih lama apabila menggunakan pasir cetak yang memiliki ukuran lebih kecil. Kecepatan penuangan semakin besar dengan bertambahnya ukuran pasir cetak (Sands dan shivkumar, 2003). Hal ini karena rongga-rongga antar pasir akan semakin kecil dengan mengecilnya ukuran pasir sehingga gas hasil degradasi lebih sulit keluar melalui pasir. Pada pengecoran Al- 7%Si, ukuran pasir cetak memiliki faktor dominan dalam menentukan nilai tegangan tarik dan elongasi benda cor (Kumar dkk, 2008). Pemilihan jenis pasir cetak dan metode pemadatan sangat penting untuk mendapatkan permeabilitas yang tepat dan mencegah deformasi pola. Ukuran butir pasir yang dipilih tergantung pada kualitas dan ketebalan lapisan coating. Ukuran butir pasir AFS 30-45 menjamin permeabilitas yang baik untuk pola yang terdekomposisi menjadi gas dan cairan (Acimovic, 1991). Gambar pasir silica yang bisa digunakan untuk pengecoran metode LFC sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.1



Gambar 3.1. Pasir silika

3.3. Pengaruh Ukuran Pasir dan Akurasi Ukuran Akhir

Ukuran pasir mempengaruhi pada hasil pengecoran besi cor kelabu dengan metode pengecoran lost foam. Fluiditas cairan akan lebih baik jika ukuran mesh pasir lebih besar dan ditunjukkan dengan panjang benda cor yang lebih panjang. Kecepatan pendinginan yang disebabkan perbedaan konduktivitas panas antara pasir dan udara mempengaruhi hasil tersebut. Akurasi ukuran dalam hal ini berupa peningkatan ukuran benda cor terhadap ukuran pola dipengaruhi oleh ukuran mesh pasir. Pasir dengan mesh lebih tinggi memiliki peningkatan ukuran lebih rendah yang diakibatkan oleh kompaktibilitas pasir cetak lebih besar.

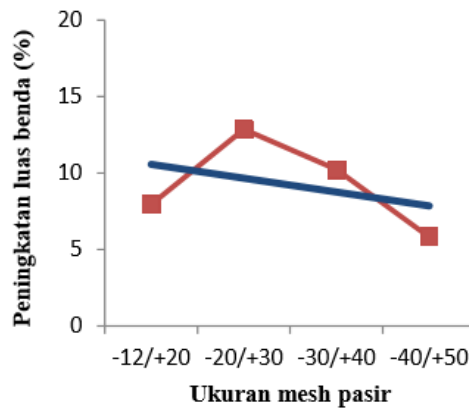


Gambar 3.2 pengaruh ukuran pasir terhadap panjang fluiditas

Berdasarkan hasil pengukuran fluiditas di atas, panjang benda cor cenderung semakin meningkat dengan peningkatan ukuran mesh butir pasir. Dengan kata lain, semakin kecil ukuran butir pasir akan menyebabkan hasil benda cor semakin panjang dan ini mengindikasikan bahwa fluiditas cairan di dalam cetakan semakin tinggi. Peningkatan fluiditas karena peningkatan ukuran mesh pasir disebabkan karena pendinginan lebih lambat yang terjadi pada pasir dengan ukuran mesh lebih besar. Pendinginan yang lebih lambat ini disebabkan karena jarak rongga lebih besar pada pasir yang memiliki ukuran mesh lebih besar.

Ukuran mesh lebih besar berarti ukuran diameter pasir lebih kecil sehingga jarak antar pasir menjadi lebih kecil. Kecepatan perpindahan panas dari cairan ke pasir dan dari cairan ke udara lebih cepat pada cairan ke udara. Rongga antar pasir tersebut secara otomatis terisi oleh udara sehingga pada ukuran pasir yang lebih besar udara lebih banyak terdapat pada permukaan rongga cetak. Efek selanjutnya pendinginan pada ukuran butir yang lebih besar

menjadi lebih cepat dibandingkan dengan tempat yang memiliki ukuran pasir lebih kecil. Hasil pengukuran akurasi ukuran ditunjukkan pada Gambar 3.3 di bawah ini.



Gambar 3.3 hubungan akurasi ukuran dengan ukuran butir pasir cetak

Berdasarkan grafik di atas, ukuran benda cor dibandingkan dengan ukuran pola mengalami pembesaran pada semua ukuran butir pasir. Hal ini menunjukkan bahwa pada pengecoran besi cor kelabu dengan metoda pengecoran lost foam faktor penyusutan pengecoran dapat diabaikan. Pola dapat dibuat sesuai ukuran benda yang akan dicor dan tidak perlu ditambah ukuran/ diperbesar ukurannya karena faktor penyusutan benda cor. Data di atas diambil dari lima sampel yang diukur pada setiap ukuran pasir. Berdasarkan grafik di atas, peningkatan ukuran benda cor semakin menurun jika ukuran mesh pasir semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena kompaktibilitas pasir yang memiliki ukuran mesh lebih besar akan lebih besar dibanding yang memiliki ukuran

mesh lebih kecil. Kompaktibilitas lebih besar disebabkan rongga antar pasir lebih kecil dibandingkan pasir dengan ukuran butir besar. Cairan lebih sulit menekan cetakan pasir yang memiliki kompaktibilitas lebih tinggi sehingga pembesaran ukuran yang terjadi menjadi lebih kecil. Pada ukuran mesh -12/+20 terjadi nilai pembesaran yang kecil.

Hal ini dimungkinkan karena ukuran pasir yang besar menyebabkan cairan akan sulit menekan pada tempat pasir bersentuhan dengan pola, namun disisi lain jika pada tempat yang tidak bersentuhan dengan pola maka penambahan ukuran menjadi lebih besar. Hal ini dapat dibuktikan dengan nilai standar deviasi pada ukuran butir -12/+20 adalah terbesar yakni 86,1. Standard deviasi yang lain dengan ukuran mesh semakin besar berturut-turut sebesar 52,4; 32,2; 43,2. Faktor lain yang menyebabkan peningkatan ukuran benda cor pada pasir yang memiliki mesh tinggi lebih rendah adalah karena permeabilitas pasir lebih rendah. Permeabilitas pasir rendah menyebabkan cairan lebih tertahan dan ukuran relatif lebih stabil (tidak membesar lebih banyak).

3.4. Pengaruh Penggetaran (Vibration) Pada hasil Coran

Kekasaran permukaan Al-7%Si menurun dengan peningkatan amplitudo penggetaran sampai 485 μ m. Hal ini terjadi karena peningkatan amplitudo getaran akan menyebabkan partikel-partikel pasir yang lebih halus bergerak mengisi ruangan diantara butir-butir pasir. Amplitudo yang lebih besar dari 485 μ m menyebabkan butir-butir pasir yang lebih besar bergerak dan gaya antar butir pasir akan menyebabkan pasir bergerak menuju ke permukaan pola. Hal ini menyebabkan keruncingan permukaan

pola lebih besar dan kekasaran permukaan benda cor menjadi lebih kasar (Kumar dkk, 2007). Peningkatan lama penggetaran cetakan akan menyebabkan kekasaran permukaan benda cor Al-7%Si menurun. Hal ini karena semakin lama waktu penggetaran akan menyebabkan partikel-partikel yang lebih kecil berada pada batas antara pola dan pasir. Keruncingan permukaan pasir pada perbatasan pola akan berkurang sehingga permukaan benda cor lebih halus (Kumar dkk, 2007). Lama penggetaran Pada pengecoran Al-7%Si memiliki faktor kurang berpengaruh dalam menentukan nilai tegangan tarik dan elongasi benda cor (Kumar dkk, 2008).

3.5. Efek Ukuran Pasir terhadap Fluidity

Ukuran pasir yang digunakan proses pengecoran metode LFC sangat mempengaruhi kemampuan alir dari logam cair untuk mengisi celah/rongga (cavity) dari cetakan. Gambar (...) menunjukkan pengaruh ukuran pasir dan lapisan pola pada kemampuan dari logam cair mengisi rongga cetakan dengan perbedaan ketebalan runner. Dapat dilihat dengan menggunakan ukuran pasir yang lebih kecil (AFS 171) dan mengaplikasikan pelapisan pola, kemampuan dari logam cair mengisi cetakan bertambah untuk semua sampel.

Kemampuan yang paling tinggi didapatkan pada ukuran pasir yang halus dengan cetakan yang dilapisi dan yang paling rendah kemampuan pengisian kedalam cetakan pada pasir yang kasar tanpa pelapisan. Penggunaan pasir yang halus dan lapisan pola dengan zircon, yang menghalangi tahanan panas (thermal barrier) antara pembekuan logam dan pasir cetak, retards transfer dari panas ke pasir cetak dan atmosfer sekitar (Jafari dkk, 2010)

Fenomena ini dapat mencegah pembekuan dan mengurangi tingkat pemadatan tuang TWDI, sehingga memungkinkan jarak yang lebih jauh dari perjalanan logam cair. Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada **Gambar 3.4**, dapat dinyatakan bahwa ketebalan bagian berbanding lurus dengan kemampuan pengisian cetakan, antara lain penurunan penampang melintang dan akibatnya mengurangi modulus pengecoran menyebabkan kenaikan laju pemadatan sampel cor sehingga jarak tempuh dari logam cair berkurang.

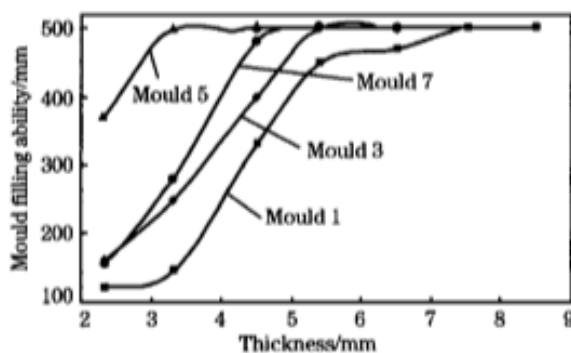


Fig. 4 Variation of mould filling ability with sample thickness

Gambar 3.4 Kemampuan mengisi rongga dengan beberapa ketebalan

Selain itu ukuran pasir silica juga berpengaruh terhadap fluiditas logam cair dimana ukuran pasir silica yang digunakan adalah dengan mesh 20, 35 dan 70 dengan densitas pola busa EPS dengan dibuat bervariasi dengan densitas 7, 18 dan 20 kg/m³ dengan suhu penuangan 710 °C. Gambar 2.2 menunjukkan fluiditas dengan ukuran pasir dengan mesh 20, 35 dan 70 dan pola

cetakan busa polistiren dengan densitas 7, 18 dan 20 kg/m³.
Fluiditas relatif konstan dengan meningkatnya ukuran mesh pasir.
Ukuran Mesh dari pasir cetak

Daftar pustaka

Surdia, T. dan Saito, S., 1992, "Pengetahuan Bahan Teknik", P.T
Pradnya Paramitha, Jakarta.

BAB IV

LAPISAN (COATING)

POLA EPS

Proses *Lost Foam casting* sangat potensial untuk digunakan untuk membuat benda cor yang sangat rumit, yang tidak mudah diproduksi oleh pengecoran proses konvensional. Namun, menawarkan keuntungan ekonomi, *Lost Foam casting* dikaitkan dengan tingkat kegagalan yang sangat tinggi karena kurangnya pemahaman tentang mekanisme fundamental meliputi proses, dan kurangnya pengetahuan tentang bagaimana seharusnya variabel proses dikendalikan untuk mencapai coran berkualitas tinggi.

Proses pengecoran busa hilang menggunakan pola yang terbentuk dari *expanded polystyrene* (EPS), yang dicelupkan ke dalam cairan berbentuk *slury* tahan api berbahan dasar air untuk memberikan lapisan tipis sekitar 0,5 mm ketebalan. Setelah dikeringkan, pola dilapisi ditempatkan di kotak cetakan yang diisi dengan pasir kering, yang dipadatkan oleh getaran untuk membentuk cetakan kaku untuk mendukung pola. Cetakan kemudian diisi logam cair, dengan pola polystyrene yang tersisa di tempatnya, di mana ia terdegradasi oleh panasnya logam cor.

4.1. Jenis-Jenis Bahan Coating Pola

Pelapisan (*Coating*) merupakan suatu kesatuan dalam pengecoran logam dengan metode LFC karena menghasilkan permukaan yang halus tanpa pengeleman dan pembakaran pasir. Coating memiliki peran penting dalam beberapa hal. Coating menjamin kekerasan dan kekakuan pola serta mengontrol pelepasan gas atau cairan dari dekomposisi polystyrene foam (Acrimovic, 2000). Coating menentukan waktu pembongkaran benda cor dan laju hilangnya panas logam (Zhao, 2006). Seiring peningkatan teknologi pengecoran, permintaan kualitas coating ditingkatkan dengan menggunakan jenis bahan refraktrory baru, suspensi dan binder yang mampu meningkatkan proses manufaktur (Acrimovic dkk, 2003). Ballman (1988) menyarankan bahwa bahwa bahan coating untuk pengecoran lost foam hendaknya memiliki beberapa kriteria sebagai berikut:

- Coating dengan permeabilitas tinggi digunakan pasir yang lebih kasar/besar sedangkan coating dengan permeabilitas sedang atau rendah digunakan untuk pasir yang lebih halus/kecil.
- Coating harus cepat kering
- Coating harus mudah menempel ke pola dan mudah untuk mengontrol ketepatan tebal coating.
- Kekuatannya bagus, tahan abrasi, tahan retak tatkala disimpan, tahan beban lengkung dan perubahan bentuk selama dibuat cetakan.
- Coating seharusnya lebih tebal apabila untuk pengecoran pada suhu lebih tinggi dan pasir yang lebih kasar/ besar.

Ada beberapa jenis coating pola pengecoran lost foam yang memiliki karakteristik berbeda. Coating ini didesain untuk memenuhi beberapa tuntutan dalam pengecoran lost foam (Acimovic, 2003). Dieter (1965) menggunakan tepung zircon untuk coating paduan aluminium sementara Trumbuvolic (2003) menggunakan kaolin dan talk. Pelapis sodium silikat tidak direkomendasikan untuk coating karena permeabilitasnya rendah dan memicu terjadinya percikan logam saat pengisian logam cair.

Coating untuk pengecoran besi cor menggunakan coating berbahan dasar besi mampu menahan permasalahan penetrasi logam (Clegg, 1978). Kumar dkk (2004) telah menganalisis coating dengan menggunakan filler dari material siliminite, kuarsa, aluminium silikat yang dikombinasikan dengan zirkon dan binder untuk mempertimbangkan segi ekonomisnya.

Tepung zirconia dan aluminium silikat memiliki dielektrik rendah, massa jenis tinggi, viskositas tinggi dan pH mendekati bahan refraktori netral (Kumar dkk, 2004). Waktu pengisian cetakan akan lebih lama jika menggunakan lapisan coating yang lebih tebal. Jika menggunakan coating maka tambahan waktu pengisian kurang dari 50% dibanding waktu yang terukur dalam kondisi normal di industri. Dalam kondisi ekstrim dimana cetakan tidak memiliki permeabilitas, waktu pengisian dapat mencapai 500% lebih lama dibandingkan pada kondisi normal. Hal ini dapat terjadi karena coating menutup pola atau ada aglomerasi pasir yang mengkondensasi hasil degradasi polystyrene foam (Sand dan Shivkumar, 2003).

4.2. Proses Pelapisan Pola EPS

Persiapkan material pelapis pola yaitu refraktori Zircon Okside (ZrO_2), dan bahan pengikat Colloidal Silica (O_2Si). Kedua bahan ini dicampur dengan perbandingan komposisi 1: 0,35 pada temperatur pelapisan 25-30 °C. Metode coating bisa dengan cara dicelupkan langsung kedalam cairan. Dengan mencelupkan beberapa kali pola EPS kedalam cairan akan memberikan efek ketebelan yang berbeda-beda sebagaimana dilaporkan (Rajagukguk dkk, 2015).



Gambar 4.1 Proses pelapisan pola EPS a) skala lab, b) industri (manual), c) industri (robotic)

Setelah pola dilapisi, selanjutnya pola dikeringkan selama 1-2 jam dengan temperatur 29-30 °C diudara terbuka hingga pola benar-benar kering (gambar 4-2). Untuk membantu agar pola EPS yang telah dilapisi cepat kering bisa digunakan blower. Ketebalan lapisan pola dipengaruhi seberapa banyak pola dicelupkan kedalam cairan lapisan (*slurry*).

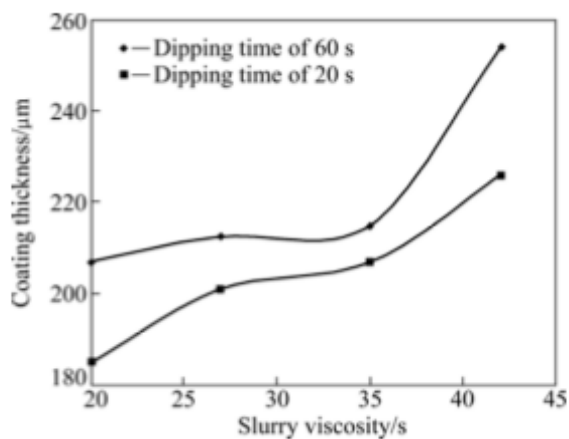


Gambar 4.2 proses pengeringan lapisan pola EPS

4.3. Ketebalan Lapisan Pada Aluminium Paduan

Karakteristik pelapisan dan integritas pengecoran Lapisan pada pola busa merupakan parameter penting dalam menghasilkan pengecoran berkualitas tinggi dengan proses LFC karena mempertahankan bentuk rongga cetakan di celah antara degradasi pola dan logam cair yang meningkat yang mengisi cetakan. Sebenarnya, waktu pengisian cetakan dikendalikan oleh seberapa cepat gas dihasilkan dan lolos melalui pasir cetakan. Untuk memungkinkan gas menghilang dengan cepat baik pada lapisan dan pasir cetakan harus mempunyai kemampuan permeabilitasnya yang baik. Gambar 4.5 menunjukkan variasi ketebalan lapisan sebagai fungsi viskositas bahan coating untuk waktu pencelupan yang berbeda. Jelas bahwa dengan meningkatkan viskositas cairan

coating dari 20 sampai 35 detik, tidak ada perubahan signifikan pada ketebalan lapisan, namun karena viskositas meningkat menjadi 42 s, ketebalan lapisan meningkat secara signifikan sampai nilai 0,26 mm untuk waktu pencelupan 60 s. Selain itu, peningkatan waktu pencelupan menaikkan ketebalan lapisan pada pola busa karena lebih banyak ketersediaan slurry untuk mengendap pada permukaan busa.

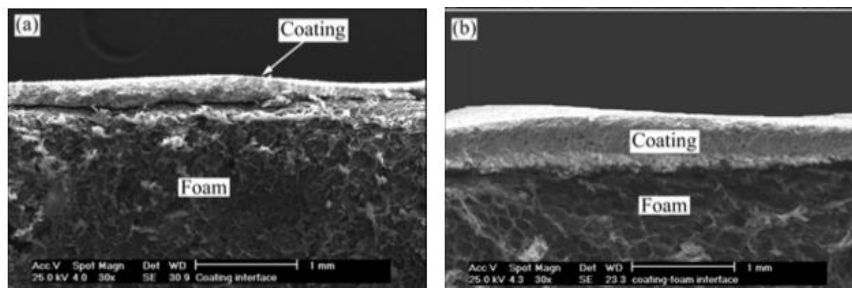


Gambar 4.3 efek viskositas dari bahan coating dan waktu pencelupan terhadap ketebalan

Gambar 4.4 menunjukkan penampang melintang lapisan pelapis yang dihasilkan dengan viskositas 20 dan 42 detik setelah dicelupkan selama 60 detik. Dapat dilihat bahwa ketebalan lapisan sebanding dengan viskositas slurry, karena viskositas cairan yang lebih tinggi menghasilkan lapisan yang lebih tebal. Karena permeabilitas yang berkurang pada lapisan yang lebih tebal, gas yang terlepas melalui lapisan dan pasir cetakan lebih lambat, yang menghambat arus ke bawah logam dan menyebabkan gas

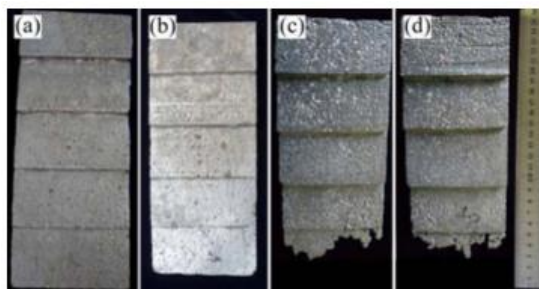
terperangkap. Gambar (4.5) menunjukkan efek ketebalan lapisan pada benda tuang yang dihasilkan. Seperti terlihat pada gambar (4.5), meningkatkan ketebalan lapisan mempengaruhi kualitas pengecoran dan menyebabkan cacat misrun, yang sesuai dengan hasil penelitian (Griffiths dan Davies).

Dari Gambar (4.5) ini juga dapat diamati bahwa oleh menggunakan viskositas 35 dan 42 s dengan waktu semprot 60 s, pengisian parsial, terutama pada bagian 3 mm, diproduksi. Sebaliknya, pengecoran yang dihasilkan dengan viskositas rendah, terutama 20 s (Gambar 4.5 (a)) untuk waktu pencelupan tetap (60 s) menunjukkan pengisian lengkap dan sedikit ketidaksempurnaan permukaan dapat diamati. Gambar (4.6) menunjukkan adanya pori-pori pada pelapis diperoleh dengan menggunakan viskositas slurry yang berbeda. Terlihat jelas bahwa pelapis yang lebih tebal (Gambar 4.6 (a) dan (b)) mengandung sedikit pori-pori dibandingkan dengan lapisan tipis (Gambar 4.6 (c) dan (d)). Lebih banyak pori dalam lapisan ini berarti permeabilitas yang lebih tinggi dan penghilangan gas yang cepat yang dihasilkan selama interaksi logam busa-cair, yang berkorelasi dengan baik dengan perpindahan panas lapisan berpori (Chen dan Penumadu, 2006).



Gambar 4.4 potongan melintang dari pengaruh ketebalan lapisan a) 20 detik & b) 42 s

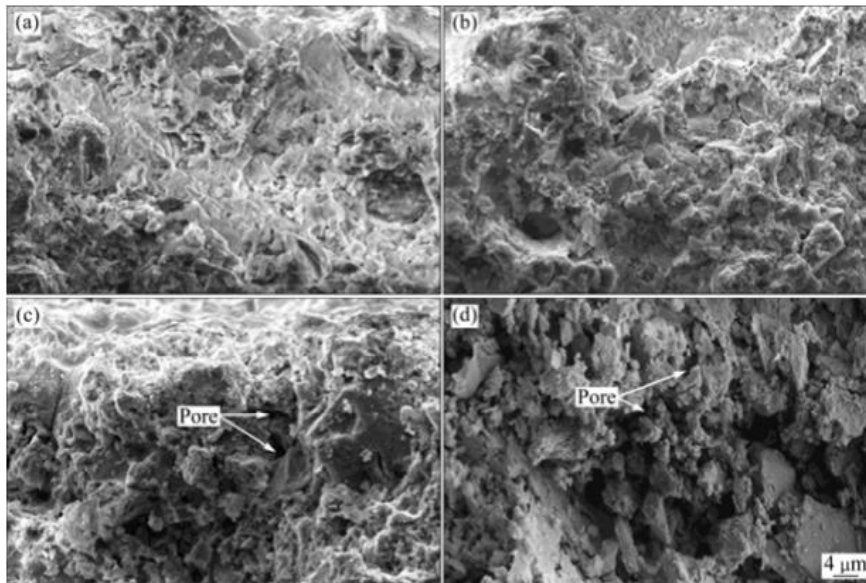
Hal ini menunjukkan bahwa lapisan yang lebih tebal memberikan perpindahan kalor yang lebih rendah dari logam cair ke cetakan dan lingkungan. Penghapusan gas yang cepat melalui lapisan dan pasir cetakan meningkatkan fluiditas logam cair karena hanya sedikit celah gas yang menghalangi arus maju yang maju. Distribusi pori yang ditunjukkan pada Gambar (4.6) telah diambil dari penampang lapisan dan tidak mungkin hal itu akan mempengaruhi kekasaran permukaan tuang.



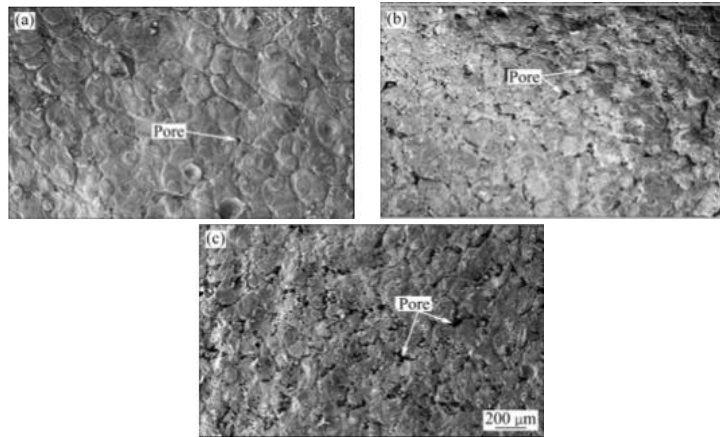
Gambar 4.5 photo benda cor dengan pola yg dilapisi selama 60 detik dan perbedaan viskositas cairan a) 20 dtk, b) 27 dtk, c) 35 dtk, d) 42 dtk

Distribusi pori di permukaan pelapis dengan waktu pencelupan yang berbeda ditunjukkan pada Gambar (4.7). Dapat dilihat bahwa dengan waktu pencelupan yang lebih pendek, pori-pori di lapisan tampak dibagikan secara merata dibandingkan dengan yang diamati pada lapisan yang disiapkan dengan waktu pencelupan yang lebih lama. Hal ini dapat menghasilkan kualitas pengecoran yang lebih baik dalam hal integritas pengecoran yang ditunjukkan pada Gambar (4.5), sebagai hasil transfer gas yang dikembangkan dibandingkan dengan yang diperoleh dengan

waktu perendaman yang lebih lama. Hasilnya sangat sesuai dengan penelitian sebelumnya oleh Chen dan Penumadu (2006), dan Khodai dan Parvin (2006) bahwa distribusi pori-pori seragam dan homogen memiliki korelasi yang baik dengan sifat transportasi lapisan berpori.

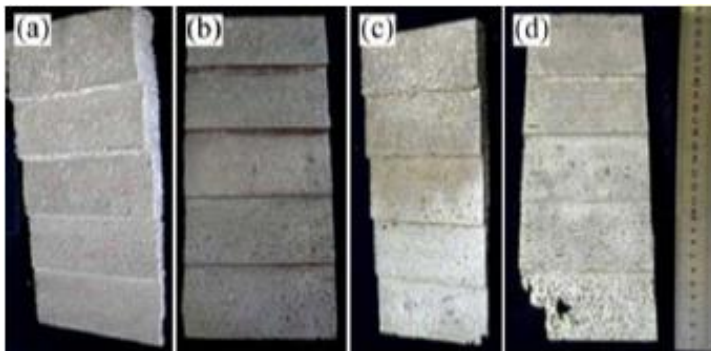


Gambar 4.6 pengamatan SEM menunjukkan distribusi pori dengan perbedaan viskositas cairan (waktu celup 60 detik) a) 42 dtk, b) 35 dtk, c) 27dtk, dan d) 20 dtk



Gambar 4.7 pengamatan SEM distribusi pori pada permukaan lapisan dengan perbedaan waktu celup a) 60 dtk, b) 40 dtk, c) 20 dtk

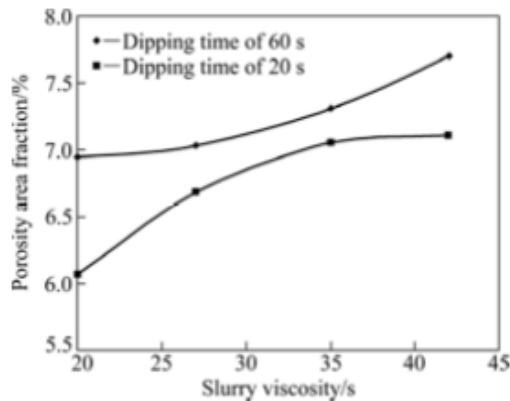
pendek, pengisian cetakan lengkap diperoleh, terutama pada pengecoran yang dihasilkan dengan viskositas bubur 35 dan 42 s. Hal ini dapat dikaitkan dengan penurunan ketebalan lapisan pada pola busa yang menyebabkan peningkatan laju alir logam cair agar lebih baik mengelas bagian yang lebih tipis dan pada akhirnya menghasilkan pengecoran kualitas. Memang, seperti ditunjukkan pada Gambar (4.8), replikasi bentuk premium terbaik diperoleh dengan waktu pencelupan 20 s. Selanjutnya, Gambar 4.8 dan Gambar (4.8) juga mengungkapkan bahwa viskositas lumpur tampaknya memiliki efek yang lebih menonjol pada integritas pengecoran dibandingkan dengan waktu pencelupan karena viskositas slurry yang lebih rendah benar-benar mereplikasi bentuk pola tanpa memperhatikan waktu pencelupan.



Gambar 4.8. Gambar dari benda cor dengan lapisan pola dicelup 20 dtk dg perbedaan viskositas a) 20 s; b) 27 s; c) 35 s dan d) 42 s

4.4. Porositas

Gambar (4.9) mengilustrasikan fraksi daerah porositas pada tuang sebagai fungsi viskositas *slury* dan waktu pencelupan yang digunakan untuk mengembangkan lapisan pada pola busa. Dapat dilihat bahwa dengan meningkatkan viskositas *slury* dan waktu pencelupan, fraksi porositas meningkat. Karena kedua parameter meningkat, ketebalan dan permeabilitas lapisan mengurangi, yang menghambat penetrasi produk pirolisis (gas + cairan) melalui lapisan (Shin dkk, 2004; Trumbulovic dkk, 2004 dan Warner dkk, 1998). Bila ini terjadi, waktu reaksi meningkat dan menyebabkan porositas meningkat pada coran.

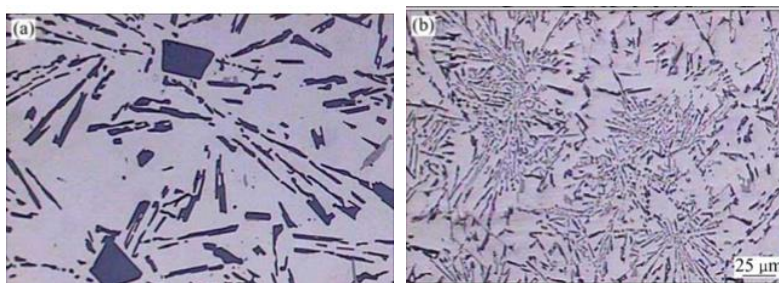


Gambar 4.9 efek viskositas cairan dan waktu pencelupan pada porositas LFC

Menurut penelitian sebelumnya (Bennet dkk, 1999; Zhao dkk, 2002), penggunaan lapisan permeabilitas rendah mengurangi ukuran dan jumlah cacat pengecoran busa yang hilang. Hal ini disebabkan oleh penurunan kecepatan logam cair, yang menyertai peningkatan waktu pengisian cetakan, meningkatkan waktu produk busa untuk lolos melalui lapisan. Namun, hasil yang diperoleh dalam karya ini (Gambar 4.5 dan Gambar 4.8) tidak sesuai dengan beberapa hasil yang dilaporkan. Ini adalah mungkin karena ada beberapa parameter proses yang mengendalikan pembentukan cacat pengecoran dan bukan parameter tunggal tersendiri, seperti dilansir Hill dkk (1998). Saat memeriksa efek ketebalan pelapis pada fraksi area porositas, kita juga harus mempertimbangkan kerapatan dan ketebalan pola busa, suhu penuangan meleleh, stabilitas logam dan parameter lainnya dalam kombinasi.

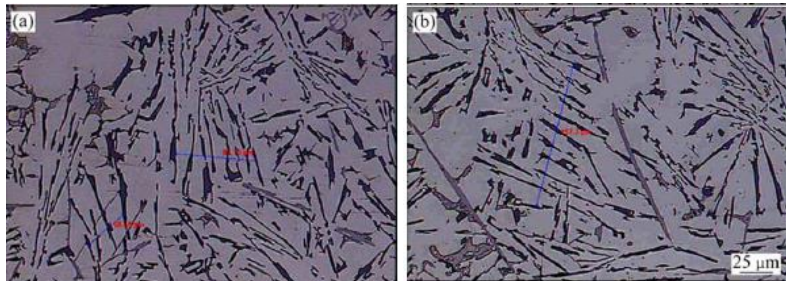
4.5. Jarak silikon eutektik

Gambar 4.10 menunjukkan mikrostruktur optik dari pola busa yang hilang yang dihasilkan dengan menggunakan arus viskositas/ waktu pengeringan 42/60 dan 20/20 s. Mikrostruktur mengandung α utama (Al) dan Al-Si eutektik. Terlihat bahwa jarak silikon eutektik (ESS) pada mikrostruktur meningkat dengan menggunakan viskositas *slurry* yang lebih tinggi.



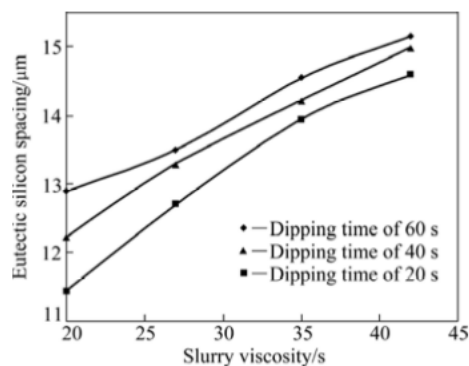
Gambar 4.10 mikrostruktur dari pengaruh viskositas dari cairan, lama pencelupan terhadap eutectic silicon a) viskositas 40 dg waktu celup 60 dtk; b) viskositas 20 dg waktu celup 20 dtk

Gambar (4.11) menunjukkan tren peningkatan ESS dengan viskositas *slurry* yang meningkat pada tuang. Secara umum, ESS yang lebih besar didapat saat ketebalan lapisan meningkat. Hal ini mungkin disebabkan oleh karakteristik perpindahan panas yang secara signifikan dipengaruhi oleh ketebalan lapisan. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa lapisan yang lebih tebal menghasilkan mikro kasar dan sebagai hasil ESS yang lebih besar diperoleh.



Gambar 4.11 mikrostruktur pengaruh waktu pencelupan pada eutektik silicon a) 20 s dan b) 40 s

Temuan ini tampaknya konsisten dengan yang dilaporkan oleh peneliti sebelumnya (Trumbolovis dkk, 2004; Shivkumar, 2003). Itu harus juga dicatat bahwa viskositas *slurry* menunjukkan efek yang tidak rata pada struktur mikro dibandingkan dengan waktu pencelupan seperti yang diilustrasikan pada Gambar (4.12).



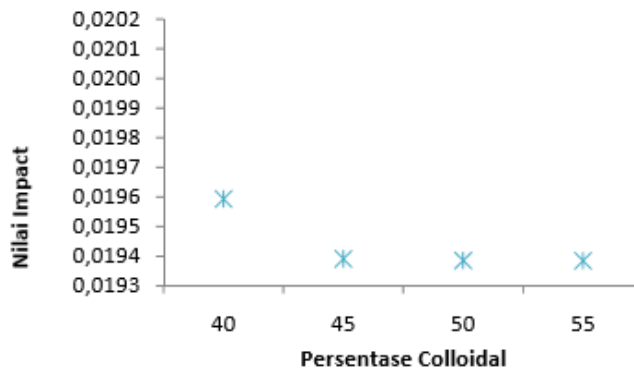
Gambar 4.12 efek viskositas dan waktu celup terhadap eutektik silikon

Dapat disimpulkan bahwa peningkatan viskositas *slurry* atau waktu pencelupan yang meningkatkan ketebalan lapisan pada pola busa, menghasilkan pengaruh yang signifikan terhadap integritas pengecoran dan struktur mikro. Lapisan tipis menghasilkan lebih banyak pori-pori, yang memfasilitasi pelepasan gas selama *casting* dan menghasilkan pengisian cetakan yang lebih baik, porositas gas kurang dalam pengecoran dan jarak silikon eutektik yang lebih halus.

4.6. Pengaruh Tebal Lapisan Terhadap Ketangguhan

Ketebalan lapisan pada pola akan mempengaruhi ketangguhan pada hasil coran. Mampu impak hasil coran *lost foam* mengalami penurunan sejalan dengan pemberian lapisan colloidal silica yang semakin tebal prosentasenya pada pola lost foam, biarpun nilai penurunannya tidak terlalu signifikan. Hal ini dapat terjadi karena lapisan colloidal silica mempunyai sifat yang getas sehingga pada saat mendapatkan beban kejut lapisan ini akan mudah patah.

Karena lapisan ini menempel erat pada logam hasil coran maka juga mempengaruhi ketangguhan impak pada logam, begitu lapisan luarnya patah maka logam didalamnya juga ikut patah. Hasil ini sejalan dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa pelapisan pola akan mengakibatkan terjebaknya gas sehingga hasil coran menjadi rapuh. Hal ini berakibat pada turunnya ketangguhan impak pada pelapisan pola yang semakin tinggi (Guler dkk, 2014; Sutyoko, 2011).



Gambar 4.13 hubungan persentase colloidal silica vs nilai ketangguhan paduan Al-12Si

4.7. Permeabilitas Lapisan (Coating) Pola EPS

Permeabilitas adalah kemampuan suatu zat/membran untuk meloloskan sejumlah partikel yang menembus atau melaluinya. Menurut Wikipedia **Permeabilitas (K)** merupakan salah satu parameter petrofisik yang berupa kemampuan batuan untuk dapat meloloskan fluida, satuan permeabilitas yang umum digunakan ialah Darcy. Pada proses pengecoran metode LFC pola EPS biasanya dilapisi dengan bahan coating dengan ketebalan yang berbeda-beda, ketebalan lapisan mempengaruhi gas untuk keluar melewati lapisan.

Pelapisan memungkinkan retensi dari bentuk rongga cetakan di celah antara degradasi kedepan dari pola dan mengisi cetakannya dengan logam cair. Kedua, karena itu permeabilitas, degradasi produk dari pola dapat melewatinya. Telah diusulkan bahwa, dalam kasus pengecoran aluminium, pola polistiren terdegradasi pertama menjadi cairan rantai molekuler pendek dan

styrene cair, yang dapat diserap ke dalam lapisan permeabilitas, dan kemudian selanjutnya menjadi produk sampingan uap termasuk uap stirena, uap air dan karbon dioksida, yang melewati lapisan permeabel ke pasir di sekitarnya (Shivkumar dkk, 1990). Pelapis pola biasanya terdiri atas *slurry* yang mengandung air yang mengandung partikel-partikel tahan api seperti alumina, silika dan mika, dan pengikat, seperti polivinil asetat, dekstrin dan akrilik, bersama dengan dispersan, agen suspensi dan biosida (Martinez, 1990).

Dalam beberapa penelitian permeabilitas lapisan pola telah diukur menggunakan piringan lapisan yang dijepit di antara dua gasket silikon dengan udara yang dipaksa melalui lapisan pada suatu tekanan yang terkontrol (biasanya antara 7 dan 20 kPa) (Litleton dkk, 1996). Tingkat aliran udara dan perbedaan tekanan di seluruh cakram yang dilapisi diukur dan permeabilitas media berpori, hukum Darcy untuk (Persamaan 4-1) digunakan untuk menghitung permeabilitas lapisan. Persamaan Forchheimer (Innocentini dkk, 1999) telah terbukti memberikan informasi yang lebih andal dari pada hukum Darcy tentang permeabilitas struktur berpori tinggi di mana kecepatan fluida tinggi (seperti pada filter busa keramik yang digunakan dalam penyaringan logam), tetapi hukum Darcy telah dianggap valid dalam kasus pelapisan Lost Foam karena rendahnya kecepatan aliran fluida dalam lapisan (Burditt, 1988); (Spada, 2001).

Untuk aliran viskositas laminar melalui bahan berpori homogen makroskopik, dinyatakan dengan hukum Darcy (Philipse dan Scharam, 1999) persamaan 4-1.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} U$$

Dimana ΔP adalah penurunan tekanan total melintasi medium dengan ketebalan L dan permeabilitas k_1 spesifik. U adalah kecepatan superfisial cairan, dengan viskositas dinamis μ , dan dianggap seragam. Kecepatan superficial cairan dapat dihitung dengan persamaan (4-2)

$$U = \frac{\Delta Q}{A}$$

di mana ΔQ adalah laju alir yang diukur melalui medium dan A adalah luas penampang (Massey, 1995).

Sejumlah peneliti telah menggunakan metode yang berbeda untuk mengukur permeabilitas berbagai pelapis pola dan beberapa nilai telah dipublikasikan. Sebagai gantinya, pelapis umumnya memiliki karakteristik "tinggi" atau "rendah" permeabilitas, dan ini telah membuat kesulitan untuk membuat perbandingan antara hasil percobaan pengecoran dari para peneliti yang berbeda. Selanjutnya, proses pengecoran rongga kosong konvensional telah sangat diuntungkan dari simulasi komputer. Tetapi pemodelan pengecoran Lost Foam tidak pada tingkat kemampuan yang sama, sebagian karena prosesnya lebih rumit, dan sebagian karena banyak mekanisme yang terlibat tidak dipahami dengan baik. Untuk alasan ini adalah penting untuk memahami, secara kuantitatif, permeabilitas lapisan pola dan perannya dalam memungkinkan penghapusan produk degradasi pola gas, dan pembentukan cacat akibat gas yang terjebak. Hasil yang dilaporkan di sini ditujukan untuk menyediakan data dasar

untuk permeabilitas pelapisan pola yang digunakan dalam pengecoran Lost Foam paduan aluminium, untuk membantu dalam memahami proses casting, dan untuk memfasilitasi pemodelan matematis.

4.7.1. Percobaan Pengujian Permeabilitas

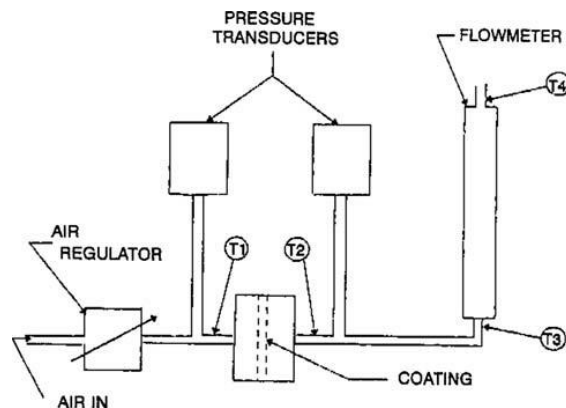
Sampel dari pelapisan pola untuk pengukuran permeabilitas diproduksi dengan mengaplikasikan bahan pelapis ke pendukung mesh, terbuat dari kawat baja stainless berdiameter 0,112 mm, dengan 100 kabel per 25 mm, dipotong menjadi cakram dengan diameter 40 mm. Ketebalan lapisan antara 300 dan 600 μm diuji (pelapis pola yang digunakan dalam praktek), dengan tiga atau enam sampel dibuat dan diuji untuk setiap ketebalan. Setelah dilapisi, sampel cakram dikeringkan pada suhu 125 ± 2 °C selama 10 menit. (hal itu tidak mungkin secara langsung mengukur permeabilitas sampel lapisan dari pola karena kerapuhan mereka).

Peralatan yang digunakan untuk mengukur aliran udara melalui sampel pelapis didasarkan pada peralatan yang dikembangkan oleh Littleton dkk, (1996) ditunjukkan pada Gambar (4.14). Cakram yang dilapisi dijepit di dudukan sampel yang terbuat dari dua cakram aluminium yang dibaut bersama. Pemegang sampel (lengkap dengan cakram yang dilapisi) ditempatkan di ruang dibagi menjadi dua bagian, masing-masing setengah memiliki cincin-O yang membentuk segel kedap udara pada pemegang sampel ketika ruang itu disekrup bersama.

Udara bertekanan dipaksa melalui ruangan dan karenanya melalui sampel pelapis pada tekanan antara 0,1 dan 0,2 MPa, dikontrol oleh regulator tekanan. Perbedaan tekanan di seluruh lapisan dicatat oleh transduser tekanan yang ditempatkan di kedua

sisinya, terhubung ke sistem akuisisi data berbasis PC. Sebuah Flowmeter digunakan untuk mengukur laju aliran udara melalui sampel pelapis, dan data yang dihasilkan digunakan dalam Persamaan (1) untuk menghitung permeabilitas, k_1 , dari setiap lapisan. Peralatan diuji dengan menyegel permukaan sampel pelapis dengan lilin dan menempatkan peralatan di bawah tekanan, untuk menunjukkan bahwa peralatan tidak bocor.

Nilai permeabilitas dari tiga lapisan busa hilang komersial untuk Al cor (disediakan oleh Foseco Morval, Ontario, Kanada). Komposisi pelapis didominasi mika dalam pembawa air, dengan pengikat, bahan anti-busa, agen pembasahan dan biosida. Empat pengenceran masing-masing dari tiga tingkat lapisan yang berbeda diproduksi untuk mendapatkan sampel pelapisan dengan empat berbeda ketebalan. Luas penampang efektif sampel mesh yang dilapisi diperoleh dengan mengurangi area yang ditempati oleh kawat di mesh dari total luas lapisan, dan $3,11 \times 10^{-4} \text{ m}^2$.



Gambar. 4.14 Sketsa peralatan yang digunakan untuk mengukur permeabilitas lapisan

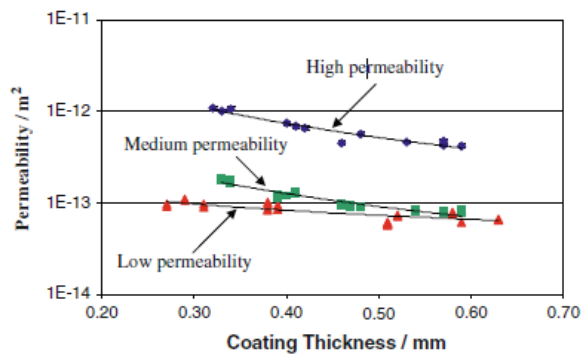
Gambar (4.15) menunjukkan perubahan permeabilitas dengan ketebalan lapisan untuk tiga pola pelapisan berbasis mika yang diperiksa. Setiap titik data telah ditunjukkan, dan dapat dilihat bahwa reproduktifitas permeabilitas terukur dari sampel dengan ketebalan yang sama bagus. Hasil permeabilitas ditunjukkan pada Tabel (1), bersama-sama dengan standar deviasinya. Untuk ketebalan lapisan sekitar 0,33 mm, lapisan permeabilitas rendah memiliki permeabilitas rata-rata sekitar $9,5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$, lapisan permeabilitas sedang memiliki nilai rata-rata sekitar $1,8 \times 10^{-13} \text{ m}^2$, dan lapisan permeabilitas tinggi memiliki nilai rata-rata sekitar $9 \times 10^{-13} \text{ m}$ (ditentukan oleh interpolasi), kisaran yang kira-kira sebesar besarnya.

Tabel 1 Ringkasan dari pengukuran permeabilitas lapisan

Type of coating	Mean sample thickness (mm)	Number of samples	Mean permeability (m^2)	Standard deviation (m^2)
Low permeability	0.29	6	9.8×10^{-14}	7.4×10^{-15}
	0.38	6	9.1×10^{-14}	7.3×10^{-15}
	0.51	6	6.4×10^{-14}	6.6×10^{-15}
	0.60	6	7.2×10^{-14}	9.3×10^{-15}
Medium permeability	0.34	6	1.7×10^{-13}	7.8×10^{-15}
	0.40	6	1.2×10^{-13}	5.9×10^{-15}
	0.47	6	9.2×10^{-14}	3.0×10^{-15}
	0.57	6	8.1×10^{-14}	3.3×10^{-15}
High permeability	0.33	3	9.0×10^{-13}	2.1×10^{-13}
	0.41	3	7.0×10^{-13}	5.2×10^{-14}
	0.49	3	4.9×10^{-13}	6.5×10^{-14}
	0.58	3	4.4×10^{-13}	3.0×10^{-14}

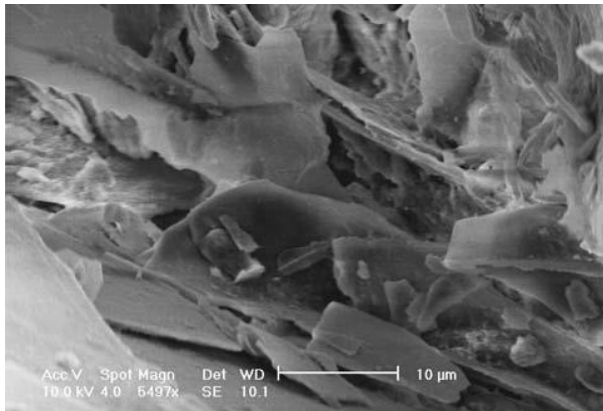
Dari hasil pengukuran harga permeabilitas menurun dengan meningkatnya ketebalan lapisan. Misalnya, dengan hampir dua kali lipat ketebalan, 0,6 mm, nilai sekitar $7,1 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ dan $4,3 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ diperoleh untuk pelapisan permeabilitas rendah dan tinggi,

penurunan sekitar seperempat dan setengah, masing-masing. Kesalahan pengukuran dalam nilai-nilai ini diperkirakan menjadi 5% (ditentukan dari kesalahan dalam pengukuran ketebalan lapisan, tekanan, dan laju aliran udara).



Gambar. 4.15 Nilai permeabilitas terukur dari tiga pelapisan pola Lost Foam , untuk berbagai ketebalan lapisan

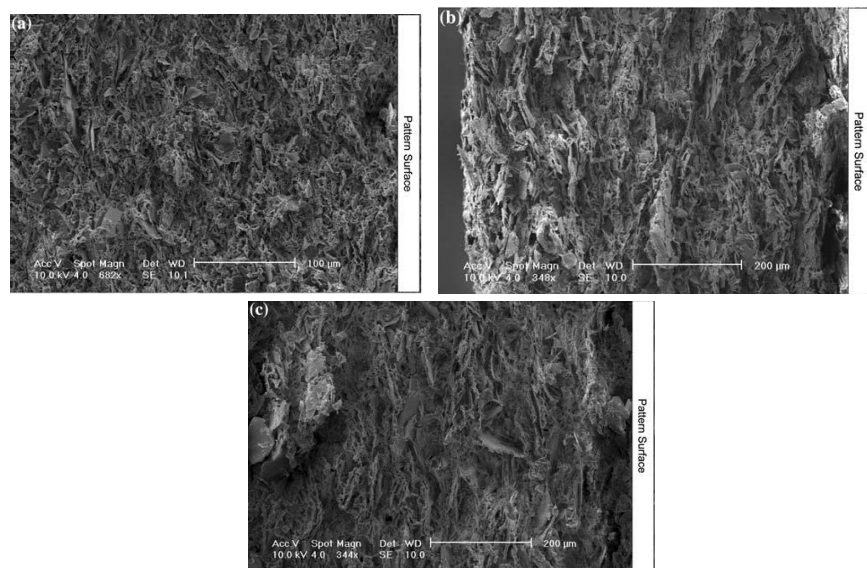
Gambar (4.16) menunjukkan struktur internal lapisan, diperoleh dengan mematahkan sebagian lapisan dari pola. Ini menunjukkan partikel mika yang datar dan sejajar, ke permukaan pola busa, dengan partikel yang lebih kecil mengisi rongga antara pelat mika yang lebih besar. Gambar ini dari lapisan permeabilitas tinggi, tetapi lapisan lainnya tampak serupa.



Gambar. 4.16 gambar SEM yang menunjukkan pengaturan partikel mika dalam lapisan permeabilitas tinggi. Partikel seperti piring disejajarkan satu sama lain, dengan partikel mika yang lebih kecil dan bahan refraktori lainnya di antaranya

Ukuran partikel ditentukan dari gambar pelapis, dan dari data yang diperoleh dari pemasok lapisan, Foseco Morval, Ontario, Kanada. Lapisan permeabilitas rendah terutama terdiri dari partikel mika kecil yang berdiameter antara 10 dan 30 μm , yang tampak berkerut dekat (lihat Gambar 4.17a). Struktur ini akan menghasilkan jalur aliran yang lebih sedikit dan menjelaskan permeabilitas rendah dari lapisan ini. Sebaliknya, lapisan permeabilitas tinggi mengandung partikel mika yang lebih besar antara 70 dan 100 μm , yang dikemas bersama kurang erat (lihat Gambar 4.17c) dan karena itu memberikan lebih sedikit hambatan mengalir, memberikan permeabilitas yang lebih tinggi. Lapisan permeabilitas sedang terdiri dari partikel berukuran antara 20 dan 50 μm (lihat Gambar 4.17b).

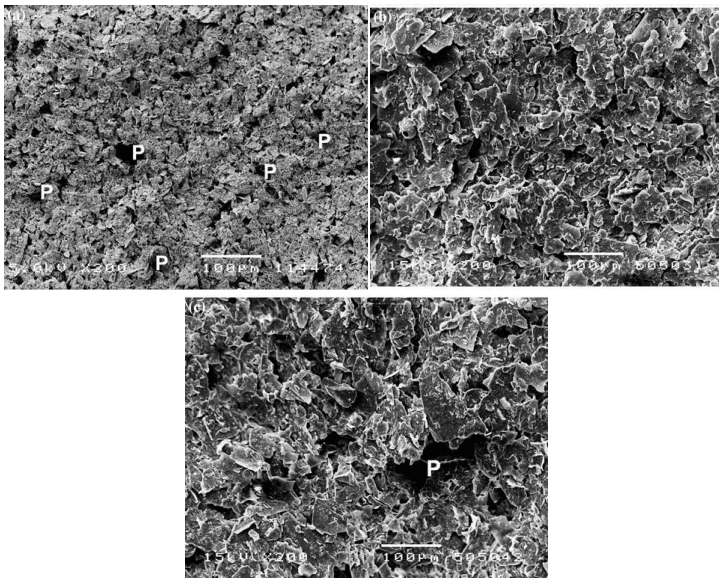
Permukaan lapisan permeabilitas rendah berdekatan dengan pola ditunjukkan pada Gambar (4.18a). Ini mengandung banyak pori-pori diameter rata-rata sekitar 30 mikrometer, meskipun tidak ada bukti yang dapat ditemukan bahwa pori-pori ini diperpanjang melalui ketebalan lapisan. Permukaan pelapis lain lebih seragam, dan tidak ada tanda-tanda yang jelas dari pori-pori yang mungkin berkontribusi terhadap permeabilitasnya (lihat Gambar. 4.18 b, c). (Pori diameter 150 μm diamati pada permukaan pelapis pada Gambar (4.18c), tetapi ini adalah kejadian yang terisolasi).



Gambar 4.17 (a) gambar SEM menunjukkan struktur internal lapisan permeabilitas rendah; ukuran partikel rata-rata = 10–30 μm . (Skala batang dalam gambar ini adalah 100 μm , sementara di (b) dan (c) skala bar adalah 200 μm). (B) SEM gambar yang menunjukkan struktur internal lapisan

permeabilitas menengah; ukuran partikel rata-rata = 20–50 μm . (C) SEM gambar yang menunjukkan struktur internal lapisan permeabilitas tinggi; ukuran partikel rata-rata = 70–100 μm

Gambar 4.19 menunjukkan penampang sampel lapisan (permeabilitas rendah), yang telah hilang dari pola EPS dan memiliki bagian kecil dari pola yang terpasang. Permukaan pola diamati berada dalam kontak yang baik dengan lapisan tahan api, dan bahan pelapis telah menembus celah antara manik-manik EPS terdekat dengan permukaan pola. Ini menghasilkan permukaan pelapisan dengan puncak yang sesuai dengan jarak manik, sering direplikasi pada permukaan casting.

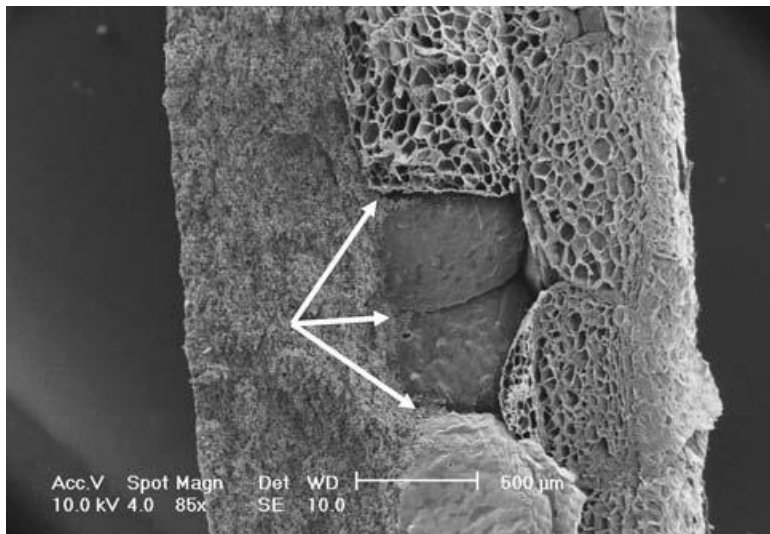


Gambar. 4.18 (a) gambar SEM permukaan pola-ikatan lapisan permeabilitas rendah. Permukaan mengandung banyak pori-pori (berlabel P) dari diameter rata-

rata 30 μm . (B) SEM gambar permukaan polikatan lapisan permeabilitas menengah. Beberapa pori diamati pada permukaan pelapisan. (C) SEM gambar dari permukaan patternbonding lapisan permeabilitas tinggi. P menunjukkan pori yang besar

Ketika sampel-sampel pelapis dipanaskan dari suhu kamar hingga sekitar 700 °C, ruang-ruang di antara partikel-partikel individual tampak meningkat dengan suhu. Sebagai contoh, Gambar (4.20) menunjukkan permukaan potongan sampel lapisan permeabilitas pada suhu sekitar 150 °C (Gambar 7a) dan sekitar 700 °C (Gambar 4.20.b). Lapisan struktur tampaknya telah menjadi lebih terbuka ketika suhu meningkat, tetapi jarak yang diukur antara dua partikel A dan B pada Gambar. (4.20) tidak berubah, menunjukkan perubahan dalam struktur pelapis adalah minimal. Itu disimpulkan bahwa setiap perubahan dalam penampilan mungkin karena pelurusan partikel mika yang telah menjadi terlipat ketika sampel dipotong dari pola, tetapi yang diluruskan setelah pemanasan.

Permeabilitas dijelaskan dalam satuan Darcy, (D), dan 1 Darcy = 10^{-12} m^2 ; Oleh karena itu, dari pengukuran ini, lapisan permeabilitas rendah memiliki permeabilitas sekitar 0,1 D, dan lapisan permeabilitas tinggi sekitar 1 D. Nilai permeabilitas terukur yang diperoleh sedikit lebih besar daripada yang ditemukan oleh peneliti lain, yang dilaporkan sekitar 0,05-0,1 D (Kocan, 1996) dan 1×10^{-10} hingga $1 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$ (atau 0,01-0,01 D) (H. Littleton).



Gambar. 4.19 SEM gambar penampang dari lapisan permeabilitas rendah dengan pola pola EPS terlampir. Panah menunjukkan di mana lapisan telah mengisi rongga di antara manik-manik busa yang bersebelahan

Nilai-nilai yang diukur dari masing-masing lapisan berkorelasi dengan baik dengan munculnya lapisan seperti yang diungkapkan oleh pemeriksaan SEM; nilai permeabilitas terendah adalah untuk lapisan yang mengandung partikel yang lebih kecil, di mana partikel akan berkemas lebih rapat daripada partikel yang lebih besar, memberikan struktur yang memberikan lebih banyak perlawanan terhadap aliran gas.

Permeabilitas setiap lapisan ditemukan menurun ketika ketebalan lapisan meningkat, seperti yang telah diamati sebelumnya oleh Martinez (1990). Ini mungkin terutama disebabkan oleh peningkatan ketebalan, tetapi mungkin juga terkait dengan viskositas sluri pelapis yang berbeda yang digunakan

untuk menghasilkan kisaran ketebalan lapisan. (Hal ini diperlukan untuk mengencerkan sluri pelapis asli dengan air, mengurangi viskositasnya, untuk mendapatkan sampel pelapis yang lebih tipis; akibatnya, distribusi ukuran dan ukuran partikel refraktori yang melekat pada cakram mesh setelah pencelupan mungkin tidak telah konstan.) Pelapisan memiliki struktur yang sama, selaras seperti partikel pelat (lihat Gambar 4.17), tetapi dengan variasi ukuran partikel. Pori-pori yang diamati pada Gambar (4.18) tidak melewati lapisan, dan seharusnya tidak mempengaruhi porositasnya secara besar. Oleh karena itu tampaknya bahwa perubahan ukuran partikel yang cukup besar diperlukan untuk mempengaruhi permeabilitas, dan bahwa mengubah ketebalan lapisan tidak memiliki pengaruh yang besar.

Tabel 2 Estimasi laju aliran gas melalui lapisan pola

Coating permeability	Permeability (m^2)	Gas flow rate through coating ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)	Gas flow rate ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2}$)
Low	1×10^{-13}	663	0.25
High	1×10^{-12}	6,630	2.5

Itu dianggap mungkin bahwa struktur pelapisan mungkin menjadi lebih terbuka, dan karena itu lebih permeabel, karena dipanaskan selama pengisian cetakan. Akibatnya, pengukuran permeabilitas lapisan yang dibuat pada suhu kamar mungkin tidak secara akurat mewakili permeabilitas lapisan dalam cetakan ketika casting benar-benar sedang diisi. Namun, pemeriksaan SEM tahap panas tidak menunjukkan perubahan dalam struktur lapisan yang akan mempengaruhi permeabilitas lapisan, dan karena itu

pengukuran permeabilitas lapisan yang diperoleh pada suhu kamar harus tetap berlaku pada suhu pelapisan pada proses pengecoran.

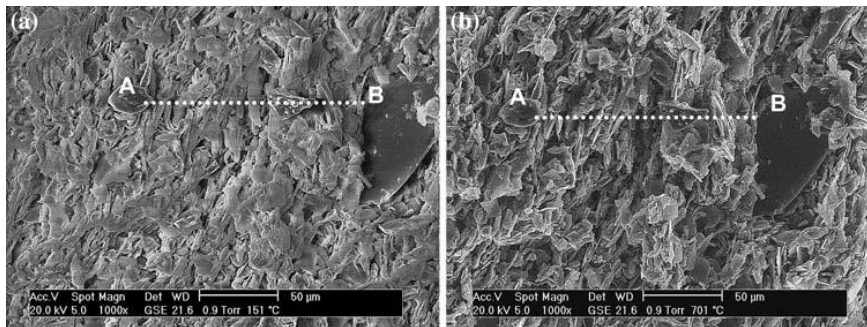


Fig. 4.207 photo SEM lapisan pola pada temperature (a) sekitar 150 C and (b) setelah pemanasan sampai 700 C

Laju aliran gas melalui bahan permeabel dapat dihitung menggunakan Persamaan. 1 dan 2. Secara topologi, pola pelat tipis mirip dengan jenis coran yang sering dihasilkan dalam proses pengecoran Lost Foam, seperti casing untuk komponen; itu berguna untuk mempertimbangkan degradasi pelat tipis EPS untuk menggambarkan peran pelapisan pola dalam proses.

Pola pelat EPS ukuran, panjang = 0,5 m, lebar = 0,25 m dan ketebalan = 0,01 m akan memiliki volume $0,00125 \text{ m}^3$ ($1,250 \text{ cm}^3$) dan luas permukaan $0,265 \text{ m}^2$. Gas yang terkandung dalam pola ini, yang harus melewati lapisan, akan menjadi volume udara ini ditambah volume produk degradasi gas dari pola tersebut. Volume gas berevolusi dari EPS telah ditetapkan menjadi 216 cm^3 gas, untuk 1 g polimer, jika benar-benar diubah menjadi styrene monomer (Shivkumar dan Gallois, 1987). Namun dalam Aluminium cor, jumlah produk degradasi gas yang dihasilkan telah

diperkirakan hanya 6 hingga 30%, sisanya degradasi menjadi cair (Shivkumar dan Gallois, 1987). Kepadatan tipikal untuk pola polistirena (EPS) yang diperluas adalah sekitar 25 kg m^{-3} ($0,025 \text{ g cm}^{-3}$) dan pola persegi panjang yang dipertimbangkan akan memiliki massa 31,25 g. Pelapisannya harus memungkinkan lewatnya gas yang terkandung dalam pola (1.250 cm^3) dan gas berevolusi selama degradasi pola. Dengan asumsi 20% dari massa pola memecah menjadi gas (6,25 g), ini akan memiliki volume $1,350 \text{ cm}^3$, memberikan volume gas total 2.600 cm^3 .

Ketebalan lapisan pola khas akan menjadi sekitar 0,5 mm. Tekanan di dalam pola selama pengisian dengan Al telah diukur menjadi sekitar 200-500 Pa (Yang dkk, 1998). tabel (2) menunjukkan laju aliran gas yang dihitung, untuk lapisan permeabilitas tinggi dan rendah yang diperiksa di sini, dengan asumsi tekanan atmosfer eksternal terhadap pola, tekanan berlebih di dalam pola 500 Pa, dan bahwa gas yang melewati lapisan memiliki viskositas udara (sekitar $4 \times 10^{-5} \text{ Pas}$ pada 700°C). Laju aliran gas per cm^2 akan berkisar dari sekitar $0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ untuk lapisan permeabilitas rendah hingga sekitar $2,5 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ untuk lapisan permeabilitas tinggi.

Tingkat vaporisasi EPS sebesar $0,015 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ telah diperkirakan dari percobaan *casting* (di mana area yang dimaksud adalah area dari pola EPS logam antarmuka) (Shivkumar dan Gallios, 1987). Untuk paduan Aluminium cairan bergerak maju melalui pola pelat yang dijelaskan sebelumnya, dengan kecepatan 1 cm s^{-1} , bagian depan logam akan menyapu melalui volume 25 cm^3 dalam 1 detik, menghasilkan dari busa merendahkan volume 27 cm^3 gas (sekali lagi dengan asumsi 20% dari busa menjadi uap dan 80% menjadi cair). Dengan udara yang dipindahkan ini adalah total 52 cm^3 gas yang dihasilkan setiap detik, yang harus melewati

lapisan. luas lapisan, untuk volume sapuan yang dipertimbangkan, adalah 52 cm^2 , dan oleh karena itu permeabilitas dari pelapisan pola harus seperti memungkinkan 1 cm^3 gas untuk melewati area seluas 1 cm^2 per detik (yaitu $1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), untuk mencegah gas dari degradasi pola dari akumulasi pada antarmuka logam-pola cair.

Pengamatan bahwa laju alir yang diperkirakan melalui lapisan permeabilitas rendah dan tinggi terletak di atas dan di bawah perkiraan laju evolusi gas ini menunjukkan bagaimana permeabilitas pelapis dapat mempengaruhi degradasi pola dan pengisian cetakan.

Dengan lapisan permeabilitas rendah, laju potensial aliran gas melalui lapisan ($\sim 0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) kurang dari perkiraan total laju produksi gas ($\sim 1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Dalam hal ini, gas (produk degradasi uap + udara) akan terakumulasi dalam antarmuka logam-lapisan cair, menyebabkan penurunan laju evolusi uap, karena transfer panas dari logam cair ke EPS merendahkan dikurangi oleh meningkatkan celah antara EPS dan logam cair. Ketika celah antarmuka logam-EPS meningkat, area pelapisan yang lebih besar akan tersedia untuk gas yang terkumpul untuk lolos, dan laju produksi uap akan menurun, kedua efek tersebut mengarah pada pengurangan jarak antara logam cair dan EPS. meningkatkan perpindahan panas dan meningkatkan laju evolusi gas lagi. Fluktuasi transfer perpindahan panas antar muka logam-busa ini disebabkan oleh akumulasi produk degradasi uap yang dapat menyebabkan tidak stabil. memajukan cairan logam depan dan jebakan gelembung gas dan produk degradasi lainnya dalam casting.

Dengan lapisan permeabilitas tinggi, potensi laju aliran gas melalui lapisan lebih besar dari laju produksi gas ($- 2,5 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ dibandingkan dengan $1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Dalam hal ini, pengisian cetakan tidak harus dikontrol oleh keseimbangan antara produksi uap dan pembuangan gas, tetapi oleh faktor lain, mungkin dengan jumlah dan distribusi produk degradasi cair.

Perlu diingat bahwa pertimbangan ini datang dengan menggunakan tingkat vaporisasi, dan perkiraan jumlah produk degradasi gas, yang hanya kira-kira valid untuk proses pengecoran Lost Foam pada umumnya. Pengamatan juga berlaku hanya untuk Aluminium *casting*; pelapis yang digunakan dalam kasus coran besi, misalnya, memiliki permeabilitas yang jauh lebih besar. Lebih detail pemahaman tentang proses akan mengarah pada model yang lebih baik tentang bagaimana permeabilitas lapisan pola harus dikontrol untuk meningkatkan proses pengecoran.

Dapat disimpulkan bahwa Permeabilitas lapisan khas yang digunakan dalam proses Lost Foam untuk casting Aluminium paduan telah diukur dan ditemukan bervariasi dari sekitar 0,1 Darcy, ($10\text{-}13 \text{ m}^2$), untuk lapisan permeabilitas rendah, hingga sekitar 1 Darcy ($10\text{-}12 \text{ m}^2$), untuk lapisan permeabilitas tinggi.

Pemeriksaan struktur pelapisan dalam Felix-SEM panas tidak menunjukkan perubahan dalam struktur yang akan mempengaruhi permeabilitas, pada suhu hingga 700°C . Oleh karena itu pengukuran permeabilitas lapisan pada suhu kamar harus valid pada suhu yang dicapai dalam proses pengecoran.

Pertimbangan laju degradasi pola polistirena yang diperluas, dan proporsi produk degradasi yang membentuk uap, disarankan bahwa pelapisan pola permeabilitas rendah mungkin tidak cukup permeabel untuk memungkinkan lewatnya produk

degradasi gas pada tingkat yang lebih besar daripada yang dihasilkan. Ini akan menyebabkan akumulasi gas dalam antarmuka pola logam-busa cair yang pada gilirannya dapat mempengaruhi laju degradasi pola.

BAB V

PEMBUATAN POLA EPS DAN PERANGKAIAN

Pembuatan pola cetakan EPS dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu dengan cara sederhana dan dengan teknologi yang maju. Pembuatan pola cetakan EPS dengan teknologi sederhana yaitu dengan memotong lembaran Styrofoam dengan pemotong kawat tembaga yang dipanaskan sedangkan pembuatan pola cetakan EPS dengan teknologi yang lebih maju yaitu mencetak pola langsung dengan polystyrene.

5.1. Pembuatan Pola Sederhana

Pembuatan pola bisa dilakukan dengan teknik sederhana yaitu dengan memotong polystyrene dengan pemotong listrik dan beberapa peralatan pendukung lainnya. Alat yang Digunakan untuk Membuat Pola Cetak adalah sebagai berikut:

1. Pemotong Styrofoam elektrik.
2. Lem Styrofoam digunakan untuk merangkai potongan-potongan pola.
3. Mistar penggaris.
4. Spidol.
5. Kertas, digunakan untuk membentuk mal.
6. Silet.

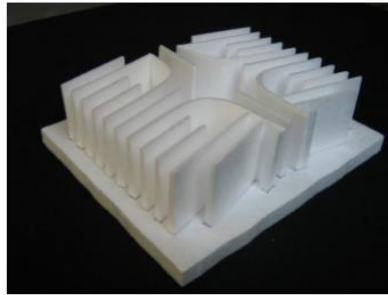
7. Jarum.
8. Adaptor.

Langkah-langkah yang dilakukan adalah dengan cara menggambar pola didalam kertas lalu tempelkan dipermukaan Styrofoam/gabus. Selanjutnya Contoh pola yang dibuat dengan teknik sederhana dengan pemotong Styrofoam sebagaimana terlihat pada gambar 1



Gambar 5.1 alat potong Styrofoam

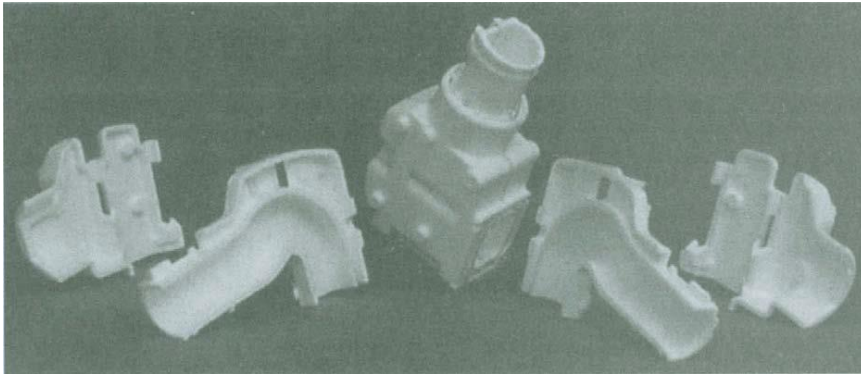
Pola yang sudah dipotong selanjutnya dirangkai menjadi satu kesatuan dengan menggunakan lem styrofoam. Kadang-kadang untuk benda-benda yang rumit pola benda cor dirangkai dengan saluran tuang.



Gambar 5.2 pola EPS

5.2. Penyatuan Pola LFC

Bila memungkinkan, pola dicetak dalam satu bagian dengan menggunakan teknik yang dikembangkan untuk cetakan injeksi plastik seperti logam 'pull-back' dan inti/core yang bisa dilipat, tapi banyak bentuk kompleks yang dibutuhkan untuk membuat tuangan tidak bisa dicetak dalam satu bagian. Bagian pola disatukan dengan cepat dan tepat menggunakan perekat cair yang panas menggunakan lem khusus (Gambar 5.3). Perekat itu direproduksi dalam casting jadi jadi penting untuk meletakkan sejumlah lem yang terkontrol agar tidak lunak.



Gambar 5.3 bagian dari pola yang disatukan untuk membentuk pola yang rumit

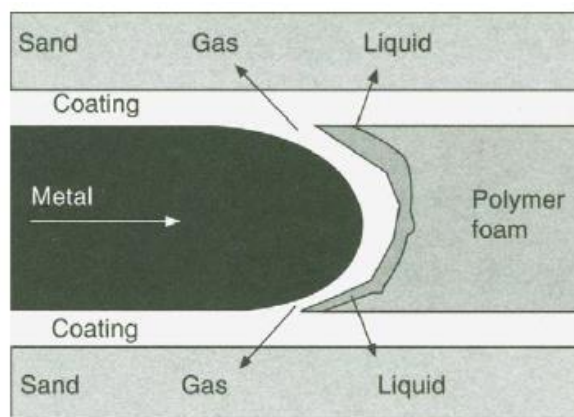
5.3. Perangkaian

Beberapa benda tuangan yang besar dibuat, pola EPS melekat pada saluran turun EPS atau, dalam kasus tertentu penuangan besi, biasanya berongga dengan serat keramik tahan api. Coran yang lebih kecil dibuat berkelompok, pola disatukan di sekitar sprue dengan ingate bertindak juga sebagai pendukung untuk cluster.

5.4. Mekanisme dari Pembentukan Benda Cor

Bila logam dengan titik cair yang rendah seperti paduan aluminium dituangkan ke dalam busa EPS, logam cair bergerak dan merusak polistiren menjadi polimer dengan berat molekul rendah dan monomer. Residu ini kemudian diangkut melalui lapisan baik sebagai cairan dan gas ke dalam pasir. Proses ini diilustrasikan pada gambar (5-4). Kegagalan untuk menghapus residu gas dengan cepat menghasilkan pengisian logam cair yang

lambat dan coran yang salah arah (misrun casting). Gambar 5-5. Jika gas keluar terlalu cepat, bagaimanapun, maka logam tersebut akan mengisi rongga dengan cara turbulen yang tidak terkontrol sehingga menimbulkan cacat pada oksida tipis dan bahkan akan meruntuhkan cetakan (gambar 5.6). Jika residu cairan tidak diserap oleh lapisan, sebuah film karbon tipis dapat terbentuk di bagian depan logam cair yang terjebak, dapat menyebabkan cacat lipatan (fold defect) (gambar 15-7)



Gambar 5.4 Ilustrasi transport gas dan sisa cairan polimer

Saat besi dituangkan dengan suhu yang lebih tinggi menyebabkan logam cair jatuh lebih cepat mengenai pola EPS menyebabkan terbentuknya banyak gas. pemberian tekanan Vakum dapat diaplikasikan pada kotak pasir untuk membantu pembuangan gas. Pirolisa suhu tinggi dari pola EPS menghasilkan produk seberat seperti tar yang tidak selalu bisa lepas dari cetakan. Mereka jatuh lebih jauh ke bentuk karbon yang disebut karbon

berkilau yang menyebabkan cacat yang ditandai dengan pitting dan kerutan pada permukaan atas coran.



Gambar 5.5 cacat salah alir disebabkan dari penggunaan lapisan yang kurang



Gambar 5-6 cacat lipatan dingin (pada aluminium) disebabkan oleh residu cairan yang buruk

BAB VI

SUHU TUANG

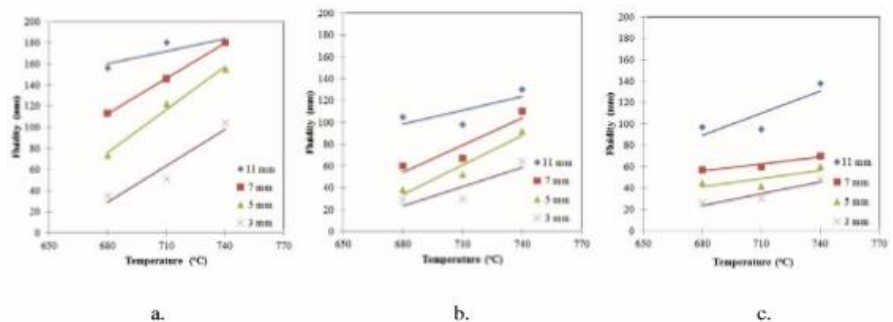
6.1. Pengaruh Suhu Tuang

Suhu penuangan pada proses pengecoran aluminium paduan merupakan hal yang perlu diperhatikan dimana suhu penuangan dengan metode LFC sangat mempengaruhi sifat mampu alir (*fluidity*), jumlah porositas yang terbentuk pada hasil coran, peningkatan kandungan hydrogen pada logam cair, serta mempengaruhi sifat mekanis hasil coran seperti kekerasan, kekuatan tarik dan beberapa sifat mekanis lainnya.

Suhu penuangan logam cair sangat mempengaruhi sifat mampu alir/fluiditas untuk membentuk benda cor yang tipis. Pengaruh suhu penuangan pada sifat mampu alir/fluiditas logam cair paduan AA356.1 diamati oleh (Suyitno dan Karim, 2012) pada suhu penuangan 680, 710 dan 740 °C dengan kerapatan busa EPS yang divariasikan yaitu 7, 18 dan 20 kg/ m³. Meningkatkan suhu penuangan untuk semua kerapatan EPS. Fluida meningkat dengan meningkatnya suhu penuangan dan meningkatkan ketebalan busa EPS (Gambar 6.1). Suhu penuangan mempengaruhi fluiditas di mana suhu penuangan yang lebih tinggi, semakin lama pembekuan menyebabkan fluiditas lebih lama.

Fluiditas mencapai maksimum pada suhu penuangan yang tinggi, karena logam cair memiliki viskositas dan tegangan

permukaan berkurang dengan meningkatnya suhu pengecoran (Campbel, 2003). Kondisi ini menyebabkan kenaikan kecepatan pengisian logam cair.



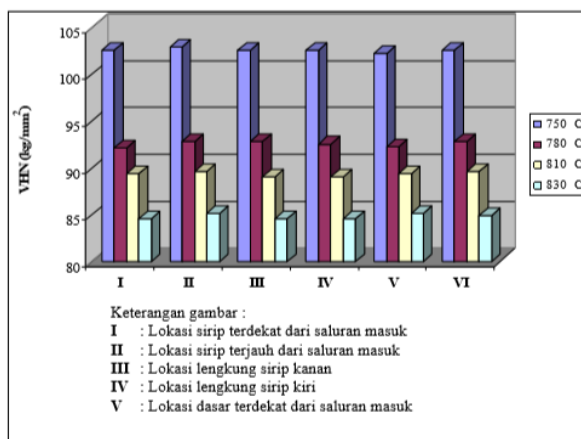
Gambar 6.1. panjang fluiditas untuk 4 ketebalan dengan variasi densitas pola EPS (7, 18 dan 20 kg/m³)

Suhu penuangan paduan Aluminium silikon yang lebih tinggi akan meningkatkan kekasaran permukaan benda cor. Suhu superheat (suhu diatas temperatur cair) yang lebih tinggi akan menurunkan tegangan permukaan cairan logam. Hal ini akan menjadikan cairan logam mudah terserap ke celah-celah diantara pasir yang menyebabkan kekasaran benda cor meningkat (Kumar dkk, 2007). Temperatur tuang memiliki faktor dominan dalam menentukan nilai tegangan tarik dan elongasi benda cor (Kumar dkk, 2008). Kecepatan penuangan logam cair memiliki pengaruh besar terhadap kualitas benda cor. Kecepatan penuangan aluminium cair berkisar 0,015-0,02 m/s untuk mendapatkan jumlah dan jenis cacat pada benda cor yang minimal (Bates dkk, 2001).

Kecepatan pengisian logam dan keluarnya hasil dekomposisi polystyrene foam tergantung pada banyak faktor diantaranya massa jenis busa (*foam*), ikatan foam, ketebalan *coating*,

temperatur logam dan kecepatan bagian depan logam cair (Bates dkk, 1995). Kecepatan aliran logam meningkat dengan bertambahnya temperatur tuang.

Selain mempengaruhi fluiditas dan kekasaran permukaan benda cor, suhu tuang juga akan mempengaruhi nilai kekerasan benda cor. Meningkatnya temperature tuang pada paduan aluminium Al-Si menurunkan nilai kekerasan Vickers benda cor sebagaimana yang dilaporkan (Aji dkk, 2006). Dari gambar 6.2 memperlihatkan bahwa dari hasil pengujian kekerasan dengan metode Vickers menunjukkan nilai kekerasan yang terus menurun seiring bertambahnya temperature tuang hal ini disebabkan karena dipengaruhi kecepatan pendinginan dari logam cair sehingga akan mempengaruhi dari ukuran partikel silicon yang terbentuk sehingga hal ini mempengaruhi nilai kekerasan benda cor.



Gambar 6.2 hubungan kekerasan Vickers benda cor pada beberapa suhu tuang

Shin, S. R., and Lee, Z. H., 2004. Hydrogen Gas Pick-Up of Alloy Melt During Lost Foam Casting . Journal Of Material Science Vol. 39 1536-1569.

Campbell, J., 2003, Casting 2nd Edition . Butterworth-Heinemann. pp. 74

BAB VII

PENGUJIAN FLUIDITAS (FLUIDITY TEST)

7.1. Pengertian Fluiditas (mampu alir)

Fluiditas adalah kemampuan logam cair mengalir dalam cetakan sampai berhentinya pembekuan (Campbell dan Harding, 1994) dan (Flemings, 1974). Suatu aliran logam cair akan berhenti mengalir akibat terjadinya proses pembekuan dendrit yang tebal pada bagian ujung aliran sehingga menghambat aliran logam cair dibelakangnya (Flemings, 1974 dan JIS Handbook, 1977).

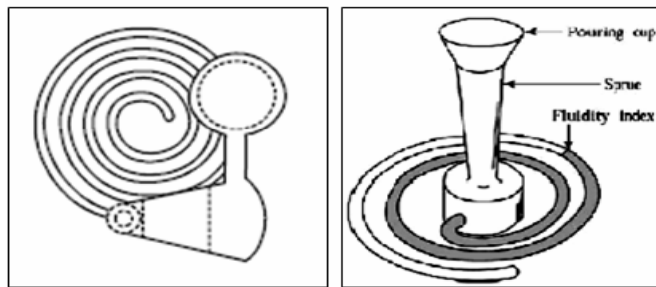
Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai fluiditas adalah temperatur (derajat superheat), komposisi kimia, tegangan permukaan, konduktifitas material cetakan, inklusi dan viskositas (Flemings, 1974 dan ASM Specialty Handbook Aluminum, 1993). Variabel pengujian seperti diameter saluran juga mempengaruhi sifat fluiditas (Flemings, 1974).

7.2. Metode pengujian fluiditas

Ada beberapa metode yang digunakan untuk menguji sifat mampu alir (fluidity) logam cair memasuki rongga cetakan, adapun beberapa metode ini antara lain:

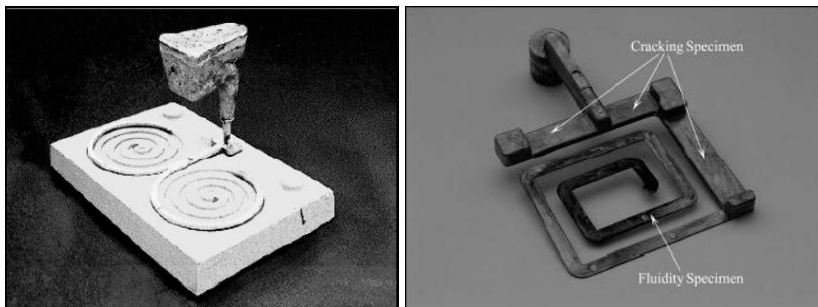
1. Metode spiral

Metode spiral adalah metode yang paling sederhana. Metode spiral ini umum digunakan pada uji fluiditas paduan aluminium, dimana cetakan (*dies*) terbuat dari baja, kemudian aluminium cair dituang menggunakan ladle. Hasil pengujian terlihat seperti ditunjukkan pada (gambar 7.1):



Gambar 7.1 Metode Spiral

Dengan metode spiral, parameter-parameter yang sangat penting dalam menentukan fluiditas tidak dapat terkontrol dengan baik, diantaranya terjadi penurunan temperatur logam cair pada saat pengambilan menggunakan ladle dari dapur peleburan sampai dengan ke cetakan. Kecepatan aliran logam cair pada saat dimasukkan kedalam cetakan tidak konstan tergantung dari operator, dan penuangan menggunakan ladle dapat menyebabkan inklusi oksida (*oxide inclusion*), yaitu terkontaminasinya logam cair dengan oksida. Metode spiral yang lain adalah metode double spiral dan metode kotak seperti terlihat pada gambar:

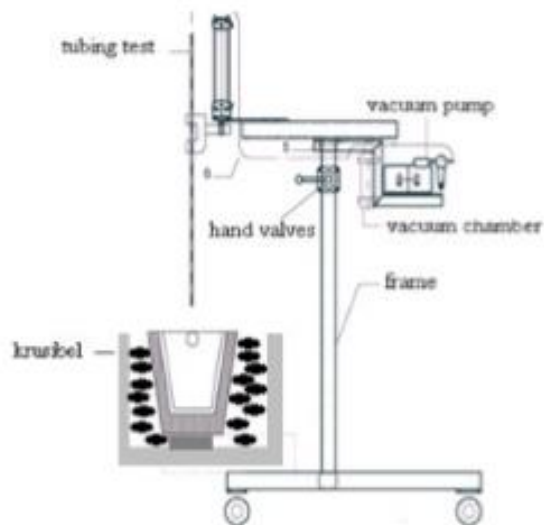


Gambar 7.2 Metode Double spiral dan spiral kotak

2. Metode vakum

Metode vakum dikembangkan untuk mengurangi kondisi yang berfluktuasi pada saat proses penuangan logam cair seperti yang terjadi pada metode spiral. Dalam alat ini logam cair mengalir melalui sebuah saluran yang terbuat dari tembaga, stainless steel, atau pyrex yang tertarik karena tekanan vakum. Teknik ini mendekati ideal dalam mengurangi variabel cetakan, termasuk ketepatan temperatur saat pengujian karena tidak menggunakan ladel.

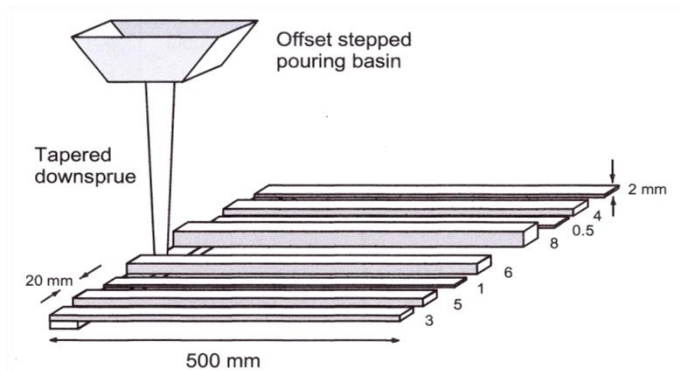
Pengujian fluiditas menggunakan metode vacuum suction untuk mendapatkan nilai mampu alir (fluidity) yang sesungguhnya dari logam cair dan menghilangkan faktor kesalahan akibat tekanan udara dari luar. Pengujian fluiditas dengan metode vakum ini menggunakan tekanan vakum untuk mengukur nilai mampu alir logam cair dimana logam cair tersebut akan mengalir didalam copper tube dengan panjang tertentu yang merupakan nilai fluiditasnya.



Gambar 7.3 alat uji fluiditas vacuum suction (Bambang suharno dkk, 2007)

3. Metode Birmingham

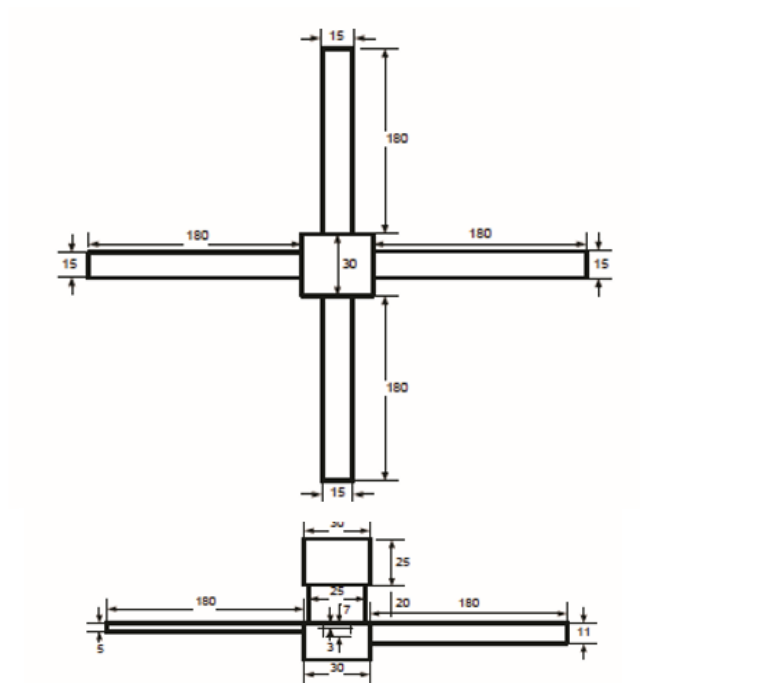
Gambar 7.4 menunjukkan jenis pengujian fluiditas yang dikembangkan oleh Universitas Birmingham, UK. Pada pengujian ini data yang didapat tidak hanya panjang fluiditas melainkan juga efek dimensi rongga cetakan yang akan dilalui oleh logam cair melalui proses penuangan (Campbell dan Harding, 1994).



Gambar 7.4 Metode Fluiditas Birmingham (Campbell, 2000)

7.3. Metode beda ketebalan

Metode beda ketebalan pola EPS digunakan beberapa peneliti untuk menguji kemampuan alir dari logam cair dengan menggunakan cetakan styrofoam. Pola styrofoam dibentuk dengan ketebalan divariasikan sedangkan panjang pola dibuat seragam. Kemampuan dari logam cair membentuk pola styrofoam sehingga menjadi benda tuangan yang utuh merupakan parameter yang diamati.



Gambar 7.4 Pola EPS untuk uji Fluiditas (Suyitno dan Karim, 2012)

BAB VIII

PENGARUH KETEBALAN DAN PENGGETARAN PASIR

8.1. Ketebalan Benda Cor

Bentuk yang rumit dan tebal benda cor tipis dari paduan aluminium silikon sangat luas digunakan untuk pembuatan komponen pesawat dan komponen otomotif karena mempunyai sifat mampu cor yang baik (castability), mampu las, ketahanan korosi dan kekuatan yang tinggi sama baiknya dengan rasio berat yang sama (Marzouk dkk, 2014). Umumnya pengecoran die casting, cetakan permanen, cetakan pasir dan lost foam casting (LFC) digunakan untuk memproduksi produk yang presisi dari aluminium paduan (Chiang dkk, 2009). Bagaimanapun komponen biasanya komponen berisi sejumlah gas porositas dengan kecepatan yang tinggi dari logam cair. Sebagai hasilnya perlakuan panas dari komponen tidak mungkin terbentuk cacat melepuh pada permukaan coran.

Sementara itu metode cetakan permanen biasanya sangat sulit memproduksi coran dengan dinding tipis karena laju pendinginan dari logam cair. Sedangkan metode cetakan pasir tidak mudah mendapatkan akurasi dimensi dan permukaan akhir yang membutuhkan presisi yang tinggi (Geffroy, 2006; Barone dkk, 2005). Bagaimanapun dekomposisi dari pola foam selama

penuangan mungkin menghasilkan gas porosity dan slag inklusi (Kannan dkk, 2007; Griffit dkk, 2012), dan temperature tuang lebih tinggi dari pengecoran tradisional untuk mengatasi penyerapan panas (*heat absorption*) dari dekomposisi dari pola gabus (*foam*). Lebih lanjut laju pendinginan dari logam cair yang lambat disebabkan karena mengadopsi dari pasir silica yang kering, menghasilkan kekasaran butir-butir, lebih serius cacat porositas dan merusak/poorer sifat mekanis.

Beberapa komponen mesin dibuat dengan teknik pengecoran LFC dimana kadang-kadang benda tuang tidak seragam ketebalannya antara satu daerah dengan daerah lainnya sehingga perlu diuji apakah nilai kekerasannya juga seragam. Kadang kala antara bagian satu dengan bagian yang lain dimana ketebalan yang berbeda tadi juga mempunyai kerasan yang tidak seragam, oleh karena itu perlu dilakukan suatu proses untuk menseragamkan kekerasannya.

Sebagaimana lazimnya pada benda tuang yang lebih tipis proses pendinginan logam cair berjalan secara cepat karena kontak antara permukaan logam cair dengan pasir menyebabkan turunnya temperature logam cair secara cepat. Ketebalan benda tuang mempengaruhi ukuran Scondary Dendrite Arm Spacing (SDAS) hal ini tentunya dipengaruhi oleh kecepatan pendinginan dari logam cair. sifat mekanis yaitu nilai kekerasan.

8.2. Penggetaran Pasir Silika

Pasir silica digunakan untuk menimbun pola lost foam dimana pasir silica pada praktiknya kadang-kadang mempunyai ukuran yang berbeda-beda. Untuk mengisi rongga-rongga antara

pasir diperlukan proses pengguncangan dimana bertujuan agar rongga-rongga yang masih kosong agar sepenuhnya terisi sehingga tidak banyak celah antara permukaan pola dengan pasir silica.

Proses penggetaran pasir ini biasa menggunakan motor listrik dimana diatur amplitudonya guna mendapatkan efek yang paling baik terhadap permukaan hasil coran. Selain itu lama waktu penggetaran juga akan mempengaruhi dari hasil benda cor yang dibuat. Adapun skema pengujian penggetaran pasir sebagaimana terlihat pada gambar 8.1 dibawah:

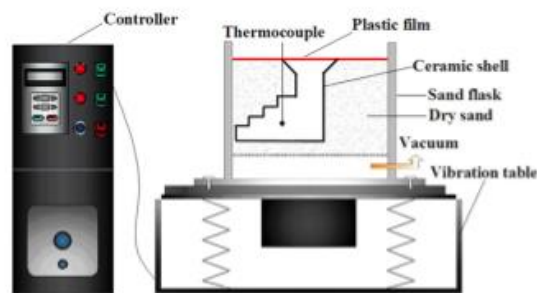


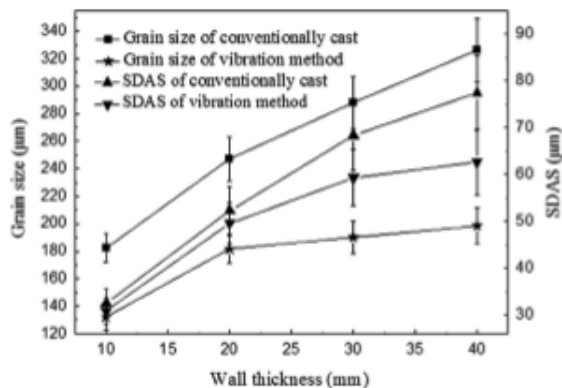
Fig. 2. Schematic illustration of experimental apparatus for the mechanical vibration during the expendable pattern shell casting process.

Gambar 8.1 skema dari eksperimen vibarasi mekanis pasir silica

Gambar 8.2 menunjukkan hubungan antara ketebalan pola EPS terhadap ukuran butir dan SDAS dari Aluminium Paduan Al-Si-Mg (A356) yang dicor menggunakan metode LFC. Ukuran butir dan SDAS menurun seiring dengan berkurangnya ketebalan dari pola EPS baik untuk pasir dengan penggetaran maupun tanpa digetarkan. Proses penggetaran pasir silica biasanya akan mempengaruhi dari ukuran SDAS dan ukuran butir dari coran yang dihasilkan. Pengamatan ini bisa dilakukan secara kualitatif

dengan menggunakan mikroskop optic dan diukur rerata untuk luasan tertentu.

Jika dihubungkan antara ketebalan benda cor dan pengaruh penggetaran terhadap ukuran butir serta ukuran SDAS pada aluminium maka akan terjadi perbedaan yang cukup mencolok dimana komponen yang diperoleh tanpa penggetaran pasir (cara konvensional) dimana dengan peningkatan ketebalan dinding komponen terjadi peningkatan tajam dalam ukuran butir dan SDAS. Bila dibandingkan komponen yang dibuat dengan cara konvensional dengan ketebalan dinding yang sama, ukuran butiran dan SDAS dari sampel yang diperoleh dengan getaran menurun secara signifikan sebagaimana terlihat pada gambar 8.2 (Jiang dkk, 2014)



Gambar 8.2 Efek dari getaran mekanis dan tebal dinding terhadap ukuran butir dan SDAS

Pada Tabel 8.1 dibawah menunjukkan efek getaran mekanis dan ketebalan dinding pada sifat mekanik paduan aluminium A356. Seperti dapat dilihat, untuk sampel yang diperoleh dari hasil coran konvensional, sifat mekanik termasuk kekuatan tarik,

kekuatan luluh, elongasi dan kekerasan pada kondisi setelah dicor dan setelah dilakukan proses perlakuan panas T6 secara bertahap menurun seiring dengan kenaikan ketebalan dinding. Hal ini dapat dijelaskan oleh fakta bahwa ketebalan dinding yang lebih besar mendorong struktur mikro yang lebih kasar. Hubungan Hall-Petch diberikan sebagai berikut (Dieter, 1986). Hubungan antara kekuatan tarik dan ukuran butir menurut Hall-Petch sebagaimana berikut:

$$T_s = T_o \times k \cdot d^{1/2}$$

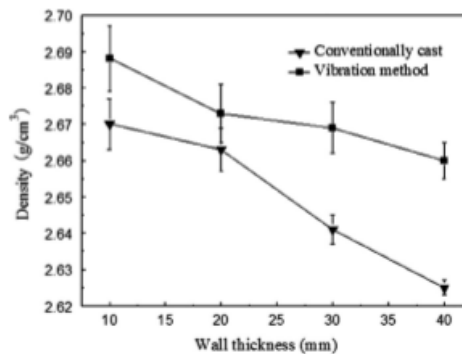
Dimana T_s adalah kekuatan yield, T_o adalah Tekanan gesekan kisi dari gerakan dislokasi, k adalah koefisien peningkatan dan d adalah rata-rata ukuran butir. Harga T_o dan k tergantung dari komposisi dari paduan.

Tabel 8.1 efek getaran mekanis dan tebal pola pada sifat mekanis paduan aluminium A356

Process	Wall thickness (mm)	As-cast				T6			
		Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HBS)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HBS)
Conventionally cast	10	154.4 ± 7.7	100.0 ± 6.0	2.8 ± 0.43	56.4 ± 2.7	227.8 ± 10.9	217.3 ± 10.1	2.93 ± 0.46	81.4 ± 5.6
	20	142.3 ± 7.2	99.9 ± 5.9	2.62 ± 0.35	55.8 ± 2.2	168.4 ± 8.3	140.7 ± 7	2.71 ± 0.42	69.3 ± 4.5
	30	113.1 ± 5.9	99.0 ± 5.8	2.43 ± 0.31	54.5 ± 2	156.4 ± 7.6	131.2 ± 6.3	2.52 ± 0.4	68.6 ± 4.3
	40	100.6 ± 5.3	91.5 ± 5.5	2.01 ± 0.22	53.4 ± 1.8	148.2 ± 7.3	127.2 ± 6	2.1 ± 0.38	67 ± 4.1
Vibration method	10	172.6 ± 9.2	124.0 ± 7.7	3.8 ± 0.65	59.6 ± 4.2	245.9 ± 11.2	223.8 ± 10.2	4.98 ± 0.79	90.4 ± 6.3
	20	157.3 ± 8.1	115.1 ± 6.6	3.45 ± 0.55	58.5 ± 4.1	217.5 ± 10	203.2 ± 9.7	3.85 ± 0.7	87.8 ± 5.2
	30	142.2 ± 7.1	113.2 ± 6.5	3.3 ± 0.51	58.3 ± 4	205.2 ± 9.8	193.6 ± 9.1	3.54 ± 0.65	87.0 ± 5.1
	40	135.9 ± 6.7	110.4 ± 6.1	3.21 ± 0.5	58 ± 3.8	200.8 ± 9.5	180.8 ± 8.8	3.42 ± 0.54	86.4 ± 4.6

Sumber: Jiang dkk (2014)

Densitas benda cor juga dipengaruhi getaran mekanis yang diberikan pada pasir silica yang digunakan pada proses LFC. Penggetaran terhadap pasir silica akan berdampak pada peningkatan densitas pada benda cor untuk masing-masing ketebalan cor yang berbeda sebagaimana ditunjukkan pada gambar dibawah..



Gambar efek getaran mekanis dan tebal benda cor terhadap densitas paduan A356

Lebih lanjut efek penggetaran pada pasir juga memungkinkan mengurangi jumlah persentase porositas yang terjadi pada benda cor sehingga hal ini juga akan mempengaruhi densitas benda cor akhir. Untuk benda cor yang lebih tebal efek penggetaran ini sangat berdampak cukup signifikan untuk mengeleminir persentase porositas yang terbentuk pada benda cor bila dibanding benda cor yang lebih tipis (gambar)

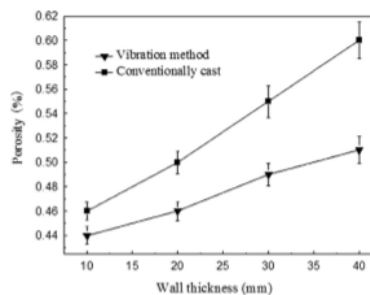
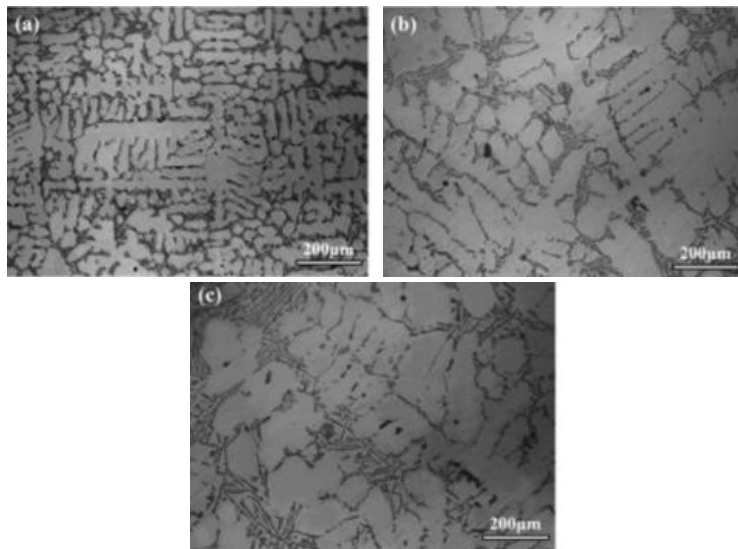


Fig. 12. Effect of mechanical vibration and wall thickness on porosity of A356 aluminum alloy.

Gambar efek getaran mekanis dan tebal benda cor pada porositas

Ketebalan benda cor sangat mempengaruhi laju pendinginan dari logam cair hal ini terlihat sekali dimana semakin tipis ukuran benda maka diikuti pula dengan menurunnya ukuran Secondary dendrite arm spacing (SDAS). Dendrite tumbuh dan berkembang kesegala arah dengan ukuran dendrite yang terbentuk yang hampir seragam. Kecepatan pendinginan ini dipengaruhi oleh ketebalan benda cor sehingga hal ini juga akan mempengaruhi ukuran dendrite. Partikel silicon yang dihasilkan juga terpengaruh ukuran benda cor dimana terlihat pada gambar 8.3 ukuran partikel silicon terlihat lebih besar pada ukuran benda cor yang lebih tebal.

Pada proses pengecoran dengan metode LFC proses pendinginan sedikit lambat dibanding dengan proses pengecoran lainnya sehingga hal ini juga mempengaruhi dari ukuran SDAS dan butir akhir benda cor paduan Aluminium yang diamati dengan mikroskop optic dengan pembesaran yang sama (gambar 8.3).

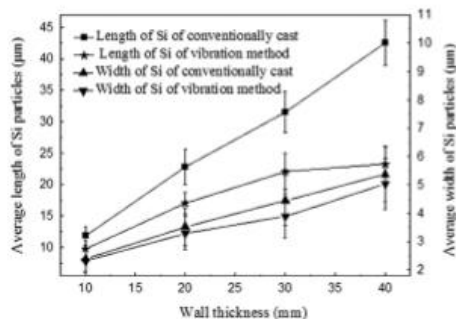


Gambar 8.3 photo mikrostruktur ketebalan benda a) 10 mm, b) 20 mm dan c) 30 mm (tanpa penggetaran pasir) (Jiang dkk, 2014)

Menunjukkan mikrostruktur optik dari sampel paduan aluminium as-cast A356 dengan ketebalan dinding yang berbeda yang diperoleh dari metode cor dan getaran konvensional selama proses pengecoran. Dalam mikrostruktur yang diperoleh dari pengecoran tanpa penggetaran/konvensional, terbukti bahwa dendrit khas fasa primer α -Al diamati, dan distribusi alfa primer pada distribusi tidak seragam, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.3 Sementara itu, fasa utama α -Al berubah dari dendrit halus menjadi dendrit kasar dengan ketebalan dinding meningkat. Sebaliknya, dalam mikrostruktur yang diperoleh dari metode getaran, jelas bahwa ukuran butir fasa primer alfa jauh lebih baik daripada sampel yang diperoleh dari proses konvensional dengan ketebalan dinding yang sama, dan dendrit kasar hilang, dan

mikrostruktur terutama terdiri dari butir yang memiliki bentuk equiaxed dengan distribusi seragam, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.3 Selanjutnya, dengan bertambahnya ketebalan dinding, butir-butir equiaxed secara bertahap meningkat.

Selain mempengaruhi ukuran butir dan SDAS pengaruh ketebalan pola EPS dan penggetaran pasir silica juga mempengaruhi panjang dan lebar partikel silicon yang terbentuk. Meningkatnya ketebalan pola EPS menyebabkan bertambahnya ukuran panjang serta lebar dari partikel silicon yang dihasilkan pada benda cor sebagaimana terlihat pada (gambar 8.2)



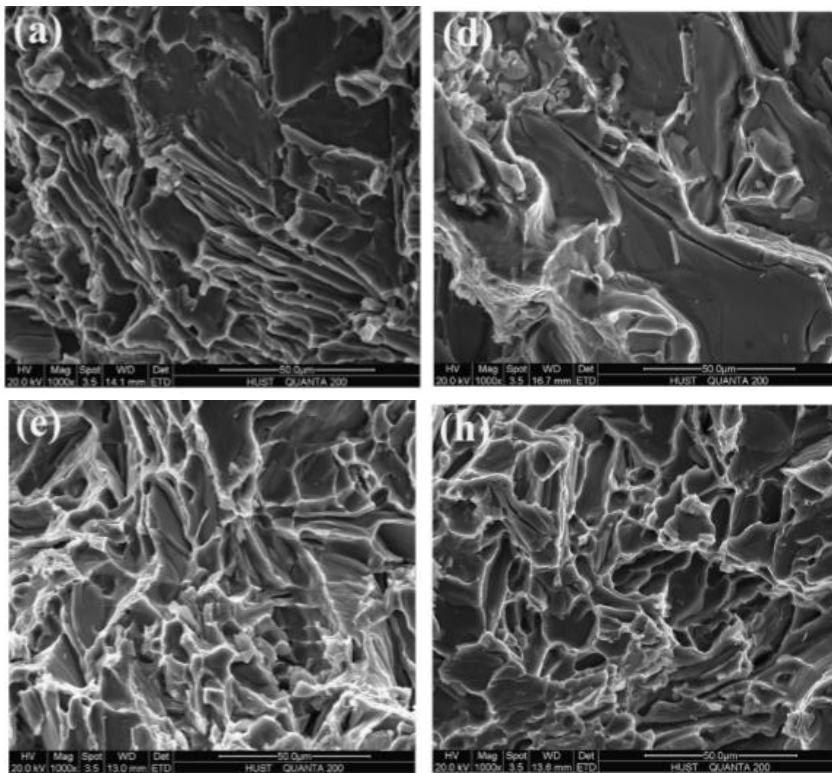
Gambar 8.2 efek penggetaran dan tebal pola terhadap panjang dan lebar partikel Si

Dengan bertambahnya tebal benda cor mikrostruktur dari benda cor tanpa penggetaran dimana butir $\alpha\text{-Al}$ primer dan partikel eutectic silicon berevolusi dari denrit halus ke denrite kasar dan dari struktur berserabut halus menjadi struktur silicon berbentuk plate-like kasar. Ketika getaran mekanis diberikan denrite kasar bertransformasi menjadi halus dan butir menjadi

bentuk equiaxed yang seragam dan ukuran, morfologi dan distribusi dari fase α -Al primer dan partikel eutektik silicon serta SDAS ditingkatkan secara signifikan, dan derajat penghalusan butir bertambah dengan bertambahnya tebal benda cor.

Sifat mekanis dari paduan aluminium A356 yang didapatkan dengan tanpa getaran terus berkurang dengan bertambahnya ketebalan benda cor. Getaran mekanis meningkatkan sifat mekanis bertambah sangat besar dan densitas dari aluminium alloy A356 terutama ketebalan dinding yang lebih besar.

Permukaan patah paduan aluminium A356 yang didapatkan dari proses tanpa penggetaran menunjukkan patah getas natural dimana patahannya memotong batas butir (transgranular fracture) dengan mikrostruktur kasar. Aluminium paduan A356 yang dihasilkan dengan proses penggetaran menunjukkan dengan jelas morfologi bentuk patahan cekungan dengan patahan mengikuti batas butir (intergranular) karena signifikan memperbaiki mikrostruktur sebagaimana ditunjukkan pada gambar dibawah.



Gambar photo SEM daerah patah uji tarik (a dan b) tanpa getaran dan (e, h) dengan penggetaran

Hasil pengecoran tanpa vibrasi pasir terutama dengan dinding dengan ketebalan yang lebih besar terlihat bidang patahan terlihat jelas bersifat jenis patah rapuh (brittle). Hal ini dapat dijelaskan dimana dengan pengecoran konvensional didapat struktur SDAS yang besar dan partikel silicon yang memanjang, patahan partikel silicon yang memanjang lebih sering menjadi sebagai sumber dari konsentrasi tegangan dari pada partikel yang spherical (bulat) (Wang dkk, 2003). Karena eutektik silicon yang

besar dan gugus sepanjang kedua sel dendrite berjalan mirip butir dan interaksi yang kuat antara partikel dan menghasilkan pita slip pada sel butir selama proses deformasi plastis.

8.3. Cara mengukur butir dan SDAS

Sampel untuk pengujian metalografi di etsa menggunakan 0.5% hydrofluoric acid setelah dilakukan proses polishing. Pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik. Rata-rata panjang secondary dendrite arm spacing (SDAS) dari partikel silikon begitu juga lebar partikel eutectic silikon diukur menggunakan alat metallographic analysis software. (Jiang dkk, 2014; Lu dkk, 2013)

Sampel untuk pengamatan metalografi dimana di etsa menggunakan 0,5% hydrofluoric acid setelah polishing dan posisi sampel. Mikrostruktur dimana diamati menggunakan mikroskop metalografi. Panjang rata-rata The secondary dendrite arm spacing (SDAS) dari partikel silikon maupun rata-rata lebar dari eutektik silikon dimana diukur menggunakan alat software metallographic analysis. SDAS diukur dari rata-rata jarak antara cabang samping yang berdekatan diatas bagian longitudinal dari *primary arm*.

Aspek rasio dari partikel eutektik silikon membawa sebagai rasio dari rata-rata panjang dari partikel silikon untuk rata-rata lebar dari partikel silikon.

Ukuran butir dan faktor bentuk dari phase α -Al primer dimana didefinisikan mengikuti persamaan (Jiang dkk, 2014; Lu dkk, 2013):

$$D = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$F = \frac{4\pi A}{p^2}$$

Dimana A dan P adalah rata-rata area dan rerata perimeter dari butir α -Al yang terlihat. Pertama sekali nilai A dan P dari setiap butir diukur mengikuti butir menggunakan software . Selanjutnya nilai rerata dari A dan P dari butir yang diukur yang didapat. Kemudian ukuran butir D dan faktor bentuk F dihitung mengikuti substitusi ke nilai rerata A dan P kedalam pers (1) dan (2). Nilai F dari 0 ke 1 sebagai faktor bentuk dari butir α -Al mendekati lingkaran saat mendekati 1.

8.4. Pengukuran Persentase Porositas Benda Cor

Pengukuran porositas dapat menggunakan software analysis a JX-2000. Densitas dari benda cor dapat diukur dengan menggunakan prinsip Archimedes dimana dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\rho = \frac{W_{\text{air}} \rho_w}{W_1 - W_2}$$

dimana ρ adalah densitas dari benda cor, W_{air} adalah massa benda cor didalam atmosphere, W_1 adalah massa benda cor, bejana dan air, W_2 adalah massa dari bejana dan air, dan ρ_w adalah densitas dari air.

Literatur

M. Marzouk, M. Jain, S. Shankar, Mater. Sci. Eng. A 598 (2014) 277–287. [2] B. Zhang, D.M. Maijer, S.L. Cockcroft, Mater. Sci. Eng. A 464 (2007) 295–305. [3] M. Sha, S.S. Wu, L. Wan, S.L. Lü, Metall. Mater. Trans. A 44 (2013) 5642–5652. [4] O.

- ElSebaie, A.M. Samuel, F.H. Samuel, H.W. Doty, *Mater. Sci. Eng. A* 480 (2008) 342–355.
- K.T. Chiang, N.M. Liu, T.C. Tsai, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 41 (2009) 283–292.
- P.M. Geffroy, M. Lakehal, J. Goni, E. Beaunon, J.M. Heintz, J.F. Silvain, *Metall. Mater. Trans. A* 37 (2006) 441–447.
- M.R. Barone, D.A. Caulk, *Int. J. Heat Mass Transf.* 48 (2005) 4132–4149.
- P. Kannan, J.J. Biernacki, D.P. Visco, *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 78 (2007) 162–171. [12] W.D. Griffiths, M.J. Ainsworth, *J. Mater. Sci.* 47 (2012) 145–150.
- W.M. Jiang, Z.T. Fan, Y.C. Dai, C. Li, *Mater. Sci. Eng. A* 597 (2014) 237–244. [25] S.L. Lü, S.S. Wu, L. Wan, P. AN, *Metall. Mater. Trans. A* 44 (2013) 2735–2745.
- Q.G. Wang, C.H. Caceres, J.R. Griffiths, *Metall. Mater. Trans. A* 34 (2003) 2901–2912. [33] A. Fadavi Boostani, S. Tahamtan, *J. Alloys Compd.* 481 (2009) 220–227. [34] A.M. Gokhale, M.D. Dighe, H. Horstemeyer, *Metall. Mater. Trans. A* 29 (1998) 905–907.

BAB IX

METODE LFC BERTEKANAN

9.1. Pendahuluan

Porositas dianggap suatu permasalahan yang krusial pada pembuatan aluminium paduan dengan metode pengecoran LFC karena pirolisis dari pola polystyrene selama penuangan, dimana menghasilkan pengaruh yang buruk pada sifat mekanis. Hal ini dapat juga berujung pada kekurangan dari tekanan *tightness*. Porositas pada bagian dalam disebabkan dari cairan polimer yang terjebak dalam cairan logam. Pembekuan logam sebelum cairan polystyren foam keluar melalui permukaan lapisan (*coating*). Pirolisis dari cairan polystyrene foam yang terus menerus, gelembung gas yang terkedomposisi dalam produk terjebak dalam bagian benda cor yang membeku (Molibog dan Hittleton, 2001). Pembekuan secara lambat memicu pembentukan lubang jarum (*pin hole*), dan relatif melemahkan dari gradien panas sehingga dapat menyebabkan penyusutan mikro (*micro shrinkage*) pada elemen berbentuk kompleks yang dibuat dengan metode LFC.

Porositas yang terjadi pada benda tuang dengan metode pengecoran LFC sangat tinggi bila dibanding dengan metode pengecoran cetakan pasir. Hal ini yang mungkin dihasilkan dari proses pembakaran (pyrolysis) dari pola polystyrene. Sangat sulit mendapatkan sifat mekanis yang tinggi komponen yang dibuat

dengan menggunakan metode LFC tanpa proses perlakuan bila dibanding proses cetakan pasir. Walaupun porositas dapat diminimalisir dengan tepat atau dikontrol, pada suatu waktu perlu atau pengeluaran efektif untuk menghindari pengisian menggunakan proses impregnasi paska proses pengecoran (ASM Handbook)

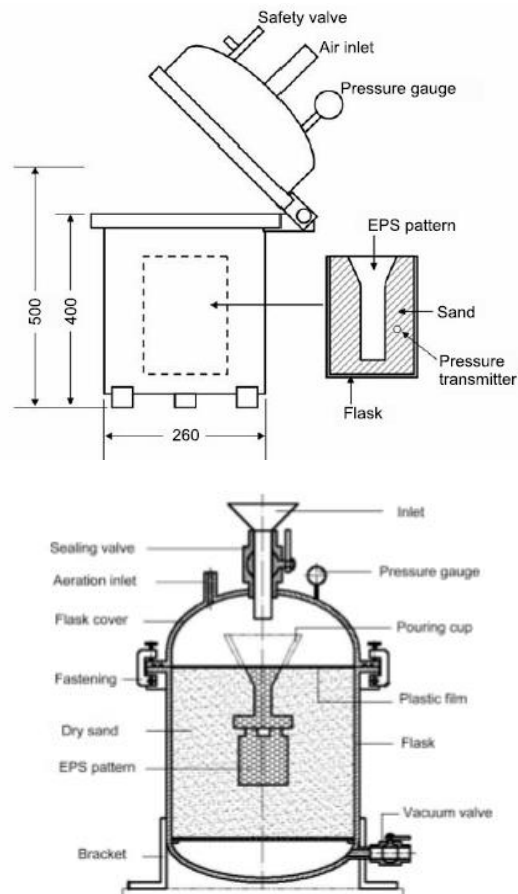
Satu metode untuk menghilangkan porositas selama operasi pengecoran dengan memberikan tekanan tinggi seperti penempaan secara isostatik (*isostatic forging*) (Garat, 1991) ketika pola hancur seluruhnya setelah mengisi cetakan dengan logam cair, tekanan gas isostatik diberikan pada cetakan dan logam, lebih baik sebelum logam mulai membeku. Kecepatan pembekuan diharapkan dapat juga diatas tekanan yang dikontrol karena peningkatan kontak antara benda cor dan pasir silika. Tekanan diberikan selama proses pembekuan logam cair, bagian depan logam cair lebih stabil dan cacat pengecoran yang timbul lebih sedikit.

Diakui bahwa penerapan tekanan eksternal sebelum proses pembekuan logam selesai dapat membantu pembentukan interdenritik dari logam cor dan mencegah terjadinya presipitasi dari porositas hydrogen dan pembentukan mikroporositas.

9.2. Metode Lost Foam Casting Bertekanan

Metode Lost Foam Casting dengan tekanan dimana metode ini menggunakan tekanan udara saat setelah logam cair dituangkan kedalam pola styrofoam, skema dari metode bejana tekan ini ditunjukkan pada gambar 2.5. Diameter dan tinggi tabung masing-masing 260 mm dan 500 mm dimana tekanan diberikan maksimum hingga 1,77 Mpa, dimana bejana tekan dibuat dari Baja Tahan Karat

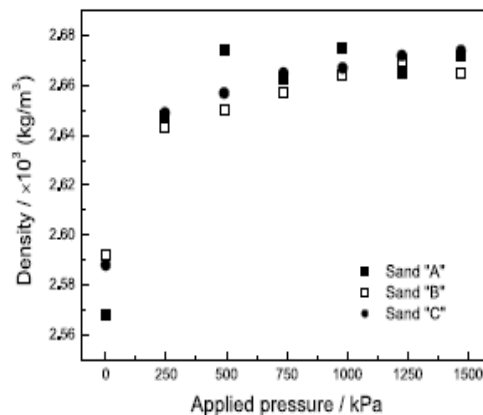
(stainless steels). Tekanan udara awal dimana dimasukkan kedalam tabung bertekanan setelah aluminium cair dituangkan kedalam pola Lost Foam casting (Kang, dkk 2007; Niakan, dkk 2012).



Gambar 9.1. Skema Bejana bertekanan pada metode LFC

Massa jenis dari cast bar meningkat secara bertahap dengan menerapkan tekanan eksternal, dan mencapai tingkat yang agak konstan pada tekanan 490 kPa terlepas dari jenis pasir cetak. Laju

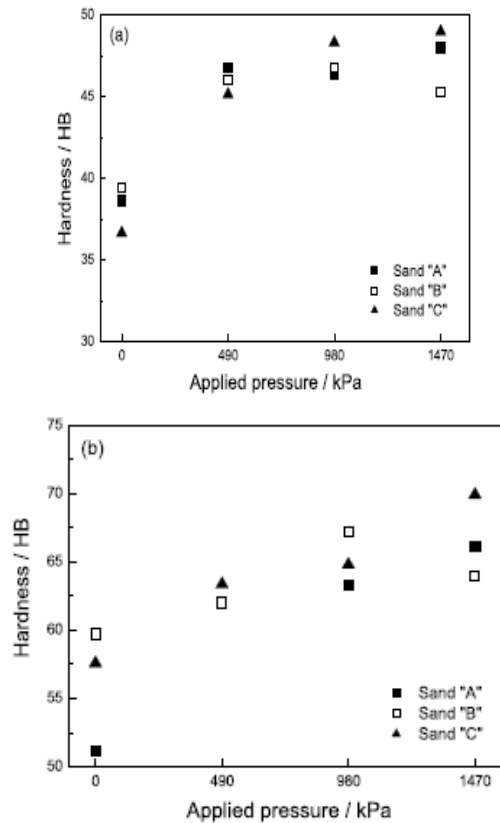
pembentukan degradasi polimer nampak menjadi hampir sama untuk tiga cetakan pasir. Gas berevolusi saat menuangkan logam cair nampaknya lebih penting untuk menghilangkan porositas (Yao dan Shivkumar, 1997) dan akan terpengaruh oleh ukuran butiran pasir. Diperkirakan efeknya tidak signifikan untuk gas keluar tanpa tekanan, namun jelas sangat signifikan pengaruhnya dengan tekanan yang diberikan sebagaimana pada (gambar 9.2).



Gambar 9.2 densitas pada benda cor dengan berbagai jenis pasir
sumber: (kang dkk, 2007)

Dengan menerapkan tekanan pada proses pengecoran LFC, kekerasan meningkat dengan tajam sampai tekanan 490 kPa dan kemudian meningkat sedikit dengan tekanan lebih lanjut. Kekerasan benda tuang tanpa tekanan memiliki kekerasan yang cukup rendah, sedangkan dengan menerapkan tekanan terjadi peningkatan kekerasan (Kang dkk, 2007; Niakan dkk, 2012). Kekerasan juga meningkat sekitar setelah perlakuan panas T6 (solution heat treated pada suhu $520 \pm C$ dan kemudian di aging $160 \pm C$ (Kang dkk, 2012). Hal ini terlihat penerapannya tekanan

pada benda tuang sehingga menyebabkan peningkatan kekerasan dan penurunan porositas (Kang dkk, 2007)

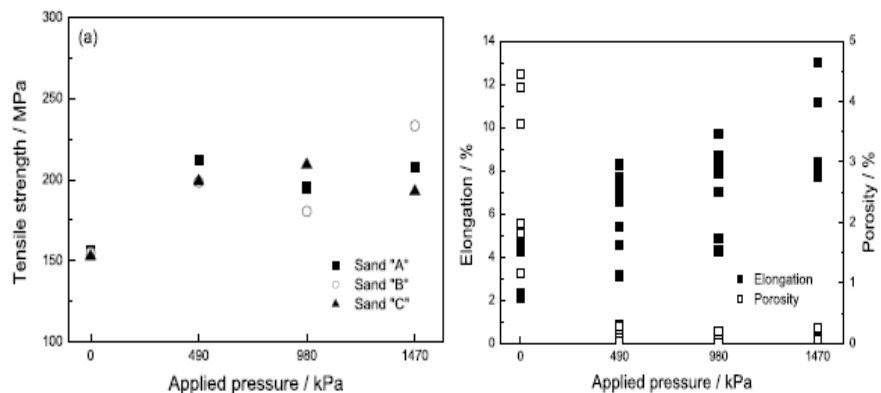


Gambar 9.3 Kekerasan benda tuang aluminium paduan a) tanpa perlakuan T6 b) dengan T6 sumber: Kang dkk, 2007

Untuk meningkatkan sifat mekanis dari benda cor paduan Al-Si-Mg yang dicor dengan metode LFC bisa dilakukan proses perlakuan panas T6 pada temperature 500-530 C dimana akan meningkatkan kekuatan tarik dan perpanjangan dari sampel. Kekuatan tarik meningkat dari 150 MPa sekitar 200 MPa dan

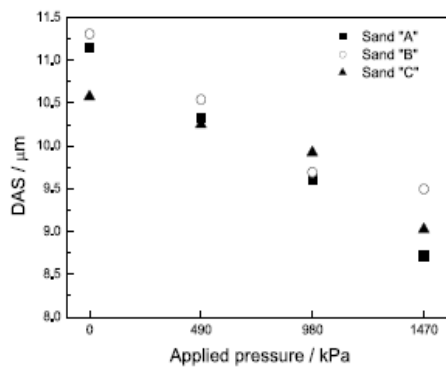
perpanjangan dari 3% menjadi 11% dengan menerapkan tekanan. Peningkatan pemanjangannya (elongation) lebih besar dari pada kekuatan tariknya. Peralatan-peralatan mekanis dari Aluminium cor, terutama sifat kelelahan sangat dipengaruhi oleh porositas (Yi dkk, 2003) diketahui bahwa perpanjangan itu juga sangat dipengaruhi oleh porositas.

Tekanan yang diterapkan berpengaruh pada elongasi dan porositas. Porositas menurun dengan cepat dan perpanjangan meningkat secara linier dengan bertambahnya tekanan yang diterapkan. Bisa disadari bahwa pemanjangan akan lebih dari 10% dengan tekanan yang diberikan 980 kPa.



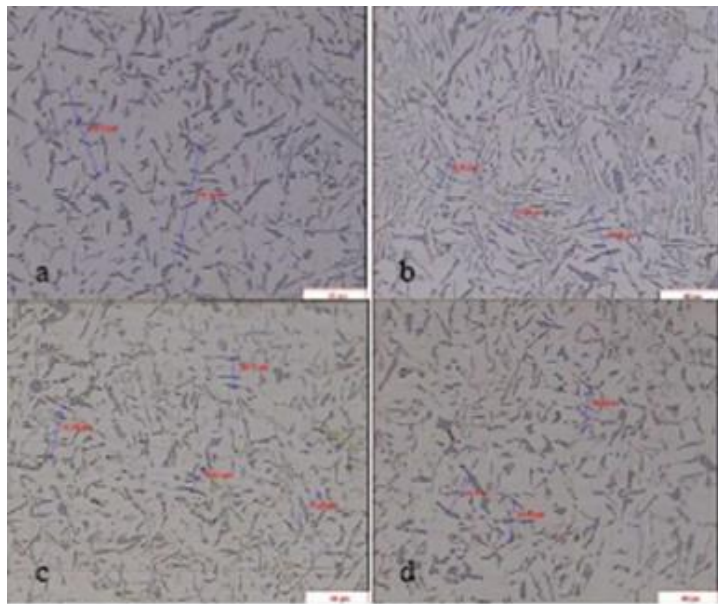
Gambar 9.4 efek dari tekanan eksternal yang diberikan pada a) kekuatan tarik, b) elongasi dan porositas (Kang dkk, 2007)

Gambar 9.5 menunjukkan dendrite arm spacing (DAS) dengan tekanan eksternal yang diberikan. DAS menurun secara signifikan dengan kenaikan tekanan yang diterapkan saat proses pembekuan.



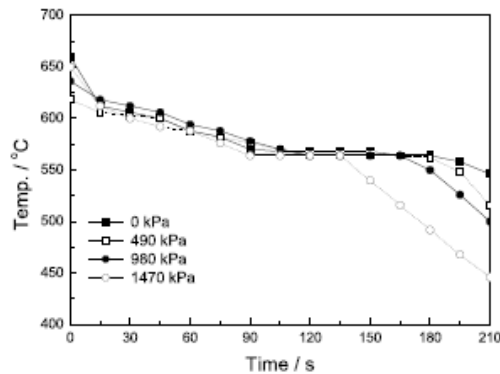
Gambar 9.5 Hubungan DAS dengan tekanan yang diberikan
(sumber Kang dkk, 2007)

Tekanan eksternal yang diterapkan meningkatkan waktu solidifikasi, jarak eutektik silikon menjadi lebih halus yang kemungkinan besar terjadi karena pembekuan yang cepat (Gambar 9.6). tekanan tinggi menghasilkan pengurangan yang signifikan dalam waktu pembekuan.



Gambar 9.6 eutektik silicon dari beberapa perbedaan tekanan a) 1 bar b) 2 bar, c) 3 bar & d) 4 bar sumber: Niakan dkk, 2012

Selain itu pemberian tekanan pada proses pengecoran dengan metode LFC akan mengurangi waktu solidifikasi (gambar 9.7). Penurunan waktu solidifikasi terjadi seiring dengan bertambahnya tekanan yang diterapkan selama pembekuan, yang tentunya akan berpengaruh pada jarak lengan dendrit sekunder yang dihasilkan akan lebih halus.



Gambar 9.7 kurva pendinginan terhadap variasi tekanan

Literatur

- X.Chen and J.E.Gruzleski: *Int. J. Cast Metal. Res.*,1996, 9, 17.
- T.V.Molibog and H.Littleton: *Proceedings of Lost Foam Casting*, AFS, Dallas, Texas, 2001, 71.
- K.Y.Kim and K.W.Lee: *J. Mater. Sci. Technol.*, 2005, 21(5), 681
- ASM: *Metals Handbook*, Vol.15 Casting, 9th Edn, 1988.
- Michael GARAT: US patent 5014764, 1991.
- Kang, B., Kim, Y., Kim, K., Cho, G., Cheo, K., 2007, Density and Mechanical Properties of Aluminium Lost foam Casting by Pessurization During Solidification, *J Mater Sci Technology*, Volume 23 No 6 , pp. 828-832.
- Niakan, A., Idris, M.H., Karimian, M., and Ourdjini, A., 2012, Effect of Pressure on Structure on Properties of Lost Foam Casting of Al-11Si Cast Alloy, *journal Applied Mechanic and Material*, Vol 110-116, pp 639-643.
- X.Yao and S.Shivkumar: *Mater. Sci. Technol.*, 1997, 13, 841.
- J.Z.Yi, Y.X.Gao, P.D.Lee, H.M.Hower and T.C.Lindley: *Metall. Mater. Trans. A*, 2003. 34(9),1879.

BAB X

PENGECORAN ALUMINIUM

PADUAN AL-Si

Paduan casting aluminium (Al-Si) adalah paduan aluminium yang banyak digunakan di industri otomotif. Banyak elemen paduan, seperti Cu, Ni, Mg, ditambahkan untuk membentuk berbagai konstituen dan memperbaiki performan. Selama proses pengecoran, kerusakan pasti terjadi. Oleh karena itu Struktur mikro yang kompleks pada paduan Al-Si yang dibuat dari proses pengecoran mempengaruhi perilaku kelelahan. Banyak studi difokuskan pada struktur mikro ini dan pengaruhnya terhadap kerusakan kelelahan pada tahun-tahun sebelumnya, dan beberapa di antaranya disajikan dalam bab ini.

Paduan aluminium memiliki banyak fitur unggulan, seperti bobot ringan, rasio kekuatan-berat yang tinggi, ketahanan korosi, biaya yang relatif rendah (aluminium adalah elemen yang paling banyak didistribusikan, kecuali oksigen, nitrogen, dan silikon), konduktivitas listrik dan termal yang tinggi, kemudahan manufaktur, dan ketersediaan siap (Departemen Pertahanan, A.S.A, 1966). Karena ini properti, mereka telah banyak digunakan di banyak aplikasi industri termasuk dalam transportasi industri, mis. mobil (Miller et al., 2000), kereta api (Skillingberg dan Green, 2007), kapal (Kyle et al., 2012), penerbangan (Liu et al., 2010), dirgantara

(Heinz et al., 2000), dan di beberapa bidang lainnya, seperti struktur bangunan (Shi et al., 2005).

Meningkatnya permintaan akan kendaraan hemat bahan bakar untuk mengurangi konsumsi energi dan polusi udara merupakan tantangan bagi industri otomotif. Sifat khas aluminium menjadikannya kandidat yang ideal untuk mengganti bahan yang lebih berat (baja atau besi tuang) untuk merespon permintaan penurunan berat kendaraan (Miller et al., 2000). Penggunaan paduan aluminium bisa membuat mobil ringan, ramah lingkungan, dan hemat energi. Misalnya, mereka banyak digunakan di blok silinder dan kepala silinder mesin, yang merupakan komponen kunci dan harus tahan terhadap suhu tinggi dan beban dinamis. Oleh karena itu, penelitian dan pengembangan paduan aluminium otomotif merupakan fitur kunci.

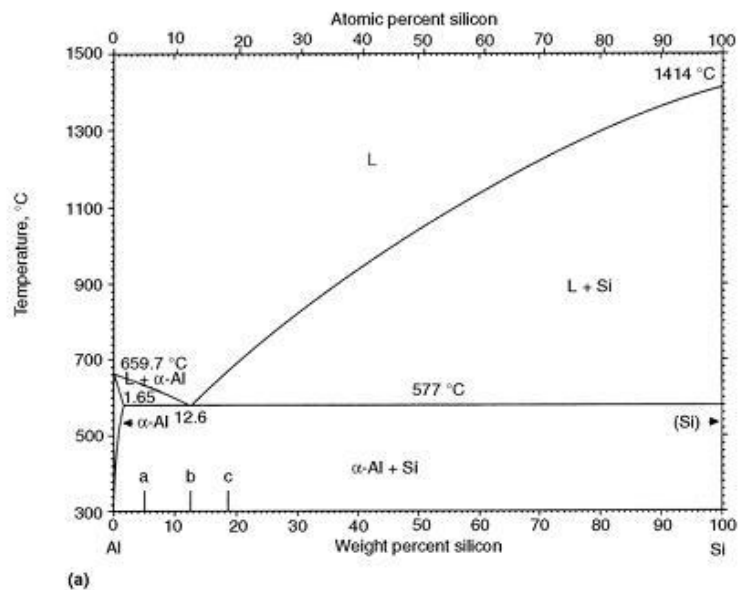
Paduan Al-Si komersial adalah bahan multiphase yang termasuk dalam asosiasi aluminium seri klasifikasi 3xx.x untuk aluminium silikon yang ditambah magnesium dan/ atau paduan tembaga, seperti paduan yang biasa digunakan di industri otomotif: paduan aluminium 319, 356, 357, 380 dan 390 (Albonetti, 2000).

10.1. Mikrostruktur Aluminium Paduan Al-Si

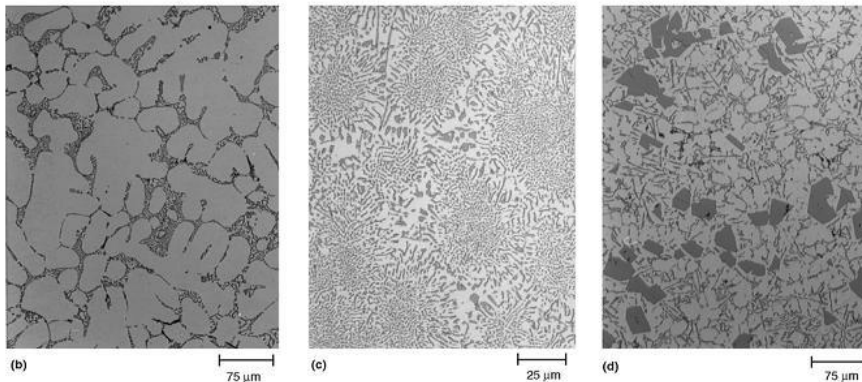
Dua fase utama yang ada dalam paduan Al-Si adalah aluminium berbasis α -Al dan berbasis silikon primer. Fasa α -Al, yang memiliki fraksi volume terbesar, berfungsi sebagai matriks untuk paduan. Kandungan Silikon dalam paduan cor standar Al-Si bervariasi dari 5 sampai 23 wt. %. Bergantung pada Kandungan, struktur paduannya bisa berupa hypoeutectic, eutectic, atau

hypereutectic, seperti yang bisa dilihat pada diagram fase ekuilibrium (Gambar 2-1) (Warmuzek, 2004).

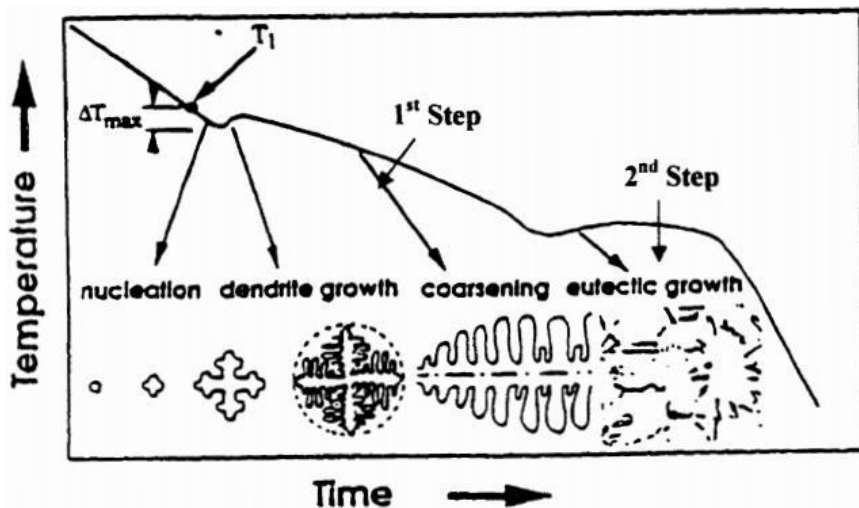
Solidifikasi adalah tahap ketika mikrostruktur terbentuk. Selama solidifikasi dari paduan Al-Si, aluminium primer tumbuh dan berkembang dalam dendrit jika paduannya bersifat hypoeutectic atau, fase silikon terbentuk dan tumbuh pada sudut partikel primer jika paduannya hipereutektik. Begitu titik eutektiknya tercapai, konstituen nukleasi Al-Si dan tumbuh sampai akhir pembekuan/pemadatan. Diagram fase paduan Al-Si sebagaimana ditunjukkan pada gambar 10.1 dibawah.



Gambar 10.1 diagram fase Al-Si



Gambar 10.2 b) hypoeutectic (1.65-12.6 wt% Si), (c) eutectic (12.6% Si), and (d) hypereutectic (>12.6% Si) alloys. (Warmuzek, 2004)



Gambar 10.3 proses Solidification dari paduan Al-Si (Albonetti, 2000)

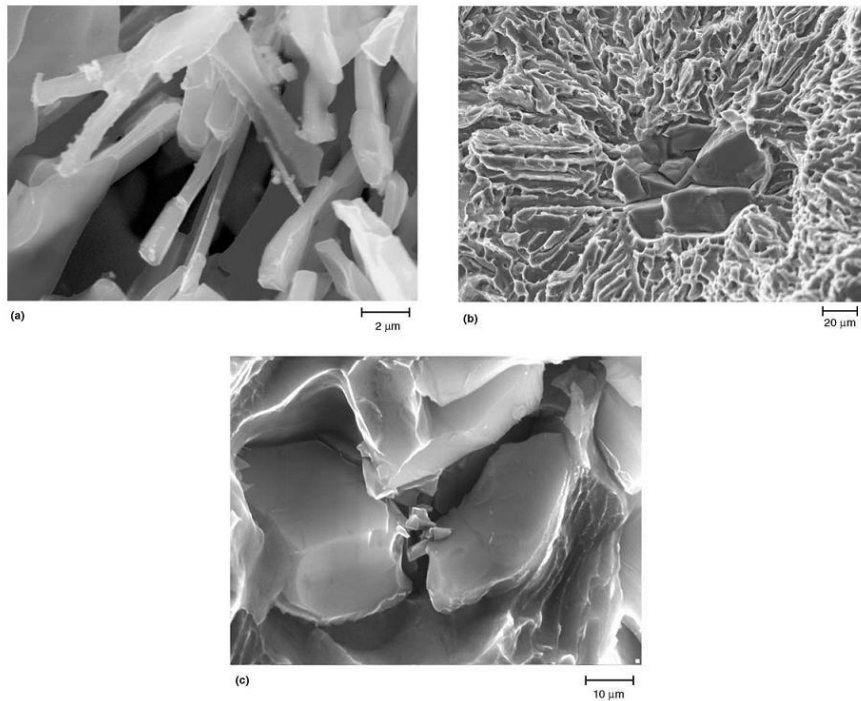
Fasa α -Aluminium biasanya memiliki struktur dendritik, yang bergantung pada kondisi solidifikasi (Gambar 10-2) (Warmuzek, 2004) (Moffat, 2007). Orientasi kristalografi dari

aluminium di dalam eutektik itu ditemukan sama dengan dendrit di sekitarnya yang tidak dimodifikasi dan Sr modified dari paduan (Boulos et al., 2012).

10.2. Phase Silikon

Silikon dalam paduan aluminium meningkatkan karakteristik casting. Memang penambahan silikon secara dramatis meningkatkan fluiditas, ketahanan retak panas (hot tear resistance) dan karakteristik feeding (Pavlovic-Krstic, 2010). Pada suhu kamar, paduan hypoeutectic terdiri dari fase silikon eutektik yang keras dan rapuh dan lembut dan fase aluminium primer yang ulet (Ye, 2003).

Seperti ditunjukkan pada Gambar 10-2, kandungan silikon dapat mempengaruhi struktur mikro paduan Al-Si. Silikon presipitat yang hampir murni, kristal dari Si, dapat memberikan morfologi yang berbeda: primer, presipitat padat dalam paduan hypereutectic atau pelat bercabang pada paduan eutektik (Lihat Gambar 10-4) (Warmuzek, 2004). Moffat dkk. (Moffat et al., 2006) melaporkan bahwa penurunan kandungan Si menghasilkan pembentukan kelompok intermetalik dan meningkatkan porositas.



Gambar 10-4 Morphologi dari Kristal Si dalam paduan Al-Si diobservasi dengan Scanning Electron Microscope: (a) titik eutectic dan (b) paduan hypereutectic, dan (c) modifikasi paduan hypoeutectic setelah perlakuan panas. (Warmuzek, 2004)

Table 10.1 reaksi yang solidifikasi yang terjadi dari paduan A319 (Martinez D dkk, 2005) menurut (Backerud dkk, 1990) dan (Samuel dkk, 1996)

Backerud et al.	Temperature (°C)	Samuel et al.	Temperature (°C)
(Al) dendritic network	609	(Al) dendritic network	610
Liq. $\rightarrow$ (Al) + $\text{Al}_{15}\text{Mn}_3\text{Si}_2$ + (Al ₅ FeSi)	590		
Liq. $\rightarrow$ (Al) + Si + Al_5FeSi	575	Precipitation of eutectic Si	562
		Precipitation of $\text{Al}_6\text{Mg}_3\text{FeSi}_6$ + Mg_2Si	554
Liq. $\rightarrow$ (Al) + Al_2Cu + Si + Al_5FeSi	525	Precipitation of Al_2Cu	510
Liq. $\rightarrow$ (Al) + Al_2Cu + Si + $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Cu}_2\text{Si}_6$	507	Precipitation of $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Cu}_2\text{Si}_6$	490

DAFTAR PUSTAKA

- Brown, J.R., 1999, "Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook", Butterworth Heinemann, Eleventh Edition, Oxford.
- Bian, X., Zhang, Z. and Liu, X., 2000, "Effect of Strontium Modification on Hydrogen Content and Porosity Shape of Al-Si Alloy", Material Science Forum, Vol. 331 – 337, p.p. 361 366.
- Cook, R., 1998, "Modification of Aluminium Silicon Foundry Alloy", London and Scandinavian Metallurgical Co. Limited, p. p. 1-10.
- Davis, J.R., 1993. ASM Specialty Handbook, *Aluminium and Aluminum Alloys*,
- Dinnis, C.M., Ottie, M.O., Dahle, A.K. and Taylor, J.A., 2004, "The Influence of Strontium on Porosity Formation in Al-Si Alloys", Metallurgical and Materials Transaction, Vol. 35 A, p.p. 353.
- Dahle, A.K., Nogita, K., McDonald, S.D., Dinnis, C. and Lu, L., 2005, "Eutectic Modification and Microstructure Development in Al-Si Alloys", Material Science and Engineering, Elsevier A 413 – 414, p.p. 243 – 248.
- Gazanion, F.H., Chen, X.G. and Dupuis, C., 2002, "Studies on The Sedimentation and Agglomeration Behavior of Al-Ti-B and Al-Ti-C Refiners", Materials Science Forum, Switzerland, Vol. 396-402, p.p. 45-52.
- Jiang, W. Fan, Z. Chen, X. Wang, B. and Wu, H. 2014 "Combined effects of mechanical vibration and wall thickness on

- microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy produced by expendable pattern shell casting," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 619, pp. 228–237.
- Kim, K., and Lee, K. 2005. *Effect of Process Parameters on Porosity in Aluminum Lost Foam Process*, *Journal Material Scripta Technology*. Vol. 21 No.5, pp. 681-685.
- Kumar, S., Kumar, P., Shan, H.S., 2007, Effect of evaporative pattern casting process parameters on the surface roughness of Al-7% Si alloy castings, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, pp. 615–623.
- Kang, B., Kim, Y., Kim, K., Cho, G., Cheo, K., 2007, Density and Mechanical Properties of Aluminium Lost foam Casting by Pessurization During Solidification, *J Mater Sci Technology*, Volume 23 No 6 , pp. 828-832.
- McDonald, S.D., Dahle, A.K., Taylor, A.T., and Jhon, D.H., 2004, "Eutectic Grains In Unmodified and Strontium Modified Hypoeutectic Aluminium-Silicon Alloys", *Metallurgical and Materials Transaction*, Vol. 35 A, p.p. 1829 – 1837.
- Matson, D.M., Venkatesh, R., And Biederman, S., 2007, Expanded Polystyrene Lost Foam Casting Modelling Bead Steaming Operation, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 129, pp. 429-434.
- Niakan, A., Idris, M.H., Karimian, M., and Ourdjini, A., 2012, Effect of Pressure on Structure on Properties of Lost Foam Casting of Al-11Si Cast Alloy, *journal Applied Mechanic and Material*, Vol 110-116, pp 639-643.
- Smith, W.F., 1993, *Structure and Properties of Engineering Alloys*", McGraw-Hill inc, Second Edition.

- Sabatino, M.D., Shankar, S., Apelian, D. and Amberg, L., 2005, "Influence of Temperature and Alloying Elements on Fluidity of Al-Si Alloy", The John Campbell Symposium.
- Shahmiri, M, and Kharrazi Y.H.K., 2007. The effects of gating system on the soundness of lost foam casting (LFC) process of Al-Si alloy (A.413.0). *Transactions B: Applications* Vol. 2- 2 pp. 157-166.
- Suherman, 2007, Pengaruh Penambahan Sr atau TiB terhadap sifat mekanis, struktur mikro dan Fluiditas pada paduan Al-6%Si, Tesis Program Studi Teknik Mesin Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.
- Shabani, M.J., Emamy, M., and Nemati, N 2011. "Effect of grain refinement on the microstructure and tensile properties of thin 319 Al castings," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 3, pp. 1542–1547.
- Suherman, Hasibuan, S., Rijaya, D., Rasyid, M., Sitorus, E.M., Syahputra., 2013, Analisa Sifat Fisis dan Mekanis Coran *head cylinder* Motor 2 Tak Dengan Metode Pengecoran Lost Foam Casting, prosiding Seminar Nasional, Pendidikan Tinggi Kimia Industri (PTKI), Medan.
- Suherman, Mizhar, S., Hermawan, O, and Handoko, A., 2017, Effect of Strontium and TiB on Aluminum Alloys A319 Lost Foam Casting (LFC), the 2nd International Conference on Science and Technology, 15-16 November, Pekanbaru, Indonesian, pp 10-16
- W. Jiang, Z. Fan, X. Chen, B. Wang, and H. Wu, 2014, Combined effects of mechanical vibration and wall thickness on microstructure and mechanical properties of A356

- aluminum alloy produced by expendable pattern shell casting," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 619, pp. 228–237.
- Sutiyoko, 2012, Metode Pengecoran Lost Foam Menjawab Tantangan Dunia Industri Pengecoran Logam. Jurnal Foundry, Politeknik Manufaktur Ceper Klaten
- X.Chen and J.E.Gruzleski: *Int. J. Cast Metal. Res.*,1996, 9, 17.
- T.V.Molibog and H.Littleton: *Proceedings of Lost Foam Casting*, AFS, Dallas, Texas, 2001, 71.
- K.Y.Kim and K.W.Lee: *J. Mater. Sci. Technol.*, 2005, 21(5), 681
- ASM: *Metals Handbook*, Vol.15 Casting, 9th Edn, 1988.
- Michael GARAT: US patent 5014764, 1991.
- Kang, B., Kim, Y., Kim, K., Cho, G., Cheo, K., 2007, Density and Mechanical Properties of Aluminium Lost foam Casting by Pessurization During Solidification, *J Mater Sci Technology*, Volume 23 No 6 , pp. 828-832.
- Niakan, A., Idris, M.H., Karimian, M., and Ourdjini, A., 2012, Effect of Pressure on Structure on Properties of Lost Foam Casting of Al-11Si Cast Alloy, *journal Applied Mechanic and Material*, Vol 110-116, pp 639-643.
- X.Yao and S.Shivkumar: *Mater. Sci. Technol.*, 1997, 13, 841.
- J.Z.Yi, Y.X.Gao, P.D.Lee, H.M.Hower and T.C.Lindley: *Metall. Mater. Trans. A*, 2003. 34(9),1879.