



ANALISA HASIL PENGECORAN SENTRIFUGAL DENGAN VARIASI KECEPATAN PUTARAN (RPM) MATERIAL ALUMINIUM 6061 MENGGUNAKAN MESIN PROTOTIPE PENGECORAN SENTRIFUGAL HORIZONTAL TERHADAP KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO

Duke Mulya Wibisono 1^a, Prof Dr. Ir. Agus Suprpto, MSc 2^a, Ir. H. Jumiadi, MT 2^b

^aUniversitas Merdeka Malang, Jl. Terusan Dieng No.62-64, Kota Malang, Jawa Timur 65146, Indonesia

*Corresponding author email: dukemulyawibisono@gmail.com

INFORMASI ARTIKEL

ABSTRACT

Tanggal Seminar : 16 Agustus 2021

Metal casting is the process of making components by melting the metal and then poured into the mold which is then left to freeze (plastic). This final task research uses centrifugal casting method where centrifugal casting is a casting process by way of mold rotated so that centrifugal force distributes molten metal to the edge of the mold cavity and centrifugal casting itself does not use cores. The material used in this centrifugal casting study used aluminum material 6061. The centrifugal casting process is performed with rotation variations in the mold ranging from 400 rpm, 800 rpm, 1200 rpm with a metal smelting temperature of 800°C. After the centrifugal casting process, specimens are conducted hardness testing and microstructure testing. The results obtained in the hardness test were obtained by increasing the hardness level price at 400 rpm (93.8 HRH), 800 rpm (95.6 HRH) and 1200 rpm (96.5 HRH). After obtaining the results of hardness testing of casting specimens conducted testing of microstructures using planimetric method (Jefferies). In microstructure testing obtained the number of micro grains and calculated using planimetric method so that the results of the size of the average grains - average microstructure according to the table ASTM E-112. Casting specimens were obtained from average grain sizes of 400 rpm (90 μm), 800 rpm (65 μm) and 1200 rpm (45 μm). The average diameter size of the grain obtained from the calculation of grain size is obtained by the result of the size of the grain that is getting smaller at each turn increase in the specimen.

Keywords : Centrifugal Casting, Aluminum, Hardness, MicroStructure

A B S T R A K

Pengecoran logam merupakan proses pembuatan komponen dengan cara mencairkan logam kemudian dituang ke dalam cetakan (*Mold*) yang selanjutnya dibiarkan membeku (plastis). Penelitian tugas akhir ini menggunakan metode pengecoran sentrifugal dimana pengecoran sentrifugal merupakan proses pengecoran dengan cara cetakan diputar sehingga gaya sentrifugal mendistribusikan logam cair ke tepi rongga cetakan dan pengecoran sentrifugal sendiri tidak menggunakan core atau inti. Bahan yang digunakan pada penelitian pengecoran sentrifugal ini digunakan material aluminium 6061. Proses pengecoran sentrifugal dilakukan dengan variasi putaran pada cetakan mulai dari 400 rpm, 800 rpm, 1200 rpm dengan suhu peleburan logam 800°C. Setelah dilakukan proses pengecoran sentrifugal, spesimen dilakukan pengujian kekerasan dan pengujian struktur mikro. Hasil yang didapatkan pada pengujian kekerasan didapatkan kenaikan harga tingkat kekerasan dimana pada putaran cetakan 400 rpm (93,8 HRH), 800 rpm (95,6 HRH) dan 1200 rpm (96,5 HRH). Setelah didapatkan hasil pengujian kekerasan spesimen pengecoran dilakukan pengujian terhadap struktur mikro dengan menggunakan metode planimetri (*Jefferies*). Pada pengujian struktur mikro didapatkan jumlah butir mikro dan dilakukan perhitungan dengan menggunakan metode planimetri sehingga didapatkan hasil ukuran butir rata – rata struktur mikro sesuai tabel ASTM E-112. Spesimen pengecoran didapatkan hasil ukuran rata – rata butir sebesar 400 rpm (90 μm), 800 rpm (65 μm) dan 1200 rpm (45 μm). Ukuran diameter rata – rata butir yang didapatkan dari hasil perhitungan ukuran butir didapatkan hasil ukuran butir yang semakin mengecil pada setiap kenaikan putaran pada spesimen.

Kata Kunci: Pengecoran Sentrifugal, Aluminium, Kekerasan, Struktur Mikro

1. Pendahuluan

Proses pengecoran merupakan proses penuangan logam yang dicairkan ke dalam cetakan kemudian dibiarkan dingin dan membeku. Proses pengecoran logam banyak dilakukan karena proses ini mempunyai beberapa keunggulan diantaranya adalah mampu menghasilkan produk dengan bentuk yang rumit dengan proses yang relatif ekonomis (Atmadja, 2006).

Pengecoran sentrifugal merupakan salah satu proses pengecoran logam cair dimana pengecoran sentrifugal adalah proses pengecoran dengan cara cetakan diputar sehingga gaya sentrifugal mendistribusikan logam cair ke tepi rongga cetakan. Pada proses pengecoran sentrifugal ini sendiri tidak menggunakan *core* atau inti. Teknik pengecoran ini biasanya digunakan untuk membuat produk silinder atau pipa silindris. Pengecoran sentrifugal memiliki keunggulan diantaranya struktur coran lebih padat, porositas rendah, dan produktivitas tinggi untuk menghasilkan benda berbentuk silinder. Pengecoran sentrifugal juga memiliki kekurangan seperti distribusi ketebalan yang kurang merata, struktur yang tidak homogen akibat pembekuan yang tidak merata, timbulnya crack pada coran logam keras akibat putaran yang terlalu tinggi, dan struktur yang kurang padat akibat laju putaran yang terlalu rendah. Kekurangan ini dapat diminimalkan dengan cara mengatur laju putaran cetakan, sudut kemiringan, temperatur, dan sebagainya (Sugiarto dan Jamasri, 2014).

Pada penelitian tugas akhir ini proses pengecoran sentrifugal menggunakan bahan aluminium sebagai material spesimen. Aluminium sering digunakan sebagai bahan untuk membuat komponen mesin, benda seni, dan alat-alat rumah tangga sampai produk yang mempunyai bentuk yang rumit dan sulit untuk dibentuk melalui proses permesinan, sehingga harus dibentuk melalui proses pengecoran. Jenis aluminium yang digunakan adalah aluminium 6061, yaitu merupakan paduan aluminium dari grup 6XXX.

Pengecoran sentrifugal pada penelitian tugas akhir ini, dilakukan dengan variasi kecepatan putaran mulai dari 400 rpm, 800 rpm, 1200 rpm, dengan suhu penuangan pada logam cair sebesar 800°C. Proses pengecoran sentrifugal ini menggunakan mesin pengecoran sentrifugal milik Teknik Mesin Universitas Merdeka Malang.

Fokus masalah yang ingin dipelajari dalam penelitian tugas akhir ini adalah seberapa pengaruh variasi putaran cetakan sebesar 400 rpm, 800 rpm dan 1200 rpm pada pengecoran sentrifugal terhadap ketangguhan dan struktur mikro pada benda hasil pengecoran tersebut. Untuk mengetahui sifat mekanik hasil produk pengecoran sentrifugal dengan menggunakan material aluminium 6061 maka dilakukanlah pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik atau mikroskop cahaya dan uji kekerasan menggunakan *Hardness Testing Machine*.

Permasalahan

Berdasarkan latar belakang di atas, permasalahan penelitian :

1. Bagaimana pengaruh kecepatan putaran cetakan terhadap densitas pada spesimen hasil pengecoran sentrifugal.
2. Bagaimana pengaruh kecepatan putaran cetakan pada pengecoran sentrifugal terhadap kekerasan dan struktur mikro pada spesimen hasil pengecoran.

Batasan Masalah

Agar pembahasan dalam penelitian ini tidak terlalu luas, maka batasan masalah dalam penelitian :

1. Material yang digunakan adalah aluminium, dengan jenis aluminium 6061.
2. Metode pengecoran sentrifugal yang digunakan adalah pengecoran sentrifugal dengan posisi cetakan horizontal.
3. Variasi putaran pada cetakan yang digunakan yaitu 400 rpm, 800 rpm, 1200 rpm.
4. Proses pengecoran sentrifugal menggunakan mesin prototipe hasil rancangan.
5. Pengujian kekerasan hasil coran menggunakan alat uji *Rockwell Hardness Testing Machine*.
6. Pengamatan struktur mikro hasil coran menggunakan mikroskop optik atau cahaya merk Nikon.

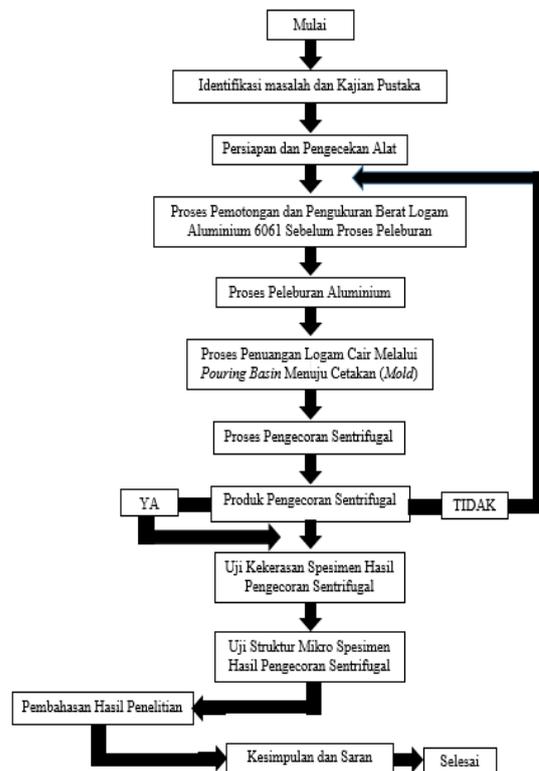
Tujuan

Berdasarkan latar belakang, permasalahan dan batasan masalah maka tujuan penelitian :

1. Untuk mengetahui pengaruh kecepatan putaran cetakan terhadap densitas pada spesimen hasil pengecoran sentrifugal.
2. Untuk mengetahui pengaruh kecepatan putaran cetakan terhadap kekerasan dan struktur mikro pada spesimen hasil pengecoran sentrifugal.

2. Metodologi

Diagram Alir



Gambar 2.1 Diagram Alir Penelitian

Parameter terikat

Pada proses pengecoran ini dilakukan dengan menggunakan metode pengecoran sentrifugal. Proses pengecoran dengan menggunakan metode ini cetakan yang digunakan adalah jenis cetakan permanen. Mesin yang digunakan dalam proses pengecoran ini merupakan mesin prototipe untuk pengecoran sentrifugal horizontal. Setelah dilakukan proses pengecoran sentrifugal hasil atau produk cor akan dilakukan pengujian kekerasan dan pengujian struktur mikro untuk mengetahui sifat mekanik pada spesimen hasil pengecoran.

Parameter bebas

Pengecoran sentrifugal ini menggunakan bahan dengan jenis logam aluminium. Aluminium yang digunakan merupakan jenis aluminium paduan dengan seri 6061. Pada proses pengecoran sentrifugal ini dilakukan variasi putaran pada cetakan. Variasi putaran yang digunakan adalah mulai dari 400 rpm, 800 rpm, 1200 rpm.

Persiapan dan Pengecekan Mesin

Sebelum melakukan proses pengecoran, dilakukan beberapa persiapan dan pengecekan komponen pada mesin pengecoran sentrifugal diantaranya sebagai berikut:



Gambar 2.2. Mesin Prototipe Pengecoran Sentrifugal

1. Memeriksa kondisi komponen mesin pengecoran sentrifugal diantaranya motor listrik, sabuk, puli, dan cetakan pada mesin.
2. Menempatkan posisi mesin di keadaan yang aman dan ditempatkan pada permukaan lantai yang rata sehingga pada saat melakukan proses penuangan logam cair akan mengurangi resiko kecelakaan kerja.
3. Melakukan proses pemanasan atau *pre-heating* pada saluran masuk atau *pouring* dan cetakan. Proses ini bertujuan agar menghindari perbedaan temperatur yang besar pada saat proses penuangan logam cair dari *pouring* ke cetakan.

Persiapan Material

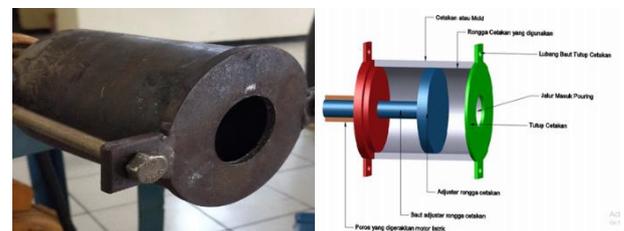
Material yang digunakan untuk penelitian tugas akhir ini adalah aluminium 6061 yang memiliki ketahanan korosi yang tinggi dan sifat mampu cor yang baik. Pemilihan penggunaan material aluminium 6061 ini karena material ini banyak digunakan dalam bidang otomotif dan komponen mesin sehingga bahan mudah didapat dipasaran tetapi memiliki harga yang cukup tinggi.



Gambar 2.3. Aluminium 6061

Persiapan Cetakan Logam

Cetakan pada mesin pengecoran sentrifugal yang akan digunakan merupakan jenis cetakan permanen. Cetakan ini merupakan cetakan logam dengan material ST-37. Cetakan yang digunakan pada proses pengecoran sentrifugal ini memiliki ukuran diameter luar 90 mm, diameter dalam 78 mm, dan panjang 100 mm. Pada bagian dalam cetakan ini juga memiliki pengatur atau *adjuster* yang berfungsi sebagai pengatur panjang atau volume produk cor sesuai dengan perencanaan spesimen pengecoran.



Gambar 2.4. Cetakan (Mold)

Perlengkapan Alat yang Digunakan

1. Toolkit (Perkakas)



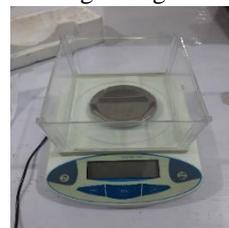
Gambar 2.5. Toolkit

2. Hand Grinder



Gambar 2.6. Grinda

3. Timbangan Digital



Gambar 2.7. Timbangan Digital

4. Tang Pencapit Ladle



Gambar 2.8. Tang Pencapit

5. Ladle



Gambar 2.9. Ladle

6. Tungku Pemanas



Gambar 2.10. Tungku Pemanas

7. Tachometer



Gambar 2.11. Tachometer

9. Pengatur Kecepatan Putaran



Gambar 2.13. Pengatur Kecepatan Putaran

11. Sarung Tangan Tahan Panas



Gambar 2.15. Sarung Tangan Tahan Panas

Tahapan Proses Pengecoran Sentrifugal

1. Proses Peleburan Logam

Setelah melakukan pengecekan mesin dan persiapan peralatan pada proses ini material yang telah dipotong dan ditimbang menggunakan timbangan digital sesuai berat material yang telah direncanakan untuk spesimen cor, aluminium dilebur sampai cair dengan temperatur peleburan 800°C dengan menggunakan tungku pemanas *nabertherm*.

2. Pengaturan Kecepatan Putaran Motor

Proses pengecoran sentrifugal yang dilakukan menggunakan variasi kecepatan putaran pada cetakan yaitu mulai dari 400 rpm, 800 rpm, 1200 rpm. Pada proses ini dilakukan pengaturan putaran pada motor listrik dengan menggunakan alat pengatur kecepatan putaran motor dan untuk membaca kecepatan putaran motor digunakan alat pembaca kecepatan putaran digital (*tachometer*).

3. Pre-heating Cetakan dan Saluran Masuk (*Pouring*)

Proses memanaskan cetakan dan saluran masuk (*Pre-Heating*) ini dilakukan untuk mengurangi terjadinya perbedaan temperatur yang terlalu tinggi dengan logam cair pada saat proses penuangan logam cair ke cetakan. *Pre-heating* cetakan dan saluran masuk (*Pouring*) dipanaskan dengan menggunakan alat las *blender* sampai temperatur 300°C.

8. Thermogun



Gambar 2.12. Thermogun

10. Alat Las Gas Oksigen Asitilin



Gambar 2.14 Alat Las Gas Oksigen Asitilin

4. Penuangan Logam Cair

Setelah melakukan proses peleburan logam, pengaturan kecepatan putaran, dan pemanasan pada cetakan dan saluran masuk, dilakukan proses penuangan logam cair, pada proses ini logam cair dituangkan melalui saluran masuk (*Pouring*) menuju ke dalam cetakan. Proses penuangan logam cair ini dilakukan pada saat cetakan berputar.

5. Proses Pendinginan Benda Cor

Dalam proses pendinginan ini, logam cair yang sudah masuk ke dalam rongga cetakan akan dibiarkan berputar didalam cetakan selama 2 menit sampai logam cair didalam cetakan membeku.

6. Proses Pembongkaran Hasil Pengecoran

Proses ini merupakan proses melepaskan hasil cor atau spesimen pengecoran telah didinginkan dan terjadi solidifikasi. Pada proses ini perputaran cetakan dihentikan, kemudian spesimen cor dilepas dari cetakan.

Pengujian Kekerasan

Untuk pengujian kekerasan yang dilakukan pada penelitian ini dengan menggunakan metode indentasi (*indentation*) yaitu pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell*. Sebelum melakukan pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell* ini dilakukan persiapan pada material yang akan diuji. Persiapan pada material yang akan diuji kekerasan dengan menggunakan metode indentasi (*Rockwell*) yaitu, pemotongan spesimen dengan ukuran yang kecil sesuai dengan ukuran penampang penahan indentor, setelah dilakukan pemotongan spesimen yang akan diuji dilakukan proses pengamplasan sehingga menghasilkan permukaan spesimen yang rata. Setelah permukaan pada spesimen telah rata selanjutnya akan diuji menggunakan alat pengujian kekerasan yaitu *Hardnes Testing Machine*. Pada pengujian kekerasan spesimen cor yang akan diuji menggunakan skala HRH, tipe indentor 1/8" Ball dengan major load 60 kg.



Gambar 2.16. Alat Uji Kekerasan (*Hardness Testing Machine*)

Pengujian Struktur Mikro

Setelah dilakukan proses pengecoran dan menghasilkan produk cor, produk cor dilakukan pengujian struktur mikro. Pengujian struktur mikro ini menggunakan mikroskop optik atau mikroskop cahaya. Berikut adalah tahapan pengujian struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optik :

1. Persiapan spesimen uji

Persiapan spesimen ini dengan memotong spesimen yang akan di uji. Spesimen dipotong keadaan datar, sehingga

bertujuan untuk memudahkan dalam proses pengamatan butir.

2. Proses Grinding dan Polishing

Tahap proses grinding dan polishing ini dilakukan bertujuan untuk membentuk permukaan spesimen agar benar-benar rata. Grinding dilakukan dengan cara menggosok spesimen menggunakan mesin *hand grinding* yang diberi kertas gosok atau amplas dengan ukuran grid mulai dari yang paling kasar sampai grid yang paling halus. Setelah permukaan halus, selanjutnya spesimen dilakukan proses polishing dengan menggosokkan spesimen menggunakan kain yang telah diberi cairan pengkilap atau autosol sehingga permukaan pada spesimen akan sangat halus dan rata.

3. Proses Etsa (*etching*)

Proses etsa ini pada dasarnya adalah proses korosi atau mengkorosikan permukaan specimen yang telah rata karena proses grinding dan polishing menjadi tidak rata lagi. Ketidakrataan permukaan specimen ini dikarenakan mikrostruktur yang berbeda akan dilarutkan dengan kecepatan yang berbeda, sehingga meninggalkan bekas permukaan dengan orientasi sudut yang berbeda pula. Pada pelaksanaannya, proses etsa ini dilakukan dengan cara mencelupkan specimen pada cairan etsa dimana tiap jenis logam mempunyai cairan etsa (*etching reagent*) sendiri-sendiri tergantung bahan atau spesimen yang akan diamati.

4. Proses Pengamatan Butir

Setelah permukaan spesimen di etsa, maka spesimen tersebut siap untuk diamati di bawah mikroskop dan pengambilan foto metalografi. Dengan dilakukan pengujian struktur mikro dan diamati dengan mikroskop optik dengan perbesaran lensa sebesar 200x akan nampak butir struktur mikro pada spesimen.

5. Perhitungan Butir dengan Metode Planimetri (*Jefferies*)

Metode pada pengujian struktur mikro ini menggunakan metode planimetri (*Jefferies*). Metode planimetri ini menggunakan lingkaran yang umumnya memiliki luas 5000 mm². Besar butir dihitung dengan mengalikan jumlah butir dengan penggali *Jefferies* (F) dan menentukan diameter rata-rata butir dengan menyesuaikan nilai G pada referensi table ASTM E-112. Rumus Perhitungan besar butir yang digunakan pada metode Metode Planimetri :

$$Na = f \left[n_1 + \frac{n_2}{2} \right]$$

$$G = [3,32 \log(Na) - 2,95]$$

Keterangan :

G : Besar butir dirujuk ke table ASTM E-112 untuk mencari nilai diameter butir (µm).

Na : Jumlah butir.

n₁ : Jumlah butir dalam lingkaran.

n₂ : Jumlah butir yang bersinggungan dengan garis lingkaran.

F : Faktor penggali pada table *Jefferies*.

Untuk perhitungan besar butir pada penelitian ini dengan menggunakan metode planimetri (*Jefferies*) digunakan perbesaran 200x pada mikroskop yang akan digunakan.

Sehingga didapat nilai pemilihan perbesaran yang akan digunakan untuk perhitungan nilai G sesuai tabel penggali *Jefferies* (f) yaitu untuk perbesaran 200x didapat nilai f = 8,0.

Tabel 2.1. Pemilihan perbesaran sesuai Penggali *Jefferies* (f)

perbesaran	f
1	0,002
25	0,125
50	0,5
75	1,125
100	2,0
200	8,0
300	18,0
500	50,0
1000	200,0

Tabel 2.2 ASTM E-112

ASTM micro-grain-size number G	"Diameter" of average grain section ¹		Average intercept distance L _N , mm	Intercept count per mm ² N _G	Area of average grain section, A _G , mm ²	Calculated no. of grains per mm ² , N _G ²	Average	
	Nominal d _n , mm	Feret's d _F , mm					Grains per mm ² at 1X ³ , N ₁	Grains per mm ² at 100X, N ₂
00+	0.51	0.570	0.453	2.210	0.258	6.13	3.88	0.250
0	0.36	0.403	0.320	3.125	0.159	17.3	7.75	0.500
0.5	0.30	0.330	0.269	3.716	0.0912	29.0	11.0	0.707
1.0	0.25	0.285	0.226	4.42	0.0645	48.8	15.50	1.000
1.5	0.21	0.240	0.190	5.26	0.0456	82	21.9	1.414
1.7	0.200	0.226	0.177	5.64	0.0400	100	25.0	1.613
2.0	0.18	0.202	0.160	6.25	0.0323	138	31.0	2.000
2.5	0.15	0.170	0.135	7.43	0.0228	232	43.8	2.828
3.0	0.125	0.143	0.113	8.84	0.0161	391	62.0	4.000
3.2	0.120	0.135	0.106	9.41	0.0144	463	69.4	4.480
3.5	0.105	0.120	0.095	10.51	0.0114	657	87.7	5.657
3.7	0.100	0.113	0.089	11.29	0.0100	800	100	6.452
	µm	µm	µm		mm ² × 10 ⁻³			
4.0	90	101	80.0	12.5	8.07	1105	124	8.000
4.5	75	85	67.3	14.9	5.70	1859	175	11.31
4.7	70	79	62.0	16.1	4.90	2331	204	13.17
5.0	65	71	56.6	17.7	4.03	3126	248	16.00
5.2	60	66	53.2	18.8	3.60	3708	278	17.92
5.5	55	60	47.6	21.0	2.85	5258	351	22.63
5.7	50	56	44.3	22.6	2.40	6400	400	25.81
6.0	45	50	40.0	25.0	2.02	8842	496	32.00
6.3	40	45	35.4	28.2	1.60	12 500	625	40.32
6.5	38	42	33.6	29.7	1.41	14 871	701	45.25
6.7	35	39	31.0	32.2	1.23	18 859	836	52.67
7.0	32	36	28.3	35.4	1.008	25 033	992	64.00

	µm	µm	µm	µm	mm ² × 10 ⁻⁴	× 10 ³	× 10 ²
7.2	30	34	26.6	37.6	0.900	29 630	1111
7.5	27	30	23.8	42.0	0.713	41 061	1403
7.7	25	28	22.2	45.1	0.625	51 200	1600
	µm <td>µm <td>µm <td>µm <td>mm² × 10⁻⁴</td> <td>× 10³</td> <td>× 10²</td> </td></td></td>	µm <td>µm <td>µm <td>mm² × 10⁻⁴</td> <td>× 10³</td> <td>× 10²</td> </td></td>	µm <td>µm <td>mm² × 10⁻⁴</td> <td>× 10³</td> <td>× 10²</td> </td>	µm <td>mm² × 10⁻⁴</td> <td>× 10³</td> <td>× 10²</td>	mm ² × 10 ⁻⁴	× 10 ³	× 10 ²
8.0	22	23	20.0	50.0	504	0.0707	1.98
8.3	20	23	17.7	56.4	400	0.1090	2.50
8.5	19	21	16.8	59.5	356	0.1190	2.81
9.0	16	18	14.1	70.7	252	0.200	3.97
9.2	15	17	13.3	75.2	223	0.225	4.44
9.5	13	15	11.9	84.1	178	0.356	5.63
10.0	11	13	10.0	100	126	0.566	7.94
10.3	10	11.3	8.86	113	100	0.800	10.90
10.5	9.4	10.6	8.41	119	89.1	0.952	11.22
10.6	9.0	10.2	7.90	125	81.0	1.097	12.35
11.0	8	8.9	7.07	141	63.0	1.600	15.87
11.4	7.0	7.9	6.20	161	49.0	2.332	20.41
11.5	6.7	7.5	5.95	166	44.6	2.662	22.45
11.8	6.0	6.8	5.32	188	36.0	3.704	27.78
12.0	5.6	6.3	5.00	200	31.5	4.527	31.7
12.3	5.0	5.6	4.43	226	25.0	6.40	40.0
12.5	4.7	5.3	4.20	238	22.3	7.50	47.9
13.0	4.0	4.5	3.54	283	15.8	12.80	63.5
13.5	3.3	3.7	2.97	336	11.1	21.54	89.8
13.8	3.0	3.4	2.66	376	9.0	26.6	111.3
14.0	2.8	3.2	2.50	400	7.86	30.21	127
14.3	2.5	2.8	2.22	451	6.25	41.2	160

¹Feret's diameter = height between tangents; d_F = A/L_N. Values of d_n and d_F rounded to digits shown.
²Value of hexon intercept or mean free path.
³Computation of N_G based on grains averaging to spherical shape for which N_G = 0.5019 (N₁)².
⁴To obtain grains per mm² at 100X, multiply by 10⁻⁴.
⁵The use of "00" is recommended instead of "minus 1" to avoid confusion.

Setelah didapatkan hasil dari perhitungan besar butir struktur mikro pada spesimen dengan Metode Planimetri (*Jefferies*) diperoleh nilai G, hasil nilai G yang diperoleh melalui analisa dengan menggunakan metode planimetri akan disesuaikan dengan tabel pengukuran besar butir struktur mikro sesuai dengan tabel 2.2 diatas (ASTM E-112).

Tempat dan waktu pelaksanaan penelitian

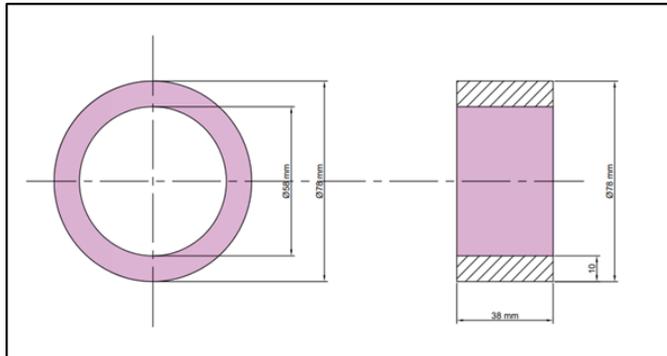
Analisa hasil pengecoran sentrifugal dengan variasi kecepatan putaran (rpm) material aluminium 6061

menggunakan mesin prototipe pengecoran sentrifugal horizontal ini dilaksanakan di Laboratorium Uji Logam dan Laboratorium Produksi, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Malang dan dilaksanakan mulai dari tanggal 1 Mei 2021 sampai dengan 3 Agustus 2021.

3. Hasil dan Pembahasan

Perhitungan Perencanaan Spesimen Benda Cor

a. Spesifikasi Spesimen cor



Gambar 3.17. Spesifikasi Benda Cor

- d_1 (Diameter Luar) : 78 mm, $R = 39 \text{ mm} = 3,9 \text{ cm}$
- d_2 (Diameter Dalam) : 58 mm, $r = 29 \text{ mm} = 2,9 \text{ cm}$
- L (Panjang) : 38 mm = 3,8 cm
- t (Tebal) : 10 mm = 1 cm
- ρ_{Al} (Berat Jenis) : 2,7 gr/cm³

b. Perhitungan Volume Perencanaan Spesimen Cor

$$\begin{aligned} V &= (\pi \times R^2 \times l) - (\pi \times r^2 \times l) \\ &= (3,14 \times 3,9^2 \times 3,8) - (3,14 \times 2,9^2 \times 3,8) \\ &= 181,48 - 100,34 \\ &= 81,14 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

c. Perhitungan Berat Bahan Perencanaan Cor

$$\begin{aligned} M &= (\pi \times R^2 \times l \times \rho) - (\pi \times r^2 \times l \times \rho) \\ &= (3,14 \times 3,9^2 \times 3,8 \times 2,7) - (3,14 \times 2,9^2 \times 3,8 \times 2,7) \\ &= 490 - 270 \\ &= 220 \text{ gr} \end{aligned}$$

d. Densitas Perencanaan Spesimen Cor

$$\begin{aligned} D &= \frac{M}{V} \\ &= \frac{220}{81,14} \\ &= 2,71 \text{ gr/cm}^3 \end{aligned}$$

Gambar Hasil Spesimen Cor Pengecoran Sentrifugal

a. Gambar Spesimen Hasil Pengecoran Putaran Cetak 400 rpm



Gambar 3.18. Spesimen Cor Kecepatan Putaran 400 rpm

b. Gambar Spesimen Hasil Pengecoran Putaran Cetak 800 rpm



Gambar 3.19. Spesimen Cor Kecepatan Putaran 800 rpm

c. Gambar Spesimen Hasil Pengecoran Putaran Cetak 1200 rpm



Gambar 3.20. Spesimen Cor Kecepatan Putaran 1200 rpm

Perhitungan dan Rekapitulasi Volume Densitas dan Gaya Sentrifugal Spesimen Cor

a. Spesimen Pengecoran Sentrifugal Putaran Cetak 400 rpm

1. Spesifikasi Spesimen Cor Putaran Cetak 400 rpm

- d_1 (Diameter Luar) : 78 mm, $R = 39 \text{ mm} = 3,9 \text{ cm}$
- d_2 (Diameter Dalam) : 60 mm, $r = 30 \text{ mm} = 3 \text{ cm}$
- L (Panjang) : 38 mm = 3,8 cm
- Tebal : 9 mm
- Suhu peleburan logam : 800°C
- Suhu Pre-heating Cetakan : 300°C
- Bahan yang digunakan : 220 gr
- Berat spesimen : 215 gr

2. Volume Spesimen Cor Putaran Cetak 400 rpm

$$\begin{aligned} V &= (\pi \times R^2 \times l) - (\pi \times r^2 \times l) \\ &= (3,14 \times 3,9^2 \times 3,8) - (3,14 \times 3^2 \times 3,8) \\ &= 181,48 - 107,38 \\ &= 74,1 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

3. Densitas Spesimen Cor Putaran Cetakan 400 rpm

$$D = \frac{M}{V}$$

$$= \frac{215}{74,1}$$

$$= 2,9 \text{ gr/cm}^3$$

4. Gaya sentrifugal yang terjadi pada putaran cetakan 400 rpm

- Massa bahan pengecoran (M) : 220 gr = 0,22 kg
- Kecepatan Cetakan (V) : 400 rpm = 16,32 m/s
- Jari – jari cetakan (r) : 4,5 cm = 0,35 m

$$F = \frac{M \times V^2}{r}$$

$$= \frac{220 \times 18,84^2}{0,45}$$

$$= 1,7 \times 10^5 \text{ N}$$

b. Rekapitulasi Volume Densitas dan Gaya Sentrifugal Spesimen Cor

Tabel 3.2. Rekapitulasi Hasil Perhitungan Volume Densitas dan Gaya Sentrifugal

No	Putaran Cetakan (rpm)	Massa (Gram)	Volume (cm ³)	Densitas (gr/cm ³)	Gaya Sentrifugal (N)
1	Tanpa Putaran	220	81,14	2,71	-
2	400	215	74,1	2,9	1,7 x 10 ⁵
3	800	211	70,8	3	6,9 x 10 ⁵
4	1200	198	63,1	3,13	10,6 x 10 ⁵

Hasil dan Rekapitulasi Pengujian Kekerasan (Rockwell) Spesimen Cor

a. Spesimen Pengecoran Sentrifugal Putaran Cetakan 400 rpm

1. Data Pengujian

- Spesimen : Pengecoran Sentrifugal 400 rpm
- Standard Uji : ASTM E18
- Jenis Mesin : Rockwell Hardnes Tester
- Identor : 1/8" Ball (Bola baja)
- Indeks Rockwell : H
- Beban Mayor : 60 kg

Tabel 3.3. Hasil Uji Kekerasan Spesimen Cor 400 rpm (Rockwell)

Spesimen Uji (400 rpm)	Beban Mayor (Kg)	Identor	Titik	Harga Kekerasan (HRH)
	60	1/8" Ball	1	92
			2	92,5
			3	95
			4	91,5
			5	98
Rata –rata				93,8

b. Rekapitulasi Pengujian Kekerasan (Rockwell) Spesimen Cor

Tabel 3.4. Rekapitulasi Pengujian Kekerasan (Rockwell) Spesimen Cor

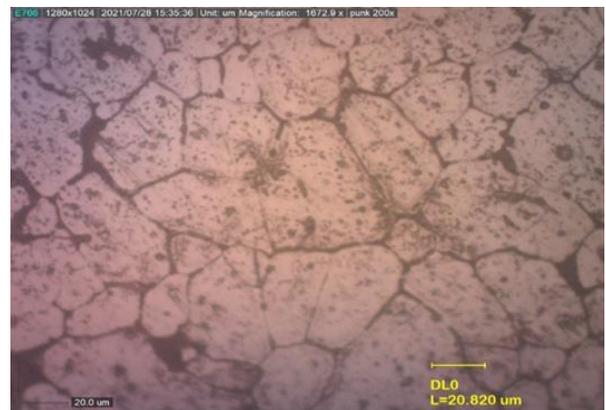
No	Putaran Cetakan (rpm)	Titik identasi (Rockwell)					Rata – rata Kekerasan spesimen (HRH)
		1	2	3	4	5	
1	400	92	92,5	95	91,5	98	93,8
2	800	95	94	92,5	98	98,5	95,6
3	1200	95,5	96	94	98	99	96,5

Hasil dan Rekapitulasi Pengujian Struktur Mikro

a. Spesimen Pengecoran Sentrifugal Putaran Cetakan 400 rpm

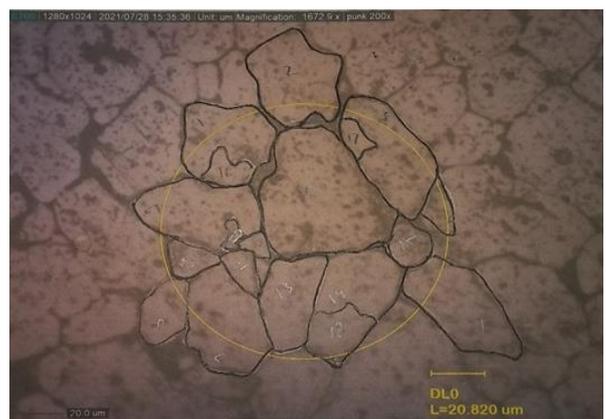
1. Data Pengujian

- Spesimen : Pengecoran Sentrifugal 400 rpm
- Jenis Alat : Mikroskop Optik (Nikon)
- Perbesaran lensa : 200 x
- Metode Uji : Planimetri (*Jefferies*)



Gambar 3.21. Struktur Mikro Spesimen Kecepatan Putaran 400 rpm

2. Perhitungan Ukuran Butir Menggunakan Metode Planimetri (*Jefferies*)



Gambar 3.22. Analisa Struktur Mikro Spesimen Kecepatan Putaran 400 rpm Metode Planimetri (*Jefferies*).

Setelah dianalisa butir struktur mikro spesimen cor putaran 400 rpm diperoleh $n_1 = 11$ (jumlah butir dalam lingkaran) dan $n_2 = 9$ (jumlah butir yang bersinggungan dengan garis lingkaran). Pembesaran Spesimen Uji $N = (200x)$, sehingga didapat $f = (8)$ sesuai dengan tabel (penggali *Jefferies*).

$$- Na = f \left[n_1 + \frac{n_2}{2} \right]$$

$$Na = 8 \left[11 + \frac{9}{2} \right]$$

$$Na = 124$$

$$- G = [3,32 \log(Na) - 2,95]$$

$$G = [3,32 \log(124) - 2,95]$$

$$G = 3,99$$

Perhitungan besar butir struktur mikro dengan Metode Planimetri (*Jefferies*) diatas setelah disesuaikan dengan tabel ASTM E – 112 diperoleh nilai $G = 4,0$ untuk spesimen cor dengan kecepatan putaran cetakan 400 rpm. Sehingga diperoleh hasil dari penyesuaian yang diperoleh dari tabel ASTM E – 112 sesuai dengan hasil nilai $G = 4,0$:

Tabel 3.5 Penyesuaian tabel ASTM E – 112 nilai G spesimen cor 400 rpm

ASTM micro- grain size number G	"Diameter" of average grain section		Average intercept distance L_n , mm	Intercept count per mm, N_n	Area of av- erage grain section, A_n mm ²	Calculated no. of grains per mm ² , N_c	Average	
	Nominal d_n , mm	Feret's d_n mm					Grains per mm ² at 100X, N_{100}	Grains per mm ² , N_s
4.0	90	101	80.0	12.5	8.07	1105	124	8.000

b. Rekapitulasi Pengujian Pengujian Struktur Mikro dengan Metode Planimetri (*Jefferies*).

Tabel 3.6. Rekapitulasi Hasil Pengujian Struktur Mikro Metode Planimetri (*Jefferies*)

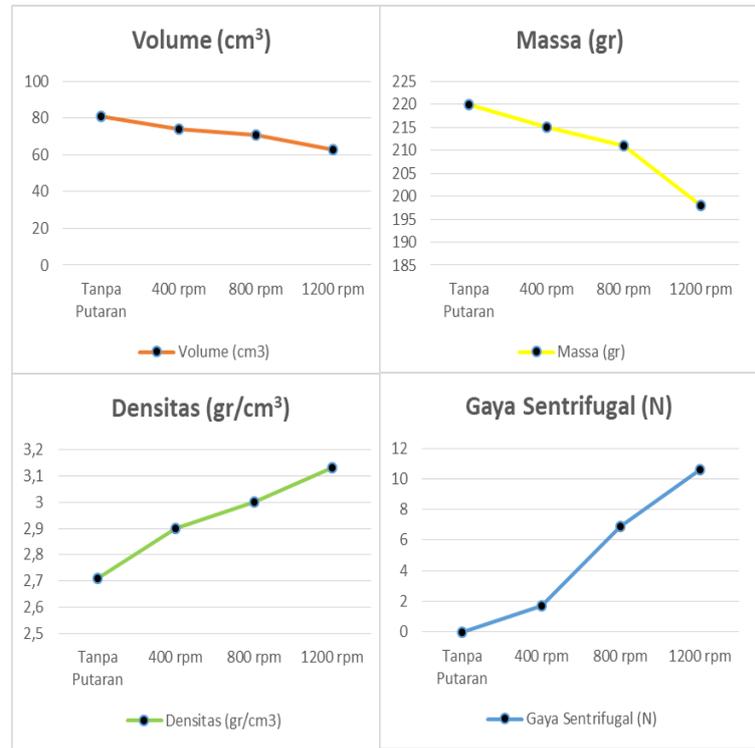
No	Spesimen Uji (rpm)	Nilai G	Diameter butir rata - rata (dn) ASTM E – 112 (µm)
1	400	4,0	90
2	800	5,0	65
3	1200	6,0	45

Analisa Hasil Perhitungan Volume Densitas dan Gaya Sentrifugal Spesimen Cor Sentrifugal

Setelah dilakukan proses pengecoran, spesimen pengecoran dilakukan perhitungan volume, densitas dan gaya sentrifugal. Berikut adalah data hasil perhitungan :

Tabel 3.7. Hasil Perhitungan Volume Densitas dan Gaya Sentrifugal

No	Putaran Cetakan (rpm)	Massa (Gram)	Volume (cm ³)	Densitas (gr/cm ³)	Gaya Sentrifugal (N)
1	Tanpa Putaran	220	81,14	2,71	-
2	400	215	74,1	2,9	$1,7 \times 10^5$
3	800	211	70,8	3	$6,9 \times 10^5$
4	1200	198	63,1	3,13	$10,6 \times 10^5$



Grafik 3.1. Analisa Hasil Perhitungan Volume Densitas dan Gaya Sentrifugal Spesimen Cor Sentrifugal

Dari **grafik 3.1.** grafik analisa hasil perhitungan volume densitas dan gaya sentrifugal spesimen pengecoran sentrifugal dapat dilihat bahwa semakin cepat putaran cetakan, massa (gr) dan volume (cm³) spesimen pengecoran mengalami penurunan. Sedangkan jika dilihat pada grafik densitas (gr/cm³) dan gaya sentrifugal (N) semakin kencang putaran cetakan maka densitas dan gaya sentrifugal mengalami kenaikan.

Hal ini terjadi karena semakin kencang putaran yang terjadi maka semakin besar gaya sentrifugal yang diberikan oleh putaran cetakan. Dengan adanya gaya sentrifugal yang semakin besar pada variasi kecepatan putaran cetakan, maka massa dan volume material atau bahan spesimen pengecoran mengalami gaya sentrifugal yang besar ketika dilakukan proses pengecoran, sehingga massa dan volume spesimen cor mengalami penurunan dari massa dan volume awal perencanaan benda cor karena efek dari gaya sentrifugal yang semakin besar pada kecepatan putaran cetakan (*Mold*).

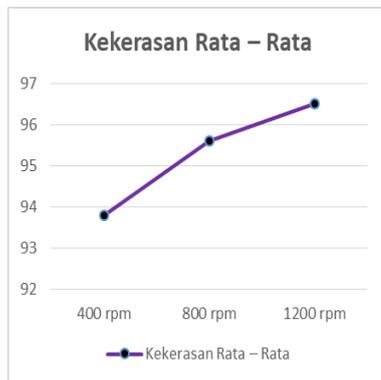
Bahan atau material spesimen pada saat proses pengecoran sentrifugal terkena dampak dari gaya sentrifugal yang diberikan oleh putaran cetakan akan mengalami penurunan massa dan volume, sedangkan spesimen cor mengalami kenaikan densitas. Hal ini terjadi karena jika putaran cetakan dinaikan logam cair yang ikut berputar dalam cetakan (*Mold*) terkena dampak dari gaya sentrifugal yang semakin besar, jika massa dan volume mengalami penurunan maka densitas spesimen cor akan mengalami kenaikan karena perubahan massa dan volume pada spesimen.

Analisa Hasil Pengujian Kekerasan (Rockwell) Spesimen Cor Sentrifugal

Spesimen pengecoran sentrifugal yang telah dilakukan pengujian kekerasan dengan menggunakan metode (*Rockwell*) didapatkan hasil pada tabel berikut ini :

Tabel 3.8. Hasil Pengujian Kekerasan (Rockwell) Spesimen Cor

No	Putaran Cetakan (rpm)	Harga Kekerasan Rata – rata (HRH)
1	400	93,8
2	800	95,6
3	1200	96,5



Grafik 3.2. Analisa Hasil Perhitungan Volume Densitas dan Gaya Sentrifugal Spesimen Cor Sentrifugal

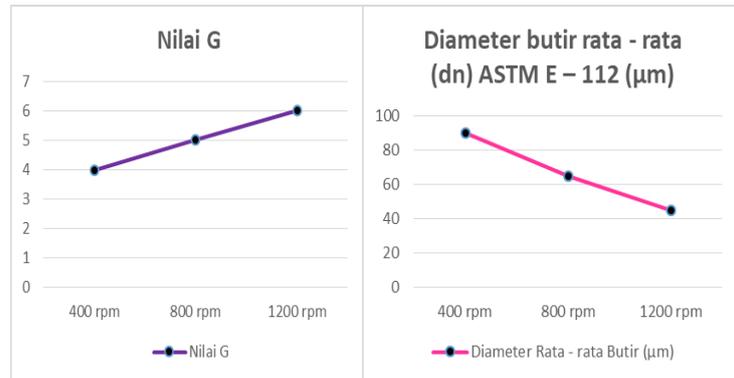
Dari **grafik 3.2.** grafik hasil pengujian kekerasan (*Rockwell*) spesimen cor sentrifugal dapat dilihat bahwa hasil dari pengujian kelima titik masing – masing spesimen cor didapatkan hasil tingkat kekerasan rata – rata yang semakin meningkat. Dengan meningkatnya harga kekerasan spesimen cor mulai dari 400 rpm, 800 rpm dan 1200 rpm, hal ini dapat dilihat pada hasil perhitungan densitas spesimen dimana semakin besar gaya sentrifugal yang terjadi maka densitas pada spesimen pengecoran akan meningkat. Meningkatnya densitas karena gaya sentrifugal pada proses pengecoran sentrifugal menyebabkan sifat fisik pada spesimen cor menjadi semakin padat dan menghasilkan kenaikan tingkat kekerasan pada spesimen pengecoran sentrifugal.

Analisa Hasil Pengujian Struktur Mikro dengan Menggunakan Metode Planimetri (*Jefferies*)

Setelah dilakukan proses pengamatan dan perhitungan ukuran diameter rata – rata butir struktur mikro dengan menggunakan metode planimetri didapatkan hasil pada tabel berikut:

Tabel 3.9. Hasil Pengujian Struktur Mikro dengan Metode Planimetri (*Jefferies*)

No	Spesimen Uji (rpm)	Nilai G	Diameter butir rata - rata (dn) ASTM E – 112 (μm)
1	400	4,0	90
2	800	5,0	65
3	1200	6,0	45



Grafik 3.3. Analisa Hasil Pengujian Struktur Mikro Menggunakan Metode Planimetri (*Jefferies*) Spesimen Cor

Dilihat pada grafik 3.3 analisa hasil pengujian struktur mikro menggunakan metode planimetri (*Jefferies*) pada spesimen pengecoran sentrifugal, didapatkan hasil perhitungan nilai G sesuai dengan penggali (*Jefferies*) perbesaran lensa 200x didapatkan hasil nilai G yang semakin besar. Hal ini disebabkan oleh pada saat melakukan analisa jumlah butir dengan menggunakan lingkaran pada metode planimetri (*Jefferies*) didapatkan hasil jumlah butir struktur mikro yang meningkat pada setiap spesimen pengecoran. Setelah didapatkan hasil nilai G sesuai dengan rumus perhitungan penggali (*Jefferies*), hasil nilai G pada masing – masing spesimen cor disesuaikan dengan rujukan tabel ASTM E – 112. Pada tabel ASTM E – 112 didapatkan spesifikasi butir struktur mikro sesuai dengan nilai G yang didapat dari perhitungan.

Pada grafik 3.3 juga dapat dilihat hasil ukuran diameter rata – rata butir pada masing – masing spesimen sesuai dengan tabel ASTM E -112, dimana ukuran diameter rata – rata butir (dn) pada grafik didapatkan hasil ukuran yang semakin menurun atau mengecil. Hal ini terjadi karena dengan semakin cepatnya putaran pada cetakan maka akan menghasilkan gaya sentrifugal yang semakin besar dan dengan adanya gaya sentrifugal yang semakin besar akan berdampak pada peningkatan kekerasan spesimen, semakin meningkatnya kekerasan karena gaya sentrifugal yang besar sehingga unsur struktur mikro mengalami solidifikasi yang beragam sesuai dengan kecepatan putaran cetakan. Proses solidifikasi yang beragam sesuai dengan kecepatan putaran cetakan dan gaya sentrifugal yang terjadi menyebabkan ukuran butir struktur mikro yang semakin mengecil jika kecepatan putaran pada cetakan ditingkatkan.

4. Kesimpulan

Dari hasil dan pembahasan penelitian yang berjudul Analisa Hasil Pengecoran Sentrifugal Dengan Variasi Kecepatan Putaran (rpm) Material Aluminium 6061 Menggunakan Mesin Prototipe Pengecoran Sentrifugal Horizontal Terhadap Kekerasan dan Striktur Mikro disimpulkan sebagai berikut :

1. Hasil dari pengecoran sentrifugal didapatkan dimensi spesimen yang tidak sesuai dengan dimensi awal perencanaan. Hasil perhitungan volume densitas dan daya sentrifugal spesimen pengecoran sentrifugal dapat dilihat bahwa semakin cepat putaran cetakan, massa (gr) dan volume (cm^3) spesimen pengecoran mengalami penurunan. Sedangkan pada grafik densitas (gr/cm^3) dan gaya sentrifugal (N) semakin kencang putaran cetakan maka densitas dan gaya sentrifugal mengalami kenaikan. Densitas spesimen didapatkan hasil pada putaran 400 rpm ($2,9 \text{ gr}/\text{cm}^3$), 800 rpm ($3 \text{ gr}/\text{cm}^3$), dan 1200 rpm ($3,13 \text{ gr}/\text{cm}^3$).

2. Tingkat kekerasan pada spesimen hasil pengecoran mengalami peningkatan mulai dari putaran cetakan 400 rpm (93,8 HRH), 800 rpm (95,6 HRH) dan 1200 rpm (96,5 HRH). Karena semakin tinggi densitas yang didapat pada spesimen cor berpengaruh terhadap tingkat kekerasan spesimen cor yang semakin meningkat. Hasil pengujian struktur mikro menggunakan metode planimetri (*Jefferies*), spesimen pengecoran sentrifugal didapatkan hasil ukuran diameter rata – rata butir sesuai tabel ASTM E-112 pada kecepatan putaran 400 rpm (90 μm), 800 rpm (65 μm) dan 1200 rpm (45 μm). Proses solidifikasi yang beragam sesuai dengan kecepatan putaran cetakan dan gaya sentrifugal yang terjadi menyebabkan kenaikan tingkat kekerasan dan berpengaruh terhadap ukuran butir struktur mikro yang semakin mengecil.
9. Tarkono, S. Harnowo, dan D. Sewandono. 2013. Pengaruh Variasi Abu Sekam dan Bentotit pada Cetakan Pasir terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Hasil Coran Aluminium AA 1100. *Journal Fema* 1(3): 1-12.
10. Tjitro, S. dan Sugiharto. 2004. Pengaruh Kecepatan Putar pada Proses Pengecoran Aluminium Centrifugal. *Jurnal Teknik Mesin* 6(1): 1-7.
11. Dr. Ir. R. Djoko Andrijono, M.T. (2019) “Materi Cetakan Sentrifugal”. Teknik Mesin Universitas Merdeka Malang

5. Ucapan Terimakasih

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT telah memberikan Rahmat dan Karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Artikel Tugas Akhir ini semoga apa yang dibahas pada artikel ini bermanfaat. Serta penulis mengucapkan banyak terima kasih pada Universitas Merdeka Malang, Fakultas Teknik Khususnya Dosen Pembimbing dan seluruh Dosen jurusan Teknik Mesin. Serta teman-teman angkatan 2017.

Referensi

1. Atmadja, S. T. 2006. Analisa Cacat Cor pada Proses Pengecoran Burner Kompor. *Jurnal Rotasi* 8 (3): 41-46.
2. Sugiarto, T. O. dan M. W. W. Jamasri. 2014. Analisis Distribusi Ketebalan dan Kekerasan Hasil Coran Sentrifugal Aluminium Paduan (Al-Si-Mg) Akibat Perubahan Laju Putaran dan Kemiringan Sumbu Cetakan. *Journal Of Environmental Engineering & Sustainable Technology* 1(1): 13-20.
3. Sudjana, H. 2008. Teknik Pengecoran Logam (Jilid II). Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional.
4. Situngkir, H. 2009. Pengaruh Putaran Cetakan terhadap Sifat Mekanik Besi Cor Kelabu pada Pembuatan Silinder Linier Mesin Otomotif dengan Pengecoran Sentrifugal Mendatar. *Jurnal Dinamis* 2(4): 19-28.
5. Sugiarto, T. O. dan M. W. W. Jamasri. 2014. Analisis Distribusi Ketebalan dan Kekerasan Hasil Coran Sentrifugal Aluminium Paduan (Al-Si-Mg) Akibat Perubahan Laju Putaran dan Kemiringan Sumbu Cetakan. *Journal Of Environmental Engineering & Sustainable Technology* 1(1): 13-20.
6. Sugiyono. 2017. Metode Penelitian Pendidikan Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D. Bandung: Penerbit Alfabeta.
7. Surdia, T. dan K. Chijiwa. 1986. Teknik Pengecoran Logam. Jakarta: Pradnya Paramita.
8. Surdia, T. dan S. Saito. 1999. Pengetahuan Bahan Teknik. Jakarta: Pradnya Paramita.