

PENGARUH TEMPERATUR *REHEATING* DAN JENIS *BILLET* PADA PROSES SSF *THIXOCASTING* PADA PADUAN AI-18Si

Djoeli Satrijo¹⁾

Abstrak

Proses *Semi-Solid Forming* (SSF) merupakan salah satu alternatif proses pembentukan logam yang sedang banyak dikembangkan karena proses ini banyak memberikan keuntungan jika dibandingkan dengan teknik pengecoran biasa atau tempa konvensional. Ada tiga tahapan penting dalam proses SSF *thixocasting*, yaitu pembuatan *billet* berstruktur non-dendritik, pemanasan kembali (*reheating*) dan pembentukan produk akhir.

Tujuan dari penelitian ini adalah meneliti apakah proses SSF dengan jalur *thixocasting* pada paduan AI-18Si dapat dilakukan dengan peralatan skala laboratorium yang lebih sederhana. Dalam penelitian ini telah dilakukan percobaan proses *reheating* pada *billet* tipe A dan tipe B dengan variasi temperatur *reheating* dan waktu penahanan, selain itu juga telah dilakukan percobaan pembuatan *prototype* piston pada *billet* tipe A dan tipe B dengan temperatur *reheating* 594°C dan 597°C untuk mengetahui kecenderungan jenis *billet* dan temperatur *reheating* pada proses SSF *thixocasting*.

Hasil pengukuran volume memperlihatkan kecenderungan bahwa *billet* tipe A memiliki mampu alir yang lebih baik daripada *billet* tipe B dan kecenderungan bahwa pada temperatur *reheating* 597°C memiliki fraksi solid yang lebih kecil dibandingkan pada temperatur *reheating* 594°C. Hasil pengujian kekerasan memperlihatkan bahwa terdapat peningkatan derajat kekerasan sekitar 28%-55% yaitu dari 61,13 HBN menjadi 78,25-95,10 HBN untuk *billet* tipe A dan sekitar 10%-26% yaitu dari 73,83 HBN menjadi 81,58-93,20 HBN untuk *billet* tipe B.

Kata kunci: SSF, *thixocasting*, *billet* berstruktur non-dendritik, temperatur *reheating*, mampu alir, fraksi solid

PENDAHULUAN

Hipotesa-hipotesa tentang proses *Semi-Solid Forming* (SSF) menjelaskan bahwa teknik pembentukan ini memiliki banyak kelebihan. Aliran laminar yang terjadi pada saat material diinjeksikan ke dalam cetakan dapat mereduksi gas yang terjebak dalam cetakan sehingga porositas yang terbentuk pada produk hasil SSF sangat sedikit bila dibandingkan proses pengecoran biasa. Aliran laminar juga dapat mengisi celah-celah yang sempit dalam cetakan, hal ini sangat dibutuhkan pada pembuatan komponen otomotif. Selain itu, temperatur kerja proses SSF lebih rendah dari pengecoran biasa, hal ini dapat memperpanjang umur peralatan (*tool life*) karena *thermal stress* yang terjadi lebih sedikit. Temperatur kerja yang mendekati garis *solidus* menyebabkan penyusutan yang terjadi pada produk hasil SSF lebih kecil dibanding produk coran biasa. Produk yang dihasilkan juga memiliki sifat-sifat mekanik yang baik, karena struktur butirnya non-dendritik. Selain itu, proses ini memerlukan gaya yang lebih kecil dibandingkan dengan proses tempa konvensional (Z Fan, 2002).

Dikarenakan krisis energi pada tahun 1970-an, dan peningkatan perhatian terhadap kelestarian lingkungan sejak tahun 1980-an, pasar kendaraan bermotor memberikan tekanan yang sangat besar untuk menggunakan logam ringan tetapi kuat guna

mengurangi bobot kendaraan. Sehingga pada tahun 1990-an, SSF difokuskan pada paduan aluminium.

Ada dua jalur dalam proses *semisolid forming*, yaitu *rheo-route* dan *thixo-route*. *Thixo-route* sendiri dapat dibedakan menjadi empat macam yaitu *Thixocasting*, *Thixoforging*, *Thixo transverse impact extrusion*, *Thixoextrusion* (Reinerkopp, 1999).

Untuk mengetahui apakah proses SSF dapat dilakukan dengan peralatan skala laboratorium yang lebih sederhana serta untuk mengetahui kecenderungan hubungan antara parameter yang berbeda terhadap proses pembentukan produk maka dalam penelitian ini jalur *thixocasting* dipilih karena dapat membentuk produk atau komponen yang bermacam-macam, selain itu karena pertimbangan ekonomi dan keterbatasan peralatan pendukung.

DASAR TEORI

Selama ini pembuatan piston kendaraan bermotor menggunakan teknik pengecoran biasa, dan akan lebih menguntungkan apabila piston diproduksi dengan teknologi proses *semi-solid forming* karena kelebihan-kelebihan yang dimiliki teknik tersebut. Teknologi proses *semi-solid forming* (SSF) adalah proses pembentukan produk dimana materialnya berada pada kondisi *semisolid* dan berstruktur non-dendritik. Kondisi *semisolid* merupakan kondisi suatu paduan dimana terdapat fasa padat dan fasa cair. Larutan *semisolid* terdiri dari dua kelompok besar, yaitu (Z Fan, 2002):

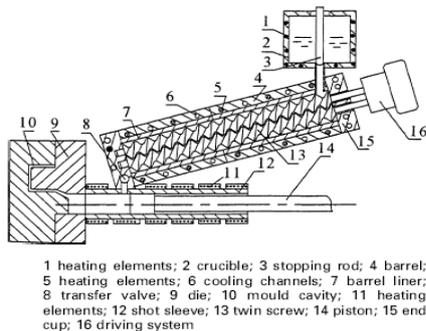
- a. Larutan menyerupai cairan (*liquid-like*) yang mengandung partikel padat terdispersi dan bersifat seperti cairan jika diberi gaya dari luar.

¹⁾ Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin FT-UNDIP

- b. Larutan menyerupai padat (*solid-like*) yang mengandung fasa padat berkaitan dan bersifat seperti padat, memiliki tegangan luluh yang cukup baik.

Proses *semisolid forming* (SSF) membutuhkan material yang berstruktur *non-dendritik* karena struktur *non-dendritik* dapat mengurangi tegangan geser yang terjadi. Pada *fraksi solid* yang sama, material yang berstruktur *dendritik* mempunyai viskositas jauh lebih tinggi dibandingkan material yang berstruktur *non-dendritik* (M Findon, 2003). Hal ini yang menyebabkan material yang berstruktur *non-dendritik* lebih mudah dibentuk daripada material yang berstruktur *dendritik*. Selain itu material yang berstruktur *non-dendritik* mempunyai kekuatan mekanik yang lebih tinggi dibanding material yang berstruktur *dendritik*. Hal ini karena struktur butir material *non-dendritik* lebih rapat dibanding struktur butir material *dendritik* (M Findon, 2003).

Secara umum proses *semi-solid forming* dapat dibagi menjadi dua jalur, yaitu *rheo-route* dan *thixo-route*. Jalur *rheo-route* meliputi pemberian agitasi yang berupa tegangan geser terhadap logam cair selama proses solidifikasi (pembentukan struktur *non-dendritik*) dan menuangkan secara langsung logam cair tersebut ke dalam cetakan sebagai pembentukan komponen. Secara skematik jalur *rheo-route* dapat dilihat pada gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Diagram skematik *rheo-route*.

Sedangkan jalur *thixo-route* dapat dibagi menjadi tiga tahap proses, meliputi proses pembuatan *billet* (*feedstock*) berstruktur *non-dendritik*, memanaskan kembali (*reheating*) *billet* pada kondisi *semisolid*, pembentukan produk secara *thixoforming*.

• Billet Berstruktur Non Dendritik

Proses pembuatan *billet* berstruktur *non-dendritik* diperoleh dengan memanipulasi proses pembekuan. Tujuan dari pembuatan *billet* tersebut adalah untuk mempersiapkan material yang memiliki struktur *non-dendritik* pada fasa primer dengan ukuran butir yang halus, yang tersebar secara merata dalam matriks cairan dan memiliki temperatur leleh yang rendah.

Salah satu metode pembentukan material berstruktur *non-dendritik* adalah dengan pemberian agitasi mekanik dengan *mechanical stirring*. (Z Fan, 2002)

• Reheating

Tahap kedua dari proses *thixoforming* adalah proses pemanasan kembali (*reheating*) *billet* pada temperatur *semisolid*-nya. Hal ini dimaksudkan untuk menyediakan bahan *semisolid* dengan *fraksi solid* terkontrol yang berbentuk *globular* serta terdispersi secara seragam di dalam matriks cairan dan memiliki titik lebur yang rendah. Untuk mendapatkan mikrostruktur *semisolid* seperti ini, parameter proses yang penting pada saat proses *reheating* adalah temperatur *reheating* dan waktu penahanan (*holding time*). Temperatur *reheating* dipengaruhi oleh komposisi paduan, sedangkan waktu penahanan dipengaruhi oleh daya heater atau tungku dan ukuran *billet*. Pada temperatur *reheating* yang lebih tinggi akan menghasilkan *fraksi solid* yang lebih kecil, sedangkan pada temperatur *reheating* yang lebih rendah akan menghasilkan *fraksi solid* yang lebih besar (Z Fan, 2002).

Temperatur *reheating* yang terlalu tinggi menyebabkan ketidakstabilan bentuk dari bahan yang berakibat kesulitan pada penanganan bahan, selain itu tingginya temperatur *reheating* juga akan menyebabkan mudahnya terbentuk aliran *turbulen* pada saat proses pembentukan. Sebaliknya, temperatur *reheating* yang terlalu rendah akan mengakibatkan *unmelted* atau *billet* masih memiliki fraksi padat yang sangat banyak sehingga dapat merusak atau mengganggu sifat *rheologi billet* saat diinjeksikan ke dalam cetakan serta dapat berpengaruh pada sifat mekanik produk.

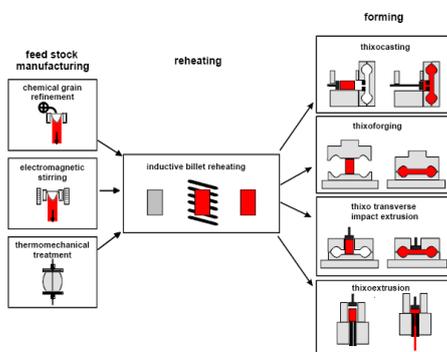
Fraksi solid suatu paduan sebagai fungsi temperatur, dapat dievaluasi secara langsung atau melihat pengaruhnya pada sifat fisik dengan metode-metode berikut (E Tzimas, 2000):

- Penggunaan data *thermodynamic* (keseimbangan diagram fasa).
- Teknik analisis *thermal*.
- Analisis *metallography* secara kuantitatif pada mikrostruktur *quenched* dari bahan *semisolid*.

Waktu penahanan juga merupakan hal yang penting dalam proses *reheating* karena berpengaruh pada keseragaman temperatur. Apabila distribusi temperatur tidak seragam, maka dapat menyebabkan fluktuasi pada *fraksi solid* dan merusak karakteristik *rheologi*, menyebabkan pemisahan fasa *solid* dan *liquid* yang menyebabkan kesulitan saat diinjeksikan ke dalam cetakan. Selain itu waktu penahanan yang terlalu cepat akan menyebabkan partikel *solid* tidak berbentuk *spheris* sempurna. Jika waktu penahanannya terlalu lama akan menyebabkan *struktural coarsening* (pengkasaran struktur) dan pertumbuhan inti baru dari fasa cairnya.

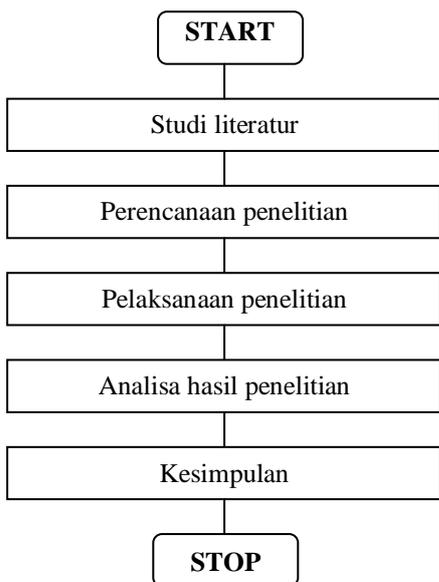
● **Pembuatan Produk Akhir**

Thixofforming dibedakan menjadi empat sesuai dengan cara pembentukan produk akhir yang digunakan. *Thixocasting*, apabila proses pembentukan produk akhir dilakukan dengan menginjeksikan *billet* melalui nosel sebelum masuk kedalam cetakan tertutup (*closed die*). *Thixoforging*, apabila proses pembentukan produk akhir dilakukan dengan meletakkan *billet* pada cetakan terbuka (*open die*) kemudian menekan cetakan tersebut hingga produk terbentuk. *Thixo transverse impact extrusion*, apabila proses pembentukan produk akhir dilakukan dengan meletakkan *billet* pada cetakan tertutup (*closed die*) kemudian menekan *billet* tersebut hingga terbentuk produk yang diinginkan. *Thixoextrusion*, apabila proses pembentukan produk akhir dilakukan dengan menginjeksikan *billet* melalui nosel tanpa adanya cetakan. Keempat metode ini secara skematik dijelaskan pada gambar 2 dibawah ini.



Gambar 2. Diagram skematik proses *thixofforming*. [ref.12 hal.1]

METODOLOGI DAN PELAKSANAAN PENELITIAN



Gambar 3. Diagram alir penelitian

● **Percobaan Pembuatan Billet dengan Struktur Non Dendritik**

Pada penelitian kali ini, pembuatan *billet* dengan struktur *non-dendritik* menggunakan metode pemberian agitasi dengan *mechanical stirring*, karena penelitian yang dilakukan oleh Seno Zaenal M dan Heru Tri P telah membuktikan bahwa pemberian agitasi dengan *mechanical stirring* dapat membuat *billet* dengan struktur *non-dendritik*. Hasil penelitian tersebut digunakan untuk menentukan jenis perlakuan *billet* Al-18Si yang digunakan sebagai *feedstock*. Terdapat 6 jenis *billet* yang berbeda (Seno ZM, 2005), tetapi hanya diambil 2 jenis *billet* yang paling berbeda yang digunakan sebagai *feedstock* yaitu *billet* tipe A (*billet* yang diagitasi pada temperatur 600°C sampai 570°C dengan kecepatan poros 1200 rpm selama 12 menit) dan tipe B (*billet* yang diagitasi pada temperatur 600°C sampai 570°C dengan kecepatan poros 1200 rpm selama 36 menit). Tipe *billet* B dipilih karena memiliki bentuk butir yang paling mendekati bulat (SF=1,195) dan memiliki ukuran butir yang paling kecil (Bilangan Besar Butir=1,652), dan derajat kekerasannya menempati urutan kedua (73,83HBN). Sedangkan tipe *billet* A dipilih karena memiliki bentuk butir yang paling menjauhi dari bentuk bulat (SF=1,661) dan memiliki ukuran butir yang paling besar (Bilangan Besar Butir=0,921), dan derajat kekerasannya menempati urutan paling rendah (61,13HBN).

● **Percobaan Proses Reheating di Tungku Hofmann**

Percobaan proses *reheating* di dalam tungku Hofmann dilakukan sebelum proses *reheating* pada peralatan *thixocasting*, hal ini dilakukan untuk mendapatkan parameter temperatur *reheating* dan *holding time* yang tepat. Temperatur *reheating* direncanakan berdasarkan kurva pendinginan Al-18Si dan temperatur pengagitasi saat pembuatan *billet* yaitu 600°C sampai 570°C. Dari kurva pendinginan Al-18Si didapatkan temperatur lebur material uji sebesar 586 °C dan temperatur bekunya sebesar 532 °C, sehingga dapat dipastikan bahwa *range* temperatur 570°C sampai 580°C berada pada daerah dua fasa dari paduan Al-18Si.

Waktu penahanan ditentukan berdasarkan perbandingan antara waktu penahanan dan waktu pemanasan dari penelitian-penelitian yang ada, perbandingan tersebut berkisar antara 1,2 sampai 1,4. Waktu pemanasan yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur 580°C didalam tungku Hofmann adalah 66 menit, selanjutnya dipilih waktu penahanan 1,3 lebih lama dari waktu pemanasannya yaitu sebesar 86 menit. Agar temperatur *billet* lebih seragam maka waktu penahanan ditentukan sebesar 90 menit.

Untuk mengetahui temperatur *reheating* dan waktu penahanan yang optimal maka dilakukan beberapa kali percobaan pembelahan *billet* dengan sebilah pisau. *Billet* tipe A dicoba pada T=580°C dan t=90menit, T=570°C dan t=90menit, T=570°C dan t=120menit, T=575°C dan t=120menit, T=573°C dan t=120menit, T=572°C dan t=120menit, T=572°C dan

t=240menit. *Billet* tipe B dicoba pada T=575°C dan t=120menit, T=572°C dan t=120menit, T=570°C dan t=120menit, T=572°C dan t=240menit. Dari percobaan-percobaan *reheating* didalam tungku Hofmann pada *billet* tipe A dan tipe B didapat parameter yang optimal yaitu pada temperatur *reheating* T=572°C dan waktu penahanan t=120 menit.

● **Percobaan Proses Reheating Pada Peralatan Thixocasting**

Pada awalnya percobaan ini dilakukan untuk memastikan bahwa parameter yang didapat pada percobaan *reheating* didalam tungku Hofmann dapat digunakan untuk proses SSF pada instalasi *thixocasting* yang ada. Akan tetapi pada saat percobaan terdapat perbedaan kondisi *billet* saat di-*reheating* didalam tungku Hofmann dan *billet* saat di-*reheating* didalam heater peralatan *thixocasting* pada parameter yang sama. *Billet* cenderung masih dalam kondisi padat saat di-*reheating* didalam heater peralatan *thixocasting*, sehingga dilakukan beberapa percobaan untuk menentukan parameter *reheating* yang optimal untuk proses selanjutnya. Percobaan dilakukan pada T=580°C dan t=120menit, T=590°C dan t=120menit, T=600°C dan t=120menit, T=594°C dan t=120menit, T=597°C dan t=120menit. Dari percobaan-percobaan *reheating* didalam heater peralatan *thixocasting* ditentukan parameter *reheating* yaitu pada temperatur *reheating* T=594°C (mewakili *fraksi solid* yang lebih banyak) dan T=597°C (mewakili *fraksi solid* yang lebih sedikit) serta waktu penahanan t=120 menit.

● **Percobaan Pembuatan Prototype Piston**

Setelah mendapatkan jenis perlakuan *billet* yang akan dijadikan *feedstock* (*billet* tipe A dan tipe B) dan parameter *reheating* pada T=594°C dan t=120 menit serta T=597°C dan t=120 menit, maka langkah selanjutnya menentukan diameter nosel yang akan digunakan. Diameter nosel ditentukan berdasarkan rasio reduksi penampang lintang sebesar 4 sampai 5, artinya $4 \leq (D_o/D_f) \leq 5$. Dimana D_o adalah diameter dies (*chamber*) yang besarnya 35 mm dan D_f adalah diameter nosel. Didapat diameter nosel dalam penelitian ini 7mm, 8mm dan 9mm.

Agar tidak terjadi tertukarnya material uji, dan untuk memudahkan dalam penyebutan material, maka disusun kodefikasi yang disajikan pada tabel dibawah ini.

Tabel 1. Kode spesimen dan variasi perlakuan

Kode Spesimen	variasi perlakuan
A.7.594	<i>Thixocasting billet</i> tipe A dengan diameter nosel 7 mm dan temperatur <i>reheating</i> 594°C, t=120 menit.
A.7.597	<i>Thixocasting billet</i> tipe A dengan diameter nosel 7 mm dan temperatur <i>reheating</i> 597°C, t=120 menit.
A.8.594	<i>Thixocasting billet</i> tipe A dengan diameter nosel 8 mm dan temperatur <i>reheating</i> 594°C, t=120 menit.
A.8.597	<i>Thixocasting billet</i> tipe A dengan diameter nosel 8 mm dan temperatur <i>reheating</i> 597°C, t=120 menit.
A.9.594	<i>Thixocasting billet</i> tipe A dengan diameter nosel 9 mm dan temperatur <i>reheating</i> 594°C, t=120 menit.
A.9.597	<i>Thixocasting billet</i> tipe A dengan diameter nosel 9 mm dan temperatur <i>reheating</i> 597°C, t=120 menit.
B.7.594	<i>Thixocasting billet</i> tipe B dengan diameter nosel 7 mm dan temperatur <i>reheating</i> 594°C, t=120 menit.
B.7.597	<i>Thixocasting billet</i> tipe B dengan diameter nosel 7 mm dan temperatur <i>reheating</i> 597°C, t=120 menit.
B.8.594	<i>Thixocasting billet</i> tipe B dengan diameter nosel 8 mm dan temperatur <i>reheating</i> 594°C, t=120 menit.
B.8.597	<i>Thixocasting billet</i> tipe B dengan diameter nosel 8 mm dan temperatur <i>reheating</i> 597°C, t=120 menit.
B.9.594	<i>Thixocasting billet</i> tipe B dengan diameter nosel 9 mm dan temperatur <i>reheating</i> 594°C, t=120 menit.
B.9.597	<i>Thixocasting billet</i> tipe B dengan diameter nosel 9 mm dan temperatur <i>reheating</i> 597°C, t=120 menit.

Percobaan pembuatan *prototype* piston dilakukan dengan 2 kali proses pemanasan dan 2 kali proses injeksi karena keterbatasan instalasi *thixocasting* yang tidak dapat mengejar transien temperatur sehingga pada proses injeksi yang pertama *billet* hanya sampai nosel.

DATA PRODUK AKHIR DAN ANALISA HASIL PENELITIAN

● **Data Volum Spesimen**

Hasil pengukuran volum spesimen dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

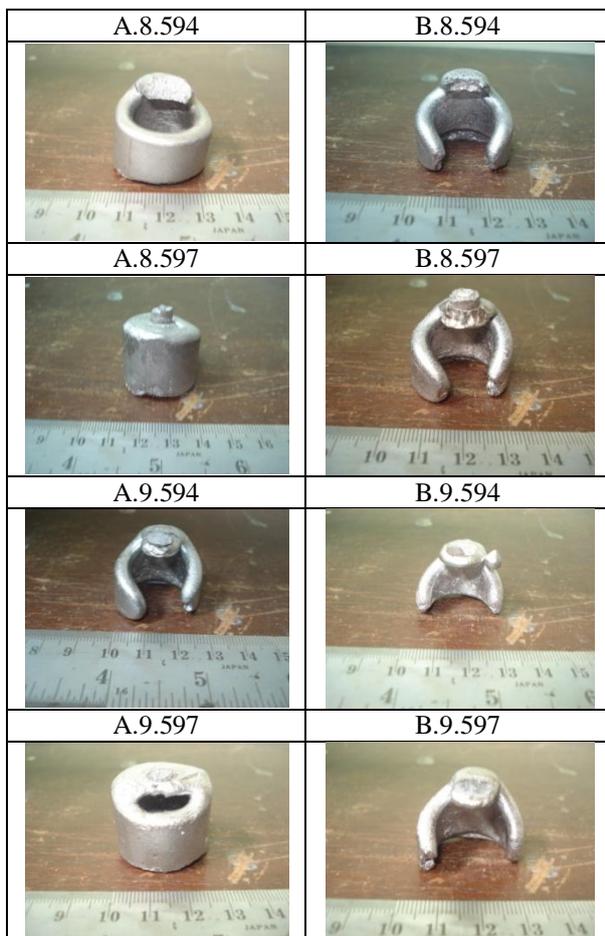
Tabel 2. Volum spesimen pada berbagai parameter

NO	Kode Spesimen	Volume Produk (ml)	Volume Cetakan (ml)	Persentase Mampu Alir (%)
1	A.8.594	7,0	12,40	56,45
2	A.8.597	10,0	12,40	80,65
3	A.9.594	5,5	12,40	44,35
4	A.9.597	8,5	12,40	68,55
5	B.8.594	5,0	12,40	40,32
6	B.8.597	6,0	12,40	48,39
7	B.9.594	3,5	12,40	28,23
8	B.9.597	4,0	12,40	32,26

Data persentase mampu alir pada tabel diatas didapat dengan membandingkan volum spesimen dan volum rongga cetakan, dimana volum rongga cetakan adalah 12,4 ml.

Untuk gambar spesimen dari semua jenis perlakuan disajikan pada tabel berikut:

Tabel 3. Gambar spesimen untuk setiap jenis perlakuan



• Data Derajat Kekerasan Makro Spesimen Uji

Pengujian kekerasan dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fisik Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, dengan menggunakan standar *Rockwell* skala F dengan diameter *identor* 1/16 inci

(1,5875 mm) dan beban 60 kgf (588,4 N) terhadap beberapa spesimen yang mengalami perlakuan yang berbeda. Data hasil pengujian kekerasan tersebut disajikan pada tabel dibawah ini.

Tabel 4. Hasil pengujian kekerasan tiap spesimen menurut standar *Rockwell* skala F

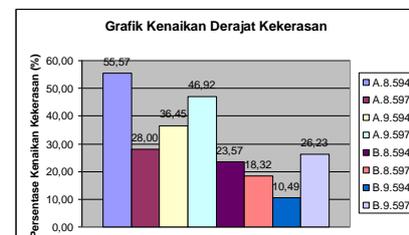
N O	Spesimen	Pengambilan Data			HRF
		1	2	3	
1	A.8.594	86,0	90,5	90,5	89,00
2	A.8.597	82,0	81,0	77,5	80,17
3	A.9.594	83,0	84,0	83,0	83,33
4	A.9.597	84,0	87,0	88,5	86,50
5	B.8.594	86,5	89,5	85,5	87,17
6	B.8.597	86,0	86,5	83,5	85,33
7	B.9.594	82,0	82,0	85,5	83,17
8	B.9.597	88,5	86,5	89,0	88,00

Tabel 5. Derajat kekerasan tiap spesimen yang dikonversikan pada standar *Vickers* dan standar *Brinell*

N O	Spesimen	HRF	HVN	HBN
1	A.8.594	89,00	100,00	95,10
2	A.8.597	80,17	82,28	78,25
3	A.9.594	83,33	87,71	83,41
4	A.9.597	86,50	94,44	89,81
5	B.8.594	87,17	95,93	91,23
6	B.8.597	85,33	91,86	87,36
7	B.9.594	83,17	85,78	81,58
8	B.9.597	88,00	98,00	93,20

Tabel 6. Hasil pengujian kekerasan *billet* sebelum di *reheating* dan coran Al-18Si tanpa di agitasi

Tipe Billet	HBN
Al-18Si as Cast	62,58
billet agitasi 12 menit (A)	61,13
billet agitasi 36 menit (B)	73,83



Gambar 4. Grafik kenaikan derajat kekerasan

Dari data pada tabel 5 dan tabel 6 diatas membuktikan bahwa proses *thixocasting* dapat menaikkan derajat kekerasan dari *billet* yang diproses. Data persentase kenaikan kekerasan (gambar 4) didapat

dengan membandingkan kekerasan spesimen uji dan kekerasan *billet* sebelum masuk proses *reheating*, dimana kekerasan *billet* untuk tipe A sebesar 61,13 HBN dan untuk tipe B sebesar 73,83 HBN.

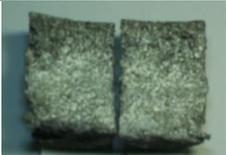
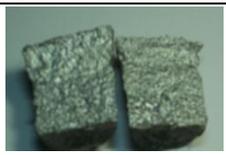
● **Korelasi Kecenderungan Hasil Penelitian**

Ketika percobaan proses *reheating billet* dengan menggunakan tungku Hofmann, percobaan dilakukan pada beberapa temperatur *reheating* dan *holding time*. Pada awalnya hal ini dilakukan untuk mencari parameter temperatur *reheating* dan waktu penahanan (*holding time*) yang optimal pada *billet* berstruktur *non-dendritik* paduan Al-18Si untuk diameter *billet* 32 mm dan panjang *billet* 30 mm. Akan tetapi dengan percobaan-percobaan tersebut didapatkan beberapa kecenderungan dari jenis *billet* terhadap proses *reheating*, temperatur *reheating* terhadap kondisi *semisolid (fraksi solid billet)* dan pengaruh *holding time* terhadap kondisi *semisolid billet*.

1. *Pengaruh temperatur reheating terhadap fraksi solid.*

Untuk mengetahui kecenderungan temperatur *reheating* terhadap keadaan *billet* atau *fraksi solid billet* dapat dilihat dari hasil percobaan *reheating* didalam tungku Hofmann pada *billet* tipe B dengan temperatur *reheating* 570°C, 572°C, 573°C, 575°C dan waktu penahanan yang sama yaitu 120 menit, serta hasil percobaan *reheating* didalam tungku Hofmann pada *billet* tipe A dengan temperatur *reheating* 570°C, 572°C, 575°C dan waktu penahanan yang sama yaitu 120 menit.

Tabel 7. Hasil *reheating* pada *billet* tipe A dan tipe B pada beberapa temperatur *reheating* dan waktu penahanan 120 menit

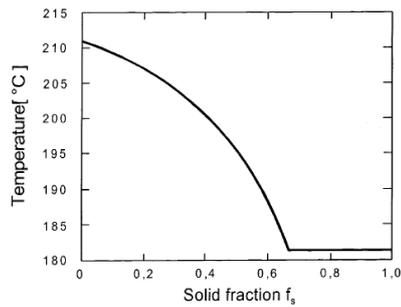
	<i>Billet</i> Tipe A	<i>Billet</i> Tipe B
570°C		
572°C		
573°C		
575°C		

Dari hasil percobaan *reheating* didalam tungku Hofmann pada *billet* tipe A dengan waktu penahanan yang sama yaitu 120 menit, dilihat berdasarkan urutan temperatur *reheating* bahwa pada temperatur *reheating* 572°C *billet* terlihat memiliki fraksi cair lebih banyak dibandingkan pada temperatur *reheating* 570°C. Pada temperatur *reheating* 575°C *billet* terlihat sudah mengalami fenomena kaki gajah, hal ini menunjukkan bahwa fraksi cair pada temperatur *reheating* 575°C lebih dominan dibanding *fraksi solid*-nya.

Dari hasil percobaan *reheating* didalam tungku Hofmann pada *billet* tipe B dengan waktu penahanan yang sama yaitu 120 menit, dilihat berdasarkan urutan temperatur *reheating* bahwa pada temperatur *reheating* 570°C *billet* terlihat masih memiliki ukuran butir yang cukup besar menyerupai butiran pasir, *billet* juga terlihat memiliki fraksi cair yang paling sedikit dibanding *billet* yang di-*reheating* pada temperatur 572°C, 573°C dan 575°C. Pada percobaan *reheating* dengan temperatur *reheating* 572°C ukuran butirnya sudah terlihat kecil, *billet* juga terlihat memiliki fraksi cair yang lebih banyak dibanding *billet* yang di-*reheating* pada temperatur 570°C, tetapi lebih sedikit bila dibandingkan dengan *billet* yang di-*reheating* pada temperatur 573°C. Pada percobaan *reheating* dengan temperatur *reheating* 573°C ukuran butirnya juga sudah terlihat kecil, *billet* terlihat memiliki fraksi cair yang lebih banyak dibanding *billet* yang di-*reheating* pada temperatur 570°C dan 572°C. Sedangkan pada percobaan *reheating* dengan temperatur *reheating* 575°C *billet* sudah mengalami fenomena kaki gajah, hal ini menunjukkan bahwa fraksi cair pada temperatur *reheating* 575°C lebih dominan dibanding *fraksi solid*-nya, keadaan ini menjelaskan bahwa *fraksi solid* pada temperatur *reheating* 575°C paling sedikit dibanding pada temperatur *reheating* 573°C, 572°C dan 570°C.

Dari hasil percobaan *reheating* didalam tungku Hofmann pada *billet* tipe B dengan temperatur *reheating* 570°C, 572°C, 573°C, 575°C dan *billet* tipe A dengan temperatur *reheating* 570°C, 572°C, 575°C serta dengan waktu penahanan yang sama yaitu 120 menit, menunjukkan kecenderungan bahwa semakin tinggi temperatur *reheating* maka semakin kecil *fraksi solid*-nya.

Kecenderungan ini sama dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh M. Modigell dan J. Koke yang menggunakan metode Scheil dengan pendekatan *Thermodynamical* pada paduan Sn-15Pb, hasil penelitian memberikan kecendrungan bahwa *fraksi solid* akan mengecil dengan naiknya temperatur *reheating*, seperti terlihat pada Gambar 5 berikut:

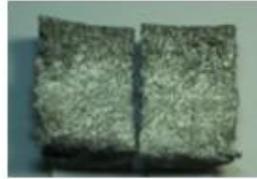


Gambar 5. Kecenderungan fraksi solid terhadap temperatur pada paduan Sn-15Pb. [ref.14 hal.17]

2. *Kecenderungan waktu penahanan (holding time) terhadap keadaan billet.*

Untuk mengetahui kecenderungan waktu penahanan terhadap keadaan *billet* yang sedang di-*reheating* dapat dilihat dari hasil percobaan *reheating* didalam tungku Hofmann pada *billet* tipe B dengan temperatur *reheating* 570°C dan waktu penahanan yang berbeda yaitu 90 menit dan 120 menit.

Tabel 8. Hasil *reheating billet* tipe B pada temperatur *reheating* 570°C dengan variasi waktu penahanan 90 menit dan 120 menit

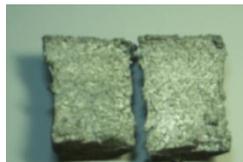
	90 menit	120 menit
570°C		

Dari hasil percobaan *reheating billet* tipe B didalam tungku Hofmann pada temperatur *reheating* 570°C dan waktu penahanan 90 menit terlihat bahwa *billet* belum dapat dibelah dengan baik, hanya bagian bawah *billet* yang sudah berada pada kondisi *semisolid*. Hal ini menunjukkan bahwa waktu penahanan 90 menit belum dapat menyeragamkan temperatur didalam *billet* sehingga hanya sebagian *billet* saja yang sudah mencapai kondisi *semisolid*. Sedangkan dari hasil percobaan *reheating* tipe B pada temperatur *reheating* yang sama tetapi waktu penahanannya 120 menit terlihat bahwa *billet* sudah dapat dibelah dengan mudah karena seluruh bagian *billet* temperturnya telah seragam. Hal ini membuktikan bahwa waktu penahanan yang terlalu cepat akan menyebabkan temperatur *billet* tidak seragam.

Percobaan lain yang dapat memperlihatkan kecenderungan waktu penahanan terhadap kondisi *billet* yang sedang di-*reheating* adalah pada percobaan *reheating billet* tipe A dan tipe B pada temperatur *reheating* 572°C dengan waktu penahanan yang berbeda yaitu 120 menit dan 240 menit. Waktu penahanan 120 menit merupakan waktu penahanan dimana temperatur *billet* telah seragam dan

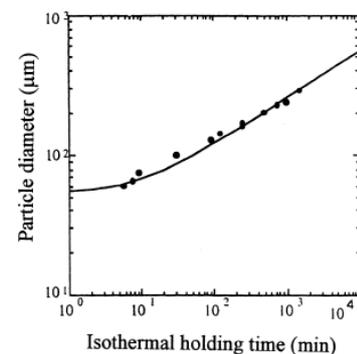
divariasikan dengan dua kali waktu penahanan tersebut, yaitu 240 menit.

Tabel 9. Hasil *reheating billet* tipe A dan tipe B pada temperatur *reheating* 572°C dengan variasi waktu penahanan 120 menit dan 240 menit

	120 menit	240 menit
<i>Billet</i> Tipe A		
<i>Billet</i> Tipe B		

Dari hasil percobaan *reheating* didalam tungku Hofmann pada *billet* tipe A dilihat berdasarkan urutan waktu penahanan terlihat bahwa pada waktu penahanan 120 menit *billet* dapat dibelah dengan mudah, sedangkan bila waktu penahanan diperpanjang menjadi 240 menit, *billet* sudah mengalami fenomena kaki gajah sebelum *billet* dibelah. Hal yang sama juga diperlihatkan pada percobaan *reheating* pada *billet* tipe B dengan parameter yang sama. Percobaan diatas memperlihatkan kecenderungan bahwa dengan penambahan waktu penahanan *billet* akan mengalami fenomena kaki gajah.

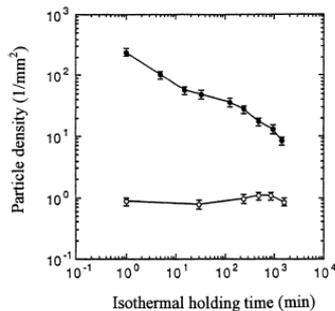
Hasil penelitian yang dilakukan oleh Hong pada paduan Sn-15Pb yang ditunjukkan pada gambar 6 membuktikan bahwa semakin lama waktu penahanan (*holding time*) maka besar butiran akan semakin membesar, hal ini terjadi karena penggabungan inti butiran (*coalescence*) dari fasa padatnya.



Gambar 6. Pengaruh lama waktu penahanan terhadap besar butir pada paduan Sn-15Pb. [ref.4 hal.18]

Penggabungan butiran dari fasa padat ini akan menyebabkan massa dari fasa padat tersebut menjadi besar sehingga fasa padat ini cenderung mendesak fasa cair yang ada dibawahnya. Selain itu hasil penelitian yang dilakukan oleh Loue dan Suery pada paduan

Sn-15Pb yang ditunjukkan pada gambar 7 menunjukkan bahwa penambahan waktu penahanan akan menyebabkan densitas *billet* dengan struktur *non-dendritik* menurun.



Gambar 7. Pengaruh lama waktu penahanan terhadap densitas larutan pada paduan Sn-15Pb. (●) struktur *non-dendritik*, (o) struktur *dendritik*. [ref.4 hal.18]

Dari hipotesa-hipotesa tersebut maka dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan waktu penahanan *billet* cenderung mengalami fenomena kaki gajah.

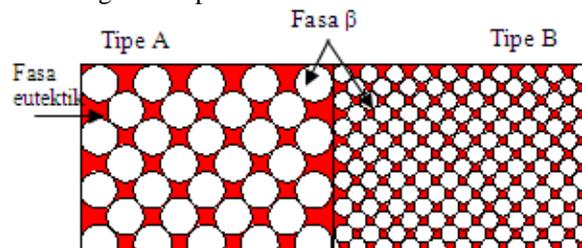
3. Kecenderungan jenis *billet* pada proses *reheating*.

Untuk mengetahui pengaruh jenis *billet* terhadap proses *reheating* dapat dilihat dari hasil percobaan *reheating* didalam tungku Hofmann pada *billet* tipe A dan tipe B dengan parameter temperatur *reheating* dan waktu penahanan yang sama.

Tabel 10. Hasil *reheating* *billet* tipe A dan tipe B pada beberapa parameter temperatur *reheating* dan waktu penahanan

	<i>Billet</i> Tipe A	<i>Billet</i> Tipe B
570°C 120 menit		
572°C 120 menit		
575°C 120 menit		
572°C 240 menit		

Hasil percobaan *reheating* didalam tungku Hofmann pada *billet* tipe A dan tipe B untuk parameter temperatur *reheating* 570°C dan 572°C dengan waktu penahanan 120 menit terlihat bahwa *billet* tipe A cenderung memiliki fraksi cair lebih banyak daripada *billet* tipe B. Hal ini juga terlihat pada percobaan *reheating* dengan parameter temperatur *reheating* 575°C dan waktu penahanan 120 menit dan percobaan *reheating* dengan parameter temperatur *reheating* 572°C dan waktu penahanan 240 menit, dimana *billet* tipe A cenderung memiliki fraksi cair lebih banyak daripada *billet* tipe B yang ditandai dengan besarnya kaki gajah yang terjadi pada *billet* tipe A dibanding dengan *billet* tipe B. Hal ini terjadi karena ukuran butir fasa β (*solid-like*) *billet* tipe B yang lebih kecil dan bentuk butir yang lebih bulat jelas mempunyai kerapatan butir yang lebih tinggi dan hanya memiliki fasa eutektik (*liquid-like*) yang lebih sedikit dibanding *billet* tipe A yang memiliki ukuran butir fasa β (*solid-like*) lebih besar dan bentuk butir yang lebih menjauhi bulat seperti diilustrasikan pada gambar 8, sehingga pada temperatur *reheating* dan waktu penahanan yang sama *billet* tipe A lebih banyak memiliki fasa cair dibanding *billet* tipe B. Dengan kata lain, pada temperatur *reheating* dan waktu penahanan yang sama, *billet* tipe A mempunyai fraksi *solid* yang lebih kecil dibanding *billet* tipe B.

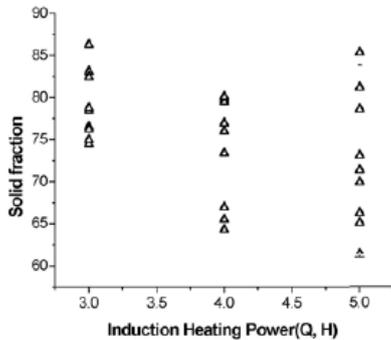


Gambar 8. Fasa eutektik dan fasa β pada *billet* A dan *billet* B

4. Pengaruh pemanas terhadap proses *reheating*.

Pada saat percobaan *reheating* dilakukan, terdapat perbedaan antara parameter proses *reheating* didalam tungku Hofmann dan parameter proses *reheating* didalam heater instalasi *thixocasting*. Pada percobaan *reheating* didalam heater instalasi *thixocasting* dengan temperatur *reheating* 572°C dan waktu penahanan 120 menit *billet* belum dapat dipotong dengan pisau karena kondisi *billet* masih benar-benar padat, pada temperatur *reheating* 580°C dan waktu penahanan 120 menit juga menunjukkan hal yang sama dimana *billet* belum dapat dibelah, kondisi ini sangat berbeda dengan proses *reheating* didalam tungku Hofmann dengan parameter yang sama *billet* sudah mengalami fenomena kaki gajah. Hal ini dikarenakan perbedaan kondisi yang ada antara proses *reheating* yang dilakukan dalam tungku Hofmann dengan proses *reheating* yang dilakukan didalam heater peralatan *thixocasting*. Pada tungku Hofmann, daya operasi yang digunakan sebesar 4,7 kW dan menggunakan sensor temperatur

termokopel NiCr-Ni, sedangkan pada heater peralatan *thixocasting* daya yang digunakan sebesar 2,0 kW dan menggunakan sensor temperatur termokopel tipe K standar. Selain itu, pada peralatan *thixocasting* terdapat rugi-rugi panas yang lebih banyak jika dibandingkan dengan yang terdapat pada tungku Hofmann. Pengaruh pemanas pada proses *reheating billet* ini telah diteliti oleh Taguchi pada paduan A356 yang ditunjukkan pada gambar 9.

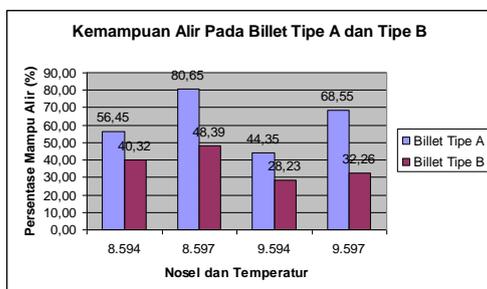


Gambar 9. Hubungan antara *fraksi solid* yang tercapai dengan daya pemanas. [ref.10 hal. 52]

Gambar 9 menjelaskan bahwa semakin besar daya pemanas yang digunakan dalam proses *reheating* maka *fraksi solid* yang tercapai semakin kecil dengan asumsi waktu pemanasan, waktu penahanan dan dimensi *billet* sama. Karena daya heater peralatan *thixocasting* jauh lebih kecil daripada daya operasi tungku Hofmann maka dengan parameter yang sama *fraksi solid* yang tercapai pada proses *reheating* didalam heater peralatan *thixocasting* jauh lebih besar dibanding proses *reheating* didalam tungku Hofmann.

5. *Kecenderungan jenis billet pada persentase pengisian dan korelasinya terhadap hasil percobaan reheating.*

Untuk mengetahui kecenderungan jenis *billet* pada persentase pengisian maka data pada tabel 2 disajikan dalam gambar dibawah ini.



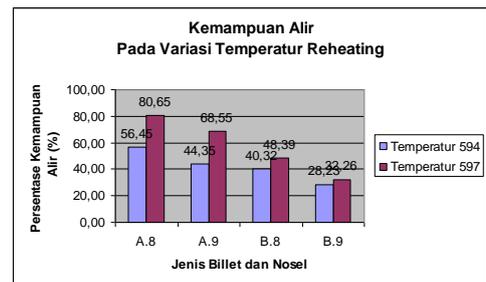
Gambar 10. Kemampuan alir pada *billet* tipe A dan tipe B

Gambar 10 diatas memperlihatkan bahwa *billet* tipe A cenderung memiliki mampu alir yang lebih baik dibanding *billet* tipe B pada ukuran nosel dan

temperatur *reheating* yang sama. Hal ini sejalan dengan kecenderungan hasil yang didapatkan pada tahap proses *reheating* dimana pada temperatur *reheating* dan waktu penahanan yang sama, *billet* tipe A mempunyai *fraksi solid* yang lebih kecil dibanding *billet* tipe B. *Billet* tipe B yang mempunyai ukuran butir yang lebih kecil dan bentuk butir yang lebih bulat jelas mempunyai kerapatan butir yang lebih tinggi dan hanya memiliki fasa eutektik (*liquid-like*) yang lebih sedikit dibanding *billet* tipe A yang memiliki ukuran butir lebih besar dan bentuk butir yang lebih menjauhi bulat, sehingga pada temperatur *reheating* dan waktu penahanan yang sama *billet* tipe A lebih banyak memiliki fasa cair dibanding *billet* tipe B. Karena *billet* tipe A lebih banyak memiliki fasa cair maka *billet* tipe A lebih mudah mengalir dibanding *billet* tipe B untuk diameter nosel dan kecepatan injeksi yang sama.

6. *Kecenderungan temperatur reheating pada persentase pengisian dan korelasinya terhadap hasil percobaan reheating.*

Untuk mengetahui kecenderungan temperatur *reheating* pada persentase pengisian maka data pada Tabel 2 disajikan dalam gambar 11.

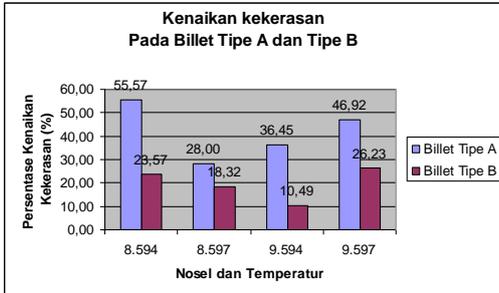


Gambar 11. Kemampuan alir pada variasi temperatur *reheating*

Gambar 11 diatas memperlihatkan bahwa pada temperatur *reheating* 597°C memiliki mampu alir yang lebih baik daripada temperatur *reheating* 594°C untuk jenis *billet* dan ukuran nosel yang sama. Hal ini sesuai dengan hipotesa yang ada bahwa pada temperatur *reheating* yang lebih tinggi akan memiliki *fraksi solid* yang lebih kecil sehingga larutan mudah mengalir. Hasil percobaan *reheating* juga membuktikan bahwa pada temperatur *reheating* yang lebih tinggi, *billet* memiliki fraksi cair yang lebih banyak daripada pada temperatur *reheating* yang lebih rendah. Kenaikan temperatur akan menyebabkan terjadinya *partial remelting* yang berawal dari batas inti, yang diikuti dengan penurunan proporsi fasa eutektiknya, sehingga temperatur *reheating* 597°C memiliki mampu alir yang lebih baik daripada temperatur *reheating* 594°C. Selain itu, transien temperatur menyebabkan temperatur *reheating* 594°C lebih cepat mencapai temperatur *solidus* daripada temperatur *reheating* 597°C, dengan asumsi kecepatan injeksinya sama.

7. *Kecenderungan jenis billet pada kenaikan kekerasan.*

Untuk mengetahui kecenderungan jenis *billet* pada kenaikan kekerasan, maka data pada gambar 4 disajikan dalam gambar dibawah ini.

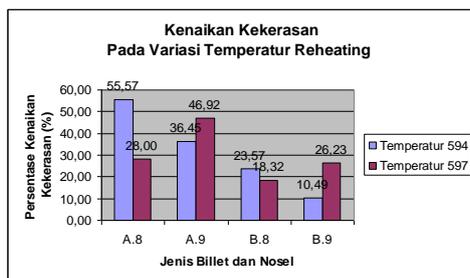


Gambar 12. Kenaikan derajat kekerasan pada *billet* tipe A dan tipe B

Gambar 12 memperlihatkan bahwa *billet* tipe A cenderung memiliki persentase kenaikan kekerasan yang lebih besar dibanding *billet* tipe B, hal ini terjadi karena *billet* tipe A memiliki ukuran butir yang lebih besar daripada *billet* tipe B, dengan gaya tekan yang sama dan diameter nosel yang sama maka kenaikan derajat kekerasan *billet* tipe A lebih besar daripada *billet* tipe B, karena butir *billet* tipe A lebih termampatkan

8. *Kecenderungan temperatur reheating pada kenaikan kekerasan.*

Untuk mengetahui kecenderungan temperatur *reheating* pada kenaikan kekerasan, maka data pada gambar 4 disajikan dalam gambar 13.

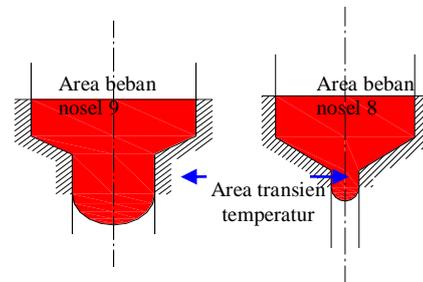


Gambar 13. Kenaikan derajat kekerasan pada temperatur *reheating* 594°C dan temperatur *reheating* 597°C.

Pada diameter nosel 8 mm yang alirannya lebih lancar daripada nosel 9 mm, persentase kenaikan derajat kekerasan pada temperatur *reheating* 594°C lebih tinggi dibandingkan temperatur *reheating* 597°C, hal ini terjadi karena pada temperatur *reheating* 594°C cenderung memiliki ukuran butir yang lebih besar daripada pada temperatur *reheating* 597°C. Karena ukuran butir yang lebih besar, maka pada nosel yang

sama butiran tersebut akan lebih termampatkan. Pada butiran yang lebih kecil akan memiliki densitas yang lebih tinggi, akan tetapi pengaruh pemampatan butir pada kenaikan derajat kekerasan lebih besar daripada pengaruh densitas butiran, sehingga pada nosel 8 mm kenaikan derajat kekerasan temperatur *reheating* 594°C lebih besar daripada temperatur *reheating* 597°C.

Sedangkan pada diameter nosel 9 mm, persentase kenaikan derajat kekerasan temperatur *reheating* 594°C lebih rendah dibandingkan temperatur *reheating* 597°C, hal ini terjadi karena pada nosel diameter 9 mm terjadi kecenderungan lain dimana terjadi aliran yang kurang baik dibanding pada nosel 8 mm. Aliran yang kurang baik ini disebabkan oleh beban yang berlebih dan transien termperetur. Nosel 9 mm memiliki permukaan sentuh yang lebih luas dibanding nosel 8 mm, berkaitan dengan transien temperatur maka pada nosel 9 mm larutan akan cepat membeku. Selain itu, pada nosel 9 mm memiliki beban yang lebih besar daripada nosel 8 mm.



Gambar 14. Area beban pada nosel 9 mm dan 8 mm

Gambar 14 diatas memperlihatkan hasil injeksi pertama pada nosel 8 mm dan 9 mm, untuk injeksi selanjutnya maka nosel 9 mm memiliki beban yang lebih besar.

Aliran yang kurang baik ini (tersendat) pada nosel 9 mm menyebabkan inti butiran tersebar tidak merata. Pada temperatur *reheating* 597°C membuat fraksi cairnya lebih banyak daripada temperatur *reheating* 594°C, sehingga inti butiran mempunyai ruang gerak yang lebih luas dan menyebabkan kerapatan butiran temperatur *reheating* 597°C lebih tinggi daripada temperatur *reheating* 594°C. Karena aliran yang kurang baik (tersendat) ini pengaruh densitas butiran pada kenaikan derajat kekerasan lebih besar daripada pengaruh pemampatan butiran. Aliran yang tersendat juga akan menyebabkan pemampatan pada butiran tidak merata, sehingga pemampatan pada butiran yang lebih besar akan menghasilkan produk yang butirannya tidak merata. Oleh karena itu, pada nosel 9 mm temperatur *reheating* 597°C memiliki kenaikan kekerasan yang lebih tinggi daripada temperatur *reheating* 594°C.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari penelitian terhadap proses *semisolid forming* dengan jalur *thixocasting* pada paduan Al-18Si hipereutektik ini, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Proses *semisolid forming* dengan jalur *thixocasting* pada paduan Al-18Si hipereutektik dapat dilakukan dengan peralatan skala laboratorium.
2. Pada percobaan *reheating* didalam tungku Hofmann, semakin tinggi temperatur *reheating* maka semakin banyak fraksi cair yang dimiliki *billet*.
3. Pada percobaan *reheating* didalam tungku Hofmann, semakin lama waktu penahanan maka semakin banyak fraksi cair yang dimiliki *billet*.
4. Pada percobaan *reheating* didalam tungku Hofmann, *billet* tipe A cenderung memiliki fraksi cair yang lebih banyak dibandingkan *billet* tipe B pada temperatur *reheating* dan waktu penahanan yang sama.
5. Pada percobaan pembuatan *prototype* piston didalam peralatan *thixocasting*, *billet* tipe A cenderung memiliki kemampuan alir yang lebih baik daripada *billet* tipe B, selain itu *billet* tipe A cenderung memiliki kenaikan derajat kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan *billet* tipe B.
6. Pada percobaan pembuatan *prototype* piston didalam peralatan *thixocasting*, *billet* yang diinjeksikan pada temperatur *reheating* 597°C cenderung memiliki kemampuan alir yang lebih baik daripada *billet* yang diinjeksikan pada temperatur *reheating* 594°C.

Saran

Penelitian ini masih banyak kekurangan yang perlu diperbaiki dan disempurnakan pada penelitian selanjutnya, untuk itu penulis menyarankan beberapa hal yaitu :

1. Heater yang berada pada peralatan *thixocasting* diganti dengan heater yang isolasi panasnya lebih baik agar tidak terjadi transien temperatur saat proses injeksi *billet* kedalam cetakan. Selain itu daya heater dinaikkan agar kondisi *reheating*-nya sama dengan kondisi *reheating* didalam tungku Hofmann.
2. Menggunakan data *thermodynamic* untuk mengetahui *fraksi solid* yang ada secara tepat, agar hubungan dan pengaruh dari *fraksi solid* terhadap parameter-parameter percobaan menjadi lebih jelas.
3. Menggunakan sistem hidrolik yang dapat diatur kecepatannya.

DAFTAR PUSTAKA

1. Dieter, G. E, *Metalurgi Mekanik*, Jilid I dan II, terjemahan Sriati Djaprie, Erlangga, Jakarta, 1992
2. John, Vernon, *Testing of Materials*, Machillan, Hongkong, 1992
3. Gruzleski, John.E; Closset, Bernard. Mthe; *Treatment of Liquid Aluminium-Silicon Alloys*; The American foundrymen's Society, inc; Des Plaines; Illinois; 1990
4. Fan, Z, *Semisolid Metal Processing*, International Materials Review Vol. 47 No. 2, 2002
5. Van Vlack, Lawrence H, *Ilmu Dan Teknologi Bahan (Ilmu Logam Dan Bukan Logam)*, alih bahasa Ir. Sriati Djaprie, M.E., M. Met, Penerbit Erlangga, 1992
6. Kalpakjian, Serope, *Manufacturing Engineering And Technology*, Addison-Wesley Publishing Company Inc
7. Tzimas, E; Zavaliangos, A; *Evaluation of Volume Fraction of Solid in Alloys Formed By Semisolid Processing*; Drexel University; Philadelphia; 2000
8. Choi, Jae-Chan; Kim, Young-Ho; Park, Joon-Hong; *Optimal Reheating Condition of Semisolid Material in Semisolid Forging By Neural Network*; 2000
9. Dughiero, F; Forzan, M; Lupi, S; *Reheating 150 mm Billets of A356 Alloy for Thixo-Processing*; International Scientific Colloquium; 2003
10. Reinerkopp; Winning, Gisbert; Moller, Thorsten; *Thixoforging of Aluminium Alloys*; Institute for Metal forming; 1999
11. Shehata, Mahmoud; Essadiqi, Elhacmi; Loong, Chee-Ang; *Semi-Solid Forming of Al and Mg Alloys for Transportation Applications*; Natural Resource Cannada; 2001
12. Modigell, M; Koke, J; *Time- Dependent Rheological Properties of Semi-Solid Metal Alloys*; 1999
13. Findon, MM; *Semisolid Slurry Formation Via Liquid Metal Mixing*; Worcester Polytechnic Institute; 2003
14. Appelian, D; Makhlof, M; *SSM Processing*; 2002
15. Buynacek, C J; *High Volume Semi-Solid Forming of Aluminum Master Cylinders*; 2000
16. Muttaqien, Seno Zaenal; *Pengaruh Kecepatan Putar Pada Pembentukan Struktur Non-dendritik Pada Paduan Al-18Si*; 2005
17. Prabowo, Heru Tri; *Pengaruh Waktu Pendinginan Terhadap Pembentukan Struktur Globular Pada Paduan Al-18Si*; 2005