

## Evolusi Mikrostruktur Aloi A333 melalui Proses Logam Separa Pepejal (Microstructural Evolution of A333 Alloy through Semisolid Metal Process)

A.M. AZIZ\*, M.Z. OMAR & M.S. SALLEH

### ABSTRAK

*Pemprosesan logam separa pepejal yang juga dikenali sebagai pembentukan-tikso merupakan suatu kaedah pemprosesan yang secara relatifnya adalah baharu jika dibandingkan dengan kaedah pemprosesan biasa seperti penuangan dan penempaan. Sebelum pembentukan-tikso dapat dilakukan, aloi berkenaan perlu melalui langkah awal persediaan iaitu dengan mengubah mikrostruktur asal berbentuk dendritik kepada bentuk hampir sfera. Ini diikuti dengan pemanasan semula ke julat suhu separa pejal (iaitu sekitar 30-50% cecair) dan seterusnya proses ubah bentuk ke dalam acuan menggunakan mesin penekanan hidraulik. Antara kaedah utama yang biasa digunakan bagi penyediaan bahan aloi ini adalah tuangan cerun penyejukan, pengadukan mekanik dan kaedah terma langsung. Kajian ini memberi tumpuan kepada evolusi mikrostruktur aloi aluminium A333 (Al-7.5Si-3.1Cu) daripada bentuk dendritik kepada hampir sfera sebagai persediaan untuk diproses melalui pembentukan-tikso kelak. Kaedah tuangan cerun penyejukan digunakan dalam kajian ini kerana kaedah ini diketahui berkesan tapi mudah digunakan. Nilai saiz ira dan faktor bentuk dianalisis berdasarkan kepada suhu tuangan dan panjang cerun penyejukan berbeza yang digunakan. Di samping itu, kaedah kalometri pengimbas perbezaan juga diguna pakai dalam mengenal pasti suhu sempadan pepejal dan sempadan cecair aloi ini. Saiz ira fasa pepejal  $\alpha$ -Al paling kecil dan nilai faktor bentuk terbaik yang diperolehi dalam kajian ini berlaku pada suhu tuangan 620°C dan panjang cerun 300 mm, iaitu masing-masing pada 15.3  $\mu\text{m}$  dan 0.54.*

*Kata kunci: Aloi aluminium; rawatan haba sesuhu; tuangan cerun penyejukan*

### ABSTRACT

*Semi solid metal processing also known as thixoforming is a relatively new processing method compared to the conventional casting and forging processes. Prior to the thixoforming process, the candidate alloy must go through a preparation procedure to transform its normally dendritic structure to a near spheroidal form. This is followed by a re-heating process at a semi solid temperature range (30-50% liquid range) before forming in a mould using a hydraulic pressing machine. Among the mostly used alloy preparation methods were cooling slope casting, mechanical stirring and direct thermal methods. This study focused on the microstructural evolution of A333 (Al-7.5Si-3.1Cu) aluminium alloy from dendritic to a near spheroidal microstructure as a preparation for the later thixoforming process. The cooling slope casting method was selected in this study because the method was known to be effective yet simple to use. The resulting grain size and shape factor of the solid phase were analysed in response to the pouring temperatures and the lengths of the cooling slope plate selected. In addition, the identification of the solidus and liquidus temperatures was carried out using a difference scanning calorimetry method. The finest grain size and the best shape factor for the  $\alpha$ -Al solid phase were obtained at 620°C pouring temperature and 300 mm cooling slope plate length, i.e. at 15.3  $\mu\text{m}$  and 0.54, respectively.*

*Keywords: Aluminum alloy; cooling slope process; isothermal heat treatment*

### PENGENALAN

Pemprosesan logam separa pepejal adalah salah satu kaedah yang digunakan untuk menghasilkan produk yang hampir siap. Pemprosesan ini menawarkan beberapa kelebihan berbanding dengan kaedah tuangan atau kaedah tempaan. Antara kelebihan pemprosesan logam separa pepejal ialah dapat mengurangkan keliangan bahan dan makro-pengasingan (Liang et al. 2008) dalam menghasilkan produk hampir siap. Penghasilan produk bercirikan sedemikian amat dititikberatkan oleh industri automotif untuk menghasilkan produk yang mempunyai keliangan yang rendah seterusnya dapat meningkatkan jangka hayat produk berkenaan.

Pemprosesan logam separa pepejal terbahagi kepada dua cabang yang dinamakan penuangan-tikso dan penuangan-rheo yang dapat menghasilkan mikrostruktur berbentuk sfera. Kedua-dua cabang pemprosesan logam separa pepejal ini memerlukan penyediaan bahan suapan terlebih dahulu sebelum penghasilan produk melalui pembentukan-tikso. Penyediaan bahan suapan adalah langkah dalam menghasilkan struktur bebas dendritik (Fan 2002; Mohammed et al. 2013). Terdapat beberapa teknik untuk penyediaan bahan suapan antaranya adalah pengadukan magnetohidrodinamik (MHD), tuangan cerun penyejukan (CS), pengadukan mekanikal dan kaedah terma langsung. Kaedah cerun penyejukan adalah kaedah

yang berkesan untuk menghasilkan bahan suapan yang mempunyai bentuk yang sfera (Haga et al. 2010; Kund & Dutta 2010). Teknik penyediaan mikrostruktur berbentuk sfera ini juga dilabelkan sebagai teknik makmal mesra pengguna atas faktor pengendalian operasi alatan makmal yang sederhana (Salleh et al. 2014a).

Penghasilan mikrostruktur sfera dapat meningkatkan sifat mekanik sesuatu bahan hasil daripada pemrosesan logam separa pepejal. Faktor ini menarik minat sektor automotif dalam menghasilkan kenderaan kurang berat dengan menggunakan bahan yang ringan namun masih memiliki kekuatan yang sama. Peralihan kepada penggunaan aloi aluminium dalam penghasilan komponen kenderaan adalah menjadi tumpuan dalam sektor automotif seperti aloi aluminium komersial berikut A356, A319 dan A380 (Gencalp & Saklakoglu 2010; Salleh et al. 2014a; Wannasin & Thanabumrungkul 2008). Keistimewaan aloi aluminium dalam sektor automotif yang boleh melalui pemrosesan logam separa pepejal adalah seperti kebolehtuangan yang tinggi, ringan dan sifat mekanik yang bagus (Bogdanoff & Dahlström 2009).

Dalam pemilihan aloi aluminium untuk menjalani pemrosesan logam separa pepejal ini, pemodelan termodinamik digunakan bagi meramal keberkesanan bahan yang baru mengikut kriteria yang dilaporkan oleh Salleh et al. (2014b). Setiap unsur di dalam aloi aluminium memainkan peranan tersendiri dalam menentukan ciri bahan tersebut. Penggunaan simulasi dalam menentukan peratusan berat unsur dalam bahan diselarikan dengan kesediaan bahan itu di pasaran agar bahan yang mempunyai peratusan berat unsur yang sesuai untuk tujuan pemrosesan logam separa pepejal boleh didapati dengan harga yang berpatutan. Perbandingan peratusan pecahan cecair melawan suhu bagi aloi aluminium komersial seperti A319, A332, A356, A357 dan A380 yang kebanyakannya diaplikasikan dalam sektor automotif menggambarkan A333 berada dalam kumpulan yang boleh menjalani pemrosesan logam separa pepejal setelah disimulasikan dengan pemodelan termodinamik. Ini bertepatan dengan kesediaan aloi aluminium A333 yang mudah didapati di pasaran dengan harga RM173 setiap 10 kilogram adalah murah untuk dijadikan bahan suapan bagi pembentukan-tikso. Contoh penggunaan aloi A333 adalah aloi ini sesuai bagi pembuatan plat tunggal seterika, pelbagai meter dan pengawal atur serta bahagian kepala silinder automotif (Joseph 1999).

Penentuan bahan aloi aluminium dalam menjalankan pemrosesan logam separa pepejal adalah berdasarkan kepada beberapa kriteria agar keberkesanan dalam menjalankan uji kaji ini adalah tinggi (Salleh et al. 2013; Solek et al. 2007). Terdapat tiga kriteria dalam menentukan keberkesanan bahan dalam menjalani uji kaji ini (Liu et al. 2005; Salleh et al. 2014b):

Lengkukan tertinggi pada profil peratusan cecair melawan suhu berada dalam julat peratusan cecair 30 dan 50%; Nilai kecil bagi kepekaan pecahan cecair yang berlaku dalam julat 30 dan 50% ( $DF_L/DT$ ); serta julat suhu pemrosesan yang besar ( $\Delta T^{30/50}$ ).

Walau bagaimanapun, Zoqui dan Naldi (2011) telah menjalankan pemrosesan separa pepejal terhadap bahan A332 yang kurang menepati kriteria seperti yang dinyatakan sebelum ini tetapi berjaya dalam menghasilkan mikrostruktur sfera bagi bahan tersebut.

Kesesuaian bahan A333 dalam menjalankan kajian ini adalah hasil daripada simulasi yang dijalankan. Bahan A333 adalah bahan yang berada dalam kategori siri 3xx aloi aluminium di dalam kumpulan aloi aluminium tuang. Aloi aluminium terbahagi kepada dua jenis iaitu aloi aluminium tempa dan aloi aluminium tuang yang masing-masing mempunyai kelebihan sendiri. Aloi aluminium tuang mampu menghasilkan produk yang mempunyai keberkesanan kos oleh kerana ia memiliki takat lebur yang rendah namun begitu kumpulan aloi ini mempunyai kekuatan tegangan yang lebih rendah berbanding kumpulan aloi aluminium tempa (Nafsin & Rashed 2013). Sistem aloi aluminium tuang yang paling penting adalah Al-Si, dengan kandungan tinggi silikon (4.0-13%) menyumbang kepada ciri kebolehtuangan yang bagus (Zolotarevskii et al. 2007).

Potensi aloi aluminium A333 untuk menjalani penukaran struktur dendrit kepada struktur sfera menerusi pemrosesan logam separa pepejal akan dikaji dalam penyelidikan ini. Aloi aluminium A333 yang diguna pakai dalam pembuatan komponen kenderaan menunjukkan aloi ini mempunyai kegunaan yang bermakna dalam pasaran industri. Walaupun aloi ini telah dikomersialkan dengan menggunakan kaedah tuangan acuan kekal, namun kajian ini amat diperlukan kerana A333 belum pernah menjalani pemrosesan logam separa pepejal. Penumpuan kajian adalah kepada kesan suhu penuangan dan kesan pemanjangan plat cerun terhadap penghasilan mikrostruktur sfera bagi bahan suapan. Kajian ini juga melihat kepada kesan rawatan haba sesuhu selepas daripada tuangan cerun penyejukan dijalankan.

#### KAEDAH EKSPERIMEN

Kandungan kimia aloi aluminium komersial A333 (Al-7.5Si-3.1Cu) yang dibekalkan memiliki dimensi jongsong panjang  $\times$  lebar  $\times$  tinggi yang masing-masing adalah 800  $\times$  100  $\times$  50 mm diperiksa melalui teknik sinar-X pendarfluor (XRF) seperti yang disenaraikan dalam Jadual 1. Pemodelan termodinamik bagi mendapatkan kesesuaian bahan untuk menjalani pemrosesan logam separa pepejal ataupun dipanggil dengan terma kebolehbentukan-tikso disimulasikan dengan menggunakan perisian JMat-Pro (Java-Based-Materials Properties). Dalam kajian ini, perisian ini digunakan dengan memasukkan data peratusan berat elemen kimia yang diperoleh bagi mendapatkan pemerhatian awal untuk profil pecahan cecair aloi sebelum sampel aloi diperiksa menggunakan XRF bagi tujuan pengesahan. Perisian ini diguna pakai bagi tujuan mengenal pasti kesan peratusan kimia dalam aloi terhadap ciri mekanik bahan (Salleh et al. 2014b). Perisian Jmat-Pro melakukan pengiraan dengan menggunakan persamaan 'Scheil-Gulliver's' untuk sistem berbilang komponen yang juga ditulis dalam (1).

JADUAL 1. Kandungan komposisi kimia aloi A333

Si	Cu	Mg	Mn	Zn	Ni	Fe	Ca	Ti	Al
7.5	3.13	0.15	0.16	2.20	0.05	0.79	0.06	0.05	Baki

$$f_L = \left\{ \frac{T_M - T}{T_M - T_i} \right\}^{\left( \frac{1}{1-k} \right)} \quad (1)$$

$T_M$  adalah suhu leburan aloi, adalah suhu keseimbangan cecair dan adalah pekali pengagihan. Kalometri pengimbasan pembezaan (DSC) digunakan untuk mengukur profil pecahan cecair aloi A333. Alat analisis ini menggunakan konsep pelepasan dan penyerapan haba sesuatu bahan dalam kawalan kadar pemanasan. Untuk analisis DSC, 16.6 mg aloi A333 telah dipotong dan dicairkan dalam persekitaran argon pada kadar pencairan 10°C/min bagi mengelakkan pengoksidaan dengan menggunakan mesin TGA-DSC. Aloi aluminium A333 kemudiannya dipotong dalam anggaran 450 g dan dileburkan pada kenaikan suhu 700°C di dalam krusibel silikon karbida melalui pemanasan aruhan. Suhu leburan akan dikurangkan sehingga mencapai suhu penuangan yang ditetapkan (610°C, 620°C dan 630°C) apabila aloi A333 telah melebur dengan sepenuhnya. Leburan aloi dituang di atas plat cerun dan dikumpul di dalam acuan seperti yang ditunjukkan pada Rajah 1. Acuan yang ditempatkan pada penghujung plat cerun berukuran diameter 25 mm dan memiliki kedalaman 115 mm dan berada pada suhu bilik. Tuangan leburan aloi A333 ditetapkan kepada dua pemboleh ubah dalam kajian ini iaitu variasi dalam suhu tuangan dan variasi dalam pemanjangan plat cerun. Data kepada pemboleh ubah ini diringkaskan dalam Jadual 2, dengan sudut bagi plat cerun dimalarkan. Pengoptimuman sudut plat cerun kajian ini adalah berdasarkan beberapa kajian terdahulu (Kumar et al. 2014; Zhang et al. 2011). Pengganding suhu jenis-K dimasukkan terus ke dalam krusibel untuk memantau suhu leburan aloi supaya ketepatan suhu diperoleh bukan sekadar bergantung kepada alat kawalan suhu.

Air pada suhu bilik dialirkan di bawah plat cerun dalam arah yang berlawanan dengan arah aliran tuangan leburan aloi A333 di atas plat cerun. Semburan boron nitrida digunakan pada plat cerun sebelum leburan aloi dituang adalah sebagai pencegahan lekitan aloi pada plat dan memudahkan leburan mengalir di atasnya.

Bilet di dalam acuan yang diperoleh dipotong menjadi sampel untuk menjalani ujian metalografi dan rawatan haba sesuhu. Sampel dengan ketebalan 30 mm hasil daripada potongan bilet dimasukkan di dalam larutan kubang garam (larutan natrium nitrida) bagi menjalani rawatan haba sesuhu. Suhu larutan kubang garam adalah berdasarkan profil pecahan cecair (50% cecair) aloi aluminium A333 iaitu pada 567°C. Suhu larutan kubang garam dibiarkan stabil selama 20 min supaya mencapai persekitaraan isotropi sebelum sampel direndam di dalam larutan kubang garam untuk masa memegang sesuhu yang berbeza



RAJAH 1. Alatan tuangan cerun penyejukan

JADUAL 2. Pemboleh ubah cerun penyejukan

Sudut cerun (°)	Suhu tuangan (°C)	Panjang (mm)
60	620	200
	620	300
	620	400
60	610	300
	620	300
	630	300

iaitu selama 3 dan 6 min diikuti dengan pelindapkejukan menggunakan air pada suhu bilik.

Sampel metalografi dicanai dengan menggunakan kertas pasir bermula dari gred 240, 400, 600, 800 dan 1200 kemudian diikuti dengan sampel digilap dan dipunar masing-masing menggunakan pes intan bermula dari 6, 3 dan 1 mikron dan larutan Keller (190 mL (H<sub>2</sub>O) + 5 mL (HNO<sub>3</sub>) + 3 mL (HCl) + 2 mL (HF)) selama tujuh saat. Mikrostruktur sampel yang telah dipunar kemudiannya dilihat menggunakan mikroskop optikal. Imej yang diperoleh dianalisis menggunakan perisian komersial Image-J untuk mendapatkan faktor bentuk dan saiz sfera

$\alpha$ -aluminium. Faktor bentuk didefinisikan seperti dalam (2) (faktor bentuk sfera bersamaan dengan 1) (Salleh et al. 2014b). Saiz sfera partikel utama didefinisikan seperti dalam (3) (Czerwinski 2002).

$$Faktor\ bentuk = \frac{p^2}{4\pi A} \tag{2}$$

$$Saiz\ sfera\ partikel = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} \tag{3}$$

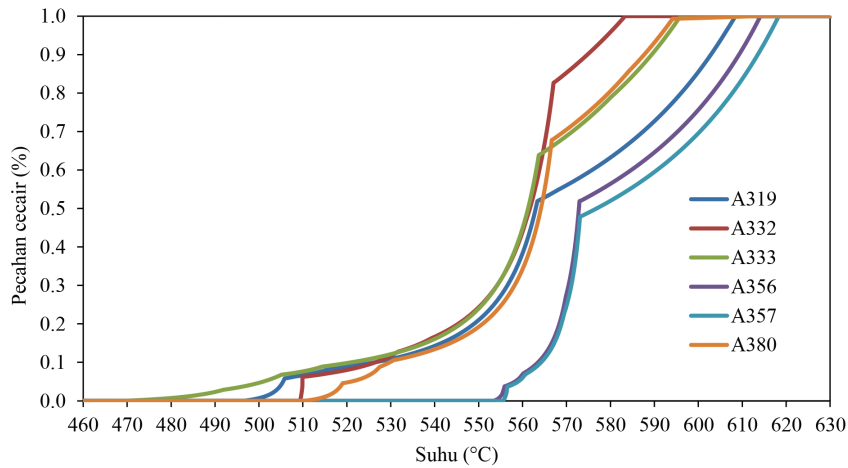
dengan adalah perimeter dan adalah keluasan partikel.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

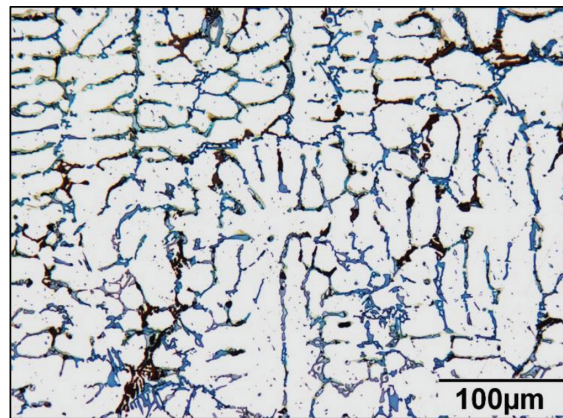
Hasil simulasi menggunakan perisian JMat-Pro, peratusan pecahan cecair melawan suhu bagi aloi A333 adalah di dalam lingkungan aloi aluminium komersial yang lain seperti A319, A332, A356, A357 dan A380 seperti dalam Rajah 2. Rajah 3 menunjukkan mikrostruktur aloi aluminium A333 dalam keadaan asal ataupun seperti diterima daripada pembekal. Mikrostruktur yang terhasil menggambarkan serakan biasa  $\alpha$ -aluminium secara seragam dengan struktur dendrit. Jangkaan suhu

pepejal dan cecair untuk aloi A333 yang dihasilkan oleh DSC adalah masing-masing 497°C dan 597°C seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4 melalui profil pecahan cecair hasil kamiran luas di bawah graf pada lengkungan DSC. Perbandingan hasil peratusan pecahan cecair menggunakan pemodelan termodinamik dan secara eksperimen dilakukan seperti dalam Rajah 5 dengan kedua-dua uji kaji memiliki kadar peleburan yang sama iaitu julat pecahan suhu 30% dan 50%. Suhu separa pepejal untuk aloi aluminium A333 antara 20 sehingga 50% julat pecahan cecair adalah 560°C sehingga 570°C.

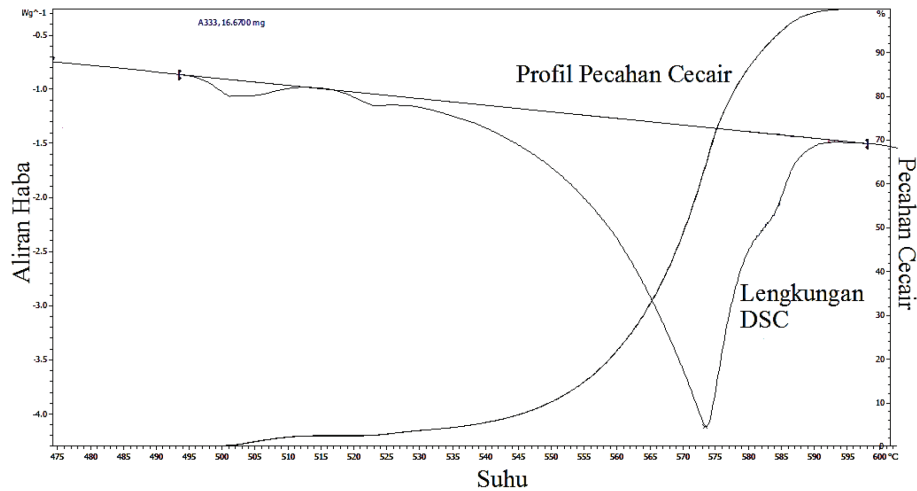
Tuangan cerun penyejukan telah berjaya menukarkan struktur dendrit kepada struktur tidak-dendrit. Pelbagai suhu tuangan dengan panjang plat cerun yang berbeza di uji dalam kajian ini bagi mendapatkan parameter yang terbaik namun hasil kajian menunjukkan keputusan yang positif untuk kesemua parameter yang digunakan seperti digambarkan dalam Rajah 6. Transformasi  $\alpha$ -aluminium daripada struktur dendrit kepada tidak dendrit terhasil selepas menjalani tuangan cerun penyejukan untuk suhu penuangan dan panjang plat cerun yang ditetapkan. Hasil ini menunjukkan aloi aluminium A333 merupakan aloi komersial yang mempunyai prestasi yang baik



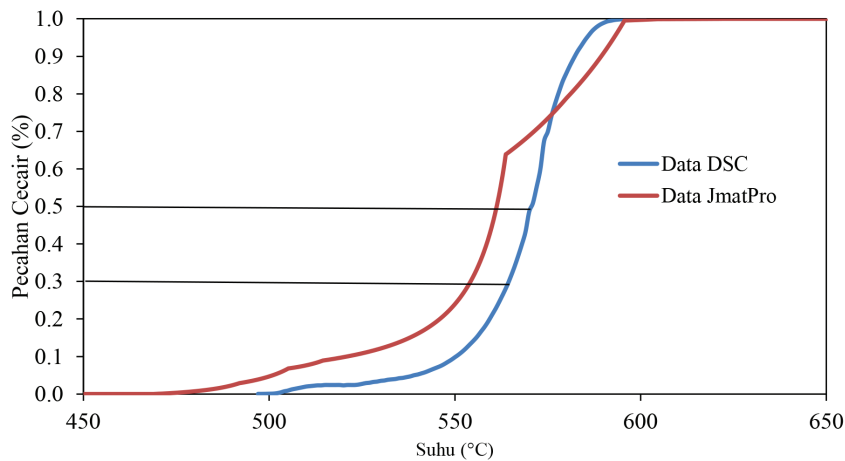
RAJAH 2. Perbandingan peratusan pecahan cecair melawan suhu dalam kategori aloi aluminium



RAJAH 3. Mikrostruktur aloi aluminium A333 seperti yang diterima



RAJAH 4. Aliran pemanasan DSC dan profil pecahan cecair A333



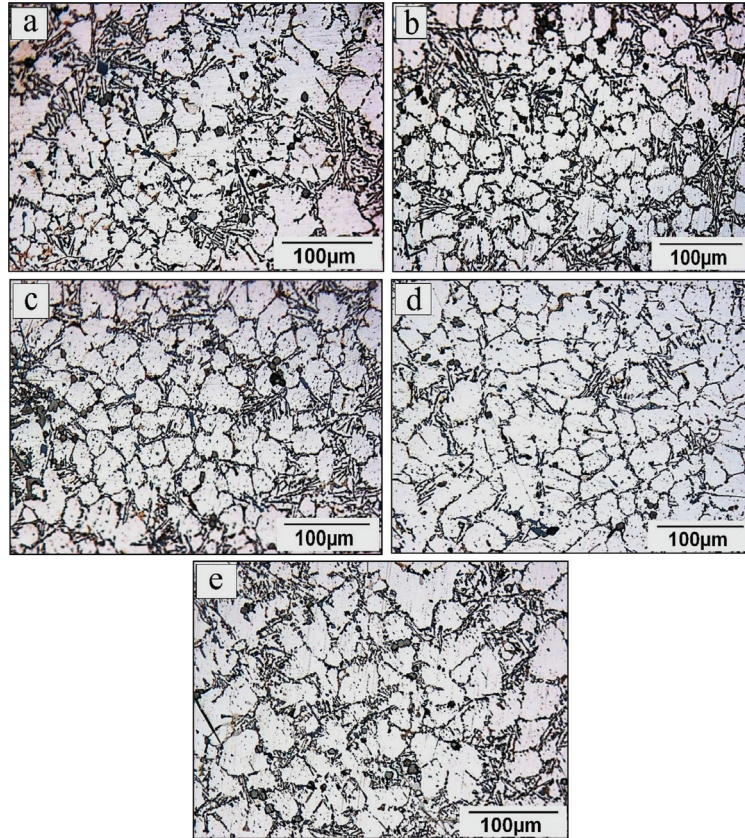
RAJAH 5. Data peratusan pecahan cecair dengan suhu bagi simulasi dan eksperimen

dalam pemrosesan logam separa pepejal. Leburan aloi mengalami pemecahan dendrit hasil daripada daya geseran semasa meluncur di atas plat cerun serta penyejukan pantas yang berlaku akibat daripada perbezaan suhu yang besar antara leburan aloi dengan plat cerun. Pemecahan dendrit ini berlaku di sepanjang cerun penyejukan sehingga di penghujung plat yang menyebabkan berlakunya penukleusan  $\alpha$ -aluminium yang pesat. Hentaman pertama leburan aloi pada plat cerun penyejukan merupakan pemecahan dendrit yang ketara berlaku dengan dipengaruhi suhu, kawasan ini dikenali sebagai zon hentaman (Legoretta et al. 2007).

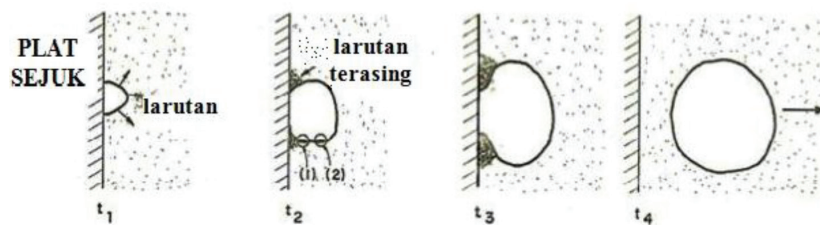
Pemecahan lengan sekunder serta cabang dendrit daripada lengan primer yang mengakibatkan golekkan ira berlaku di sepanjang plat cerun yang membolehkan struktur ira sfera terbentuk apabila di penghujung cerun. Proses golekkan ini dapat diibaratkan seperti 'doh' yang dibiarkan bergolek di cerun yang curam sehinggakan terhasilnya bentuk sfera ataupun hampir sfera. Ini digambarkan dalam Rajah 7. Pengaliran leburan aloi di atas plat cerun atas faktor tarikan graviti akan

memberikan penukleusan yang berterusan di sepanjang plat cerun sehingga di penghujung plat.

Berdasarkan pemerhatian mikrostruktur yang terhasil daripada tuangan cerun penyejukan dapat dinyatakan bahawa perbezaan daripada segi faktor bentuk partikel adalah kurang ketara. Faktor bentuk bagi parameter suhu penuangan adalah 0.5, 0.54 dan 0.49 masing-masing untuk 610°C, 620°C dan 630°C manakala bagi parameter panjang plat adalah 0.48, 0.54 dan 0.53 masing-masing untuk 200, 300 dan 400 mm. Keputusan untuk saiz partikel utama bagi parameter suhu penuangan pula adalah 17.1, 15.3 dan 17.9  $\mu\text{m}$  masing-masing untuk 610°C, 620°C dan 630°C manakala bagi parameter panjang plat adalah 15.8, 15.3 dan 17.3  $\mu\text{m}$  masing-masing untuk 200, 300 dan 400 mm. Corak pengagihan untuk kesemua parameter kajian bagi faktor bentuk dan saiz ira ditunjukkan dalam Rajah 8 dan 9. Sisihan piawai yang diperolehi hasil daripada kajian yang dilakukan dapat dilihat kesamaan yang jelas untuk perbezaan suhu penuangan serta panjang cerun penyejukan. Ini dapat dikatakan serakan data saiz ira dan faktor bentuk adalah seragam bagi kategori berlainan parameter.



RAJAH 6. Mikrostruktur bilet di atas kajian tuangan cerun penyejukan untuk pelbagai suhu penuangan dengan panjang plat cerun yang berbeza a) 620°C - 200 mm, b) 620°C - 300 mm, c) 620°C - 400 mm, d) 610°C - 300 mm and e) 630°C - 300 mm



RAJAH 7. Ilustrasi mekanisme pelepasan nuklei pada plat cerun (Robert et al. 2007)

#### KESAN PANJANG CERUN PENYEJUKAN

Peningkatan panjang plat cerun dapat meningkatkan faktor bentuk mikrostruktur aloi seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 8(b). Ini dapat dilihat pada panjang cerun 200 kepada 300 mm, nilai faktor bentuk  $\alpha$ -Al berjaya ditingkatkan dengan penambahan panjang cerun. Namun begitu, hasil kajian mendapati nilai faktor bentuk boleh dirumuskan sebagai stabil pada panjang cerun yang ditingkatkan pada 400 mm walaupun nilai faktor bentuk pada graf mencatatkan penurunan sebanyak 0.01, ini kerana nilai optimum faktor bentuk telah dicapai bagi aloi kajian ini. Jika panjang cerun terus ditingkatkan dengan pengekelan suhu penuangan berkemungkinan aloi akan mengeras di atas plat seterusnya hasil di dalam acuan tidak memuaskan. Hal ini disebabkan oleh suhu aloi telah mencecah suhu di bawah suhu cecair akibat daripada aloi mengambil masa yang lama di atas plat sebelum masuk

ke dalam acuan. Hasil yang sama diperoleh untuk saiz ira aloi A333 dengan peningkatan suhu penuangan memberi kesan kepada mikrostruktur aloi. Pemindahan haba antara leburan aloi dengan plat cerun berlaku lebih lama jika panjang cerun plat dipanjangkan. Pemanjangan plat cerun akan memberi kesan kepada nukleusi  $\alpha$ -Al yang berkadar terus dengan pemanjangan cerun. Penukleusan baru  $\alpha$ -Al turut berkisarkan kepada pemecahan lengan dendrit yang berkait rapat dengan panjang plat cerun.

Walau bagaimanapun, pemanjangan yang berlebihan akan menyebabkan saiz ira aloi akan bertambah besar berpunca daripada golekkan  $\alpha$ -Al di atas plat. Haga et al. (2010) dalam kajiannya turut menyatakan pengaruh cerun pemanjangan dalam pemejalan leburan aloi. Hasil kajian mengenai pemanjangan plat cerun dapat dilihat pada Rajah 8(a). Kenaikan panjang cerun daripada 200 ke 300 mm mencatatkan saiz ira mengalami penurunan sebanyak 0.5

$\mu\text{m}$  berbanding dengan kenaikan panjang cerun kepada 400 daripada 300 mm yang menampakkan peningkatan saiz ira. Jelas di sini dengan penambahan panjang cerun dapat membesarkan saiz partikel utama aloi selepas nilai optimum panjang cerun diperoleh.

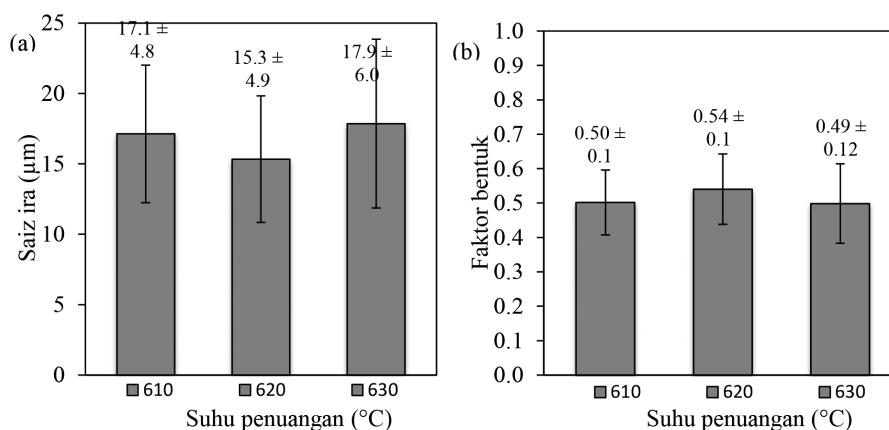
Cerun penyejukan yang pendek meningkatkan masa dalam penukleusan  $\alpha\text{-Al}$  sehinggalah ira tidak melalui pemecahan dendrit yang sempurna di atas plat untuk membentuk ira sfera atau separa sfera lalu masuk ke dalam acuan, begitu juga dengan saiz ira aloi yang mempunyai pembesaran saiz ira walaupun nilainya kecil bagi panjang cerun pendek 200 mm berbanding panjang cerun 300 mm. Faktor panjang plat cerun ini boleh dikaitkan dengan kadar ricih yang berlaku apabila leburan aloi menggelongsor menuruni plat cerun yang memberi kesan kepada bentuk sfera  $\alpha\text{-Al}$ . Kadar ricih pada cerun plat yang pendek adalah tidak mencukupi untuk pemecahan struktur dendrit. Ini ditunjukkan di dalam Rajah 8(b), faktor bentuk pada panjang cerun 200 mm tidak memberikan nilai faktor bentuk yang terbaik, namun saiz partikel utama adalah lebih kecil berbanding panjang cerun 400 mm.

#### KESAN SUHU PENUANGAN

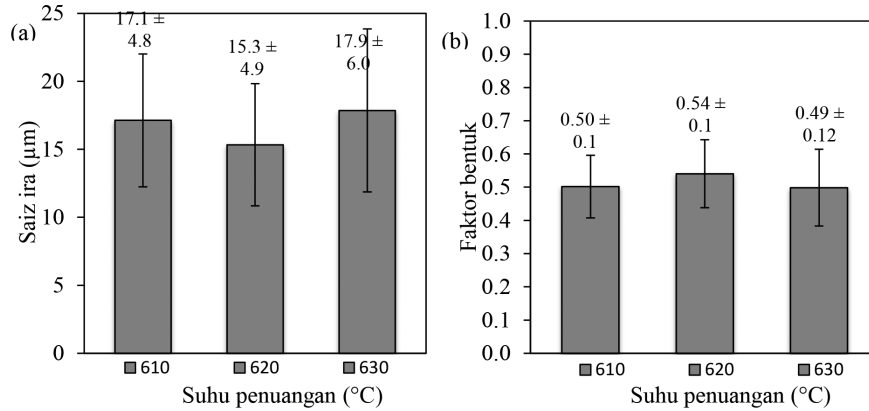
Suhu penuangan leburan aloi memberi kesan kepada pertumbuhan nukleus  $\alpha\text{-Al}$  (Hu et al. 2012). Rajah 9 menunjukkan reaksi perubahan saiz ira dan faktor bentuk terhadap suhu penuangan yang berbeza. Perbezaan suhu penuangan telah direkodkan dengan pengurangan saiz ira dan penambahan faktor bentuk sfera berlaku pada peningkatan suhu penuangan namun sebaliknya berlaku apabila peningkatan suhu penuangan diteruskan. Jelas di dalam kajian ini menunjukkan peningkatan suhu penuangan daripada  $620^\circ\text{C}$  kepada  $630^\circ\text{C}$  mengakibatkan pengurangan faktor bentuk dan peningkatan saiz partikel utama seperti di dalam Rajah 9. Suhu penuangan yang tinggi akan menyebabkan leburan aloi berada dalam keadaan cecair di atas plat cerun. Pembentukan ira sfera  $\alpha\text{-Al}$  tidak berlaku sehingga terdapat pemecahan dendrit, ini tidak berlaku hasil daripada suhu leburan aloi di atas plat masih tinggi daripada suhu cecair. Kund dan Dutta

(2010) menyatakan dalam kajian mereka, suhu penuangan yang tinggi memberi kesan terhadap suhu keluar dan secara langsung kepada pecahan pepejal setelah penuangan. Penghasilan mikrostruktur yang mempunyai faktor bentuk yang rendah pada suhu penuangan yang tinggi  $630^\circ\text{C}$  berbanding dengan suhu penuangan yang lebih rendah adalah disebabkan oleh pembentukan nukleus  $\alpha\text{-Al}$  hanya terbentuk pada penghujung plat yang menyebabkan pemecahan dendrit lewat berlaku. Pemecahan dendrit tidak dapat berlaku dengan sempurna disebabkan oleh leburan aloi pantas masuk ke dalam acuan akibat penggunaan suhu penuangan yang tinggi. Namun demikian, kesan suhu penuangan juga terlihat dengan suhu penuangan yang rendah. Rajah 9 menunjukkan suhu penuangan  $610^\circ\text{C}$  lebih rendah dari segi faktor bentuk dan lebih besar bagi saiz partikel utama. Suhu penuangan  $610^\circ\text{C}$  adalah suhu penuangan yang terlalu hampir dengan suhu cecair aloi A333. Penuangan leburan aloi yang bersuhu terlalu menghampiri suhu cecair akan menyebabkan leburan aloi terlalu pantas dalam pembentukan pepejal walaupun baru sentuhan pertama dengan plat cerun. Pembentukan pepejal yang pantas di atas plat cerun akan menghilangkan sifat campuran pepejal dan cecair bahan yang dapat membantu dalam pembentukan ira sfera serta saiz yang kecil. Di dalam kes aloi A333, kesan suhu penuangan  $620^\circ\text{C}$  terhadap saiz ira dan faktor bentuk adalah sangat ketara berbanding dengan suhu penuangan  $610^\circ\text{C}$  dan  $630^\circ\text{C}$ . Suhu penuangan  $620^\circ\text{C}$  adalah suhu penuangan optimum bagi aloi A333 oleh kerana saiz ira yang kecil ( $15.3 \mu\text{m}$ ) dan faktor bentuk yang lebih tinggi (0.54) dipamerkan berbanding dengan suhu penuangan yang berada pada  $10^\circ\text{C}$  ke bawah dan ke atas. Carian suhu penuangan perlu dilakukan sekiranya aloi berbeza iaitu bukan aloi A333 digunakan oleh kerana setiap aloi mempunyai graf profil pecahan cecair yang sendiri.

Kedua-dua parameter kajian ini saling berhubung kait antara satu sama lain. Ini dapat dijelaskan dengan hubungan berkadar songsang antara suhu penuangan dengan panjang cerun penyejukan. Misalnya suhu penuangan leburan aloi ditingkatkan jadi perlu diseimbangkan dengan



RAJAH 8. Kesan panjang plat cerun terhadap (a) saiz ira dan (b) faktor bentuk  $\alpha\text{-Al}$



RAJAH 9. Kesan suhu penuangan terhadap (a) saiz ira dan (b) faktor bentuk  $\alpha$ -Al

penambahan panjang cerun penyejukan agar masa pindahan haba leburan aloi dapat dipanjangkan di atas plat cerun penyejukan. Sebaliknya dilakukan jika suhu penuangan leburan aloi dikurangkan maka panjang cerun penyejukan perlu dikurangkan. Kaitan antara panjang cerun penyejukan dan suhu penuangan dinyatakan secara terperinci dalam kajian Birol (2007).

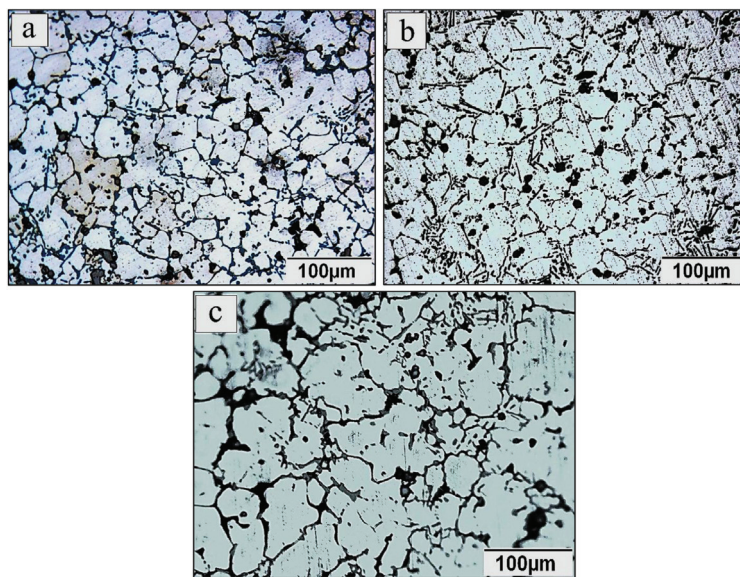
RAWATAN HABA SESUHU

Rajah 10 dan 11 menunjukkan perubahan mikrostruktur selepas menjalani rawatan haba sesuhu bagi dua masa memegang sesuhu yang berbeza iaitu masing-masing tiga dan enam min. Mikrostruktur bertindak balas dengan perubahan yang berbeza bagi masa memegang yang berlainan. Rajah 10 menggunakan sampel tuangan cerun penyejukan yang mengguna pakai panjang plat cerun yang malar pada masa memegang tiga min untuk rawatan haba sesuhu. Manakala Rajah 11 menjalani rawatan haba

sesuhu pada masa memegang enam min mengguna pakai sampel tuangan cerun penyejukan yang mengambil kira suhu penuangan sebagai parameter malar.

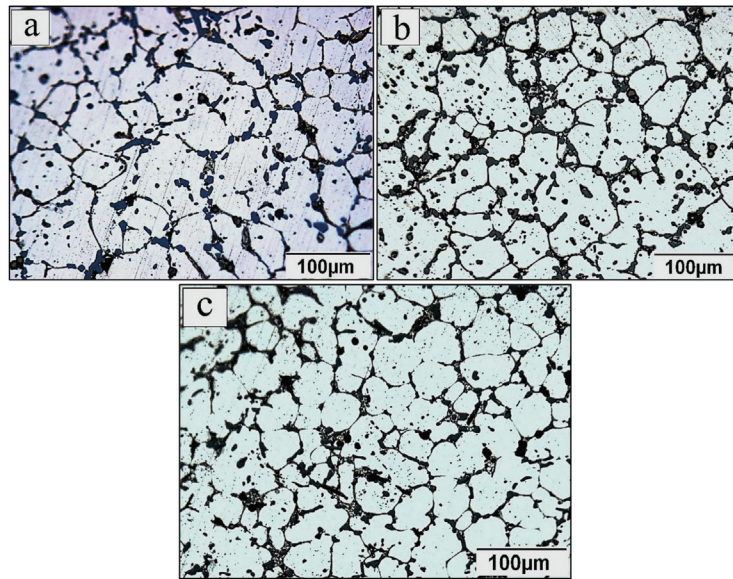
Berdasarkan imej daripada Rajah 10 dan 11 jelas dapat dilihat perbezaan dalam saiz mikrostruktur berbanding dengan Rajah 6 yang hanya menjalankan tuangan cerun penyejukan tanpa rawatan haba sesuhu. Mikrostruktur dilihat lebih kasar dan besar bagi kedua-dua masa memegang tiga min serta enam min. Saiz ira bagi masa memegang enam min lebih besar dan kasar jika dibandingkan dengan masa memegang tiga min seperti dalam Rajah 8(a) dan 12(b). Perbandingan saiz ira dan faktor bentuk untuk masa memegang tiga dan enam min adalah berdasarkan parameter suhu penuangan dan panjang plat masing-masing pada  $620^{\circ}\text{C}$  dan  $300\text{ mm}$ . Namun begitu faktor bentuk tidak ada perubahan yang ketara bagi kedua-dua masa memegang yang berbeza.

Peratusan peningkatan saiz mikrostruktur merujuk kepada masa memegang 6 min berbanding dengan saiz

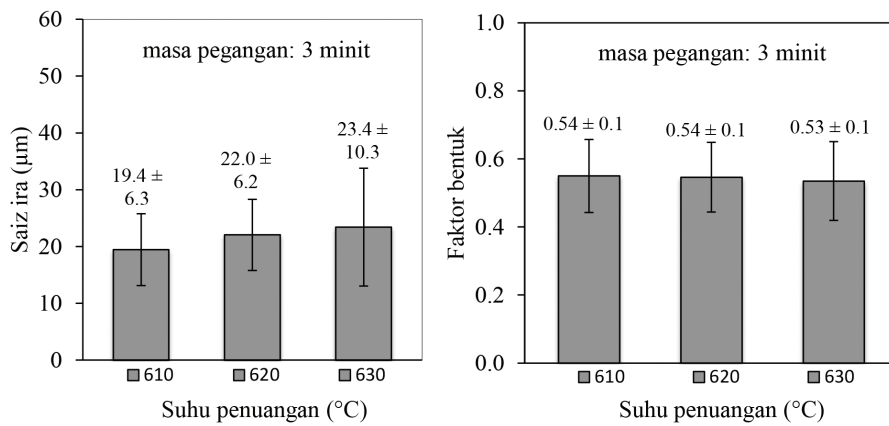


RAJAH 10. Mikrostruktur tuangan cerun penyejukan setelah proses rawatan haba sesuhu pada masa memegang 3 minit a)  $610^{\circ}\text{C}$  -  $300\text{ mm}$ , b)  $620^{\circ}\text{C}$  -  $300\text{ mm}$  and c)  $630^{\circ}\text{C}$  -  $300\text{ mm}$

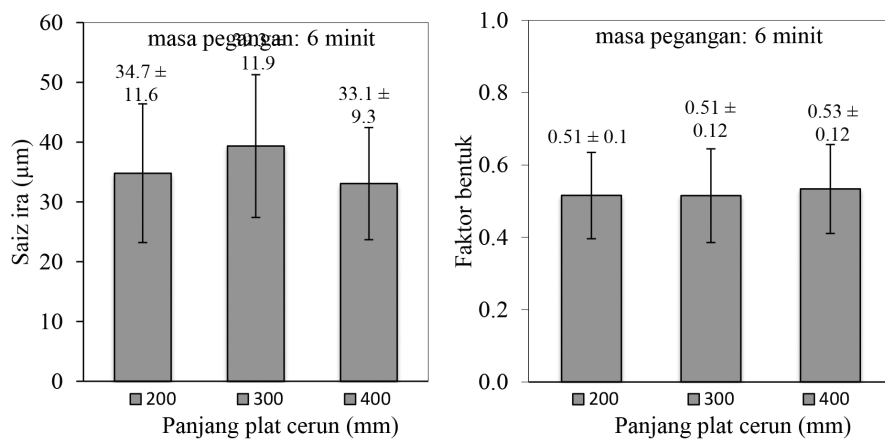




RAJAH 11. Mikrostruktur tuangan cerun penyejukan setelah proses rawatan haba sesuhu pada masa memegang 6 minit a) 620°C - 200 mm, b) 620°C - 300 mm and c) 620°C - 400 mm



RAJAH 12(a). Masa memegang tiga minit bagi rawatan haba sesuhu



RAJAH 12(b). Masa memegang enam minit bagi rawatan haba

mikrostruktur tuangan cerun penyejukan adalah 61% manakala jika dibandingkan dengan saiz mikrostruktur rawatan haba 3 min adalah 44%. Semasa tuangan cerun penyejukan, kecacatan hablur bertaburan dalam struktur aloi seperti kekosongan dan kehelan. Oleh itu, rawatan haba sesuhu memberikan pemulihan statik dalam bentuk geluncuran dan pendakian di dalam kawasan di antara ira. Ia membantu ira untuk membentuk dan menyusun semula untuk menjadi lebih sfera. Haitao dan Miaoquan (2004) menyatakan di dalam kajiannya, rawatan haba sesuhu memberi kesan terhadap evolusi mikrostruktur seperti pemulihan, penghabluran semula, pemecahan, kebulatan dan pengasaran. Formasi beberapa ira kecil untuk bergumpalan sesama sendiri terutamanya apabila ira yang besar bergabung dengan ira yang kecil untuk membentuk ira yang lebih besar.

#### KESIMPULAN

Tuangan cerun penyejukan adalah pemprosesan yang berupaya menukarkan struktur dendrit aloi aluminium A333 untuk menjadi struktur hampir sfera. Ini meningkatkan lagi bilangan aloi aluminium yang boleh melalui proses pembentukan-tikso. Dua parameter penting seperti suhu penuangan dan panjang cerun penyejukan telah dimanipulasikan untuk memperoleh parameter yang optimum sebagai bahan suapan bagi pemprosesan pembentukan-tikso. Di sini dapat disimpulkan kesemua parameter tidak menunjukkan perbezaan yang ketara daripada segi saiz ira serta faktor bentuk kerana nilai yang diperoleh adalah hampir sama. Oleh itu, parameter yang dipilih mempunyai persamaan namun parameter yang optimum bagi suhu penuangan dan panjang plat masing-masing adalah 620°C dan 300 mm. Untuk mendapatkan struktur hampir sfera. Namun yang demikian, rawatan haba sesuhu dapat menjadikan saiz ira lebih kasar dan besar.

#### PENGHARGAAN

Penghargaan diberikan kepada Lim Cheng Kiat dan Yin Mun Kit, Pelajar Pra-siswazah Tahun Akhir, Jabatan Mekanik dan Bahan, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina atas bantuan dalam mengendalikan uji kaji. Kajian ini telah dibiayai oleh Universiti Kebangsaan Malaysia di bawah geran GUP-2012-040 dan AP-2012-014.

#### RUJUKAN

Birol, Y. 2007. A357 thixoforming feedstock produced by cooling slope casting. *Journal of Materials Processing Technology* 186(1-3): 94-101.

Bogdanoff, T. & Dahlström, J. 2009. The influence of copper on an Al-Si-Mg alloy (A356) - Microstructure and mechanical properties. Jönköping University, Sweden (tidak diterbitkan).

Czerwinski, F. 2002. On the generation of thixotropic structures during melting of Mg-9% Al-1% Zn alloy. *Acta Materialia* 50: 3265-3281.

Fan, Z. 2002. Semisolid metal processing. *International Materials Reviews* 47(2): 49-85.

Gencalp, S. & Saklakoglu, N. 2010. Semisolid microstructure evolution during cooling slope casting under vibration of A380 aluminum alloy. *Materials and Manufacturing Processes* 25(9): 943-947.

Haga, T., Nakamura, R., Tago, R. & Watari, H. 2010. Effects of casting factors of cooling slope on semisolid condition. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 20: 968-972.

Haitao, J. & Miaoquan, L. 2004. Effects of isothermal heat treatment on microstructural evolution of semisolid Al-4Cu-Mg alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance* 13(4): 488-492.

Hu, X., Ai, F. & Yan, H. 2012. Influences of pouring temperature and cooling rate on microstructure and mechanical properties of casting Al-Si-Cu aluminum alloy. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)* 25(4): 272-278.

Joseph, R.D. 1999. *Corrosion on Aluminum and Aluminum Alloys*. Ed ke-2. Materials Park: ASM International. hlm. 313.

Kumar, S.D., Vundavilli, P.R., Mantry, S., Mandal, A. & Chakraborty, M. 2014. A Taguchi optimization of cooling slope casting process parameters for production of semi-solid A356 alloy and A356-5TiB2 *in-situ* composite feedstock. *Procedia Materials Science* 5: 232-241.

Kund, N.K. & Dutta, P. 2010. Numerical simulation of solidification of liquid aluminum alloy flowing on cooling slope. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 20: 898-905.

Legoretta, E.C., Atkinson, H.V. & Jones, H. 2007. Cooling slope casting to obtain thixotropic feedstock. *Proceedings of the 5th Decennial International Conference on Solidification Processing*. pp. 23-25.

Liang, S.M., Chen, R.S. & Han, E.H. 2008. Semisolid microstructural evolution of equal channel angular extruded Mg-Al alloy during partial remelting. *Solid State Phenomena* 141-143: 557-562.

Liu, D., Atkinson, H.V. & Jones, H. 2005. Thermodynamic prediction of thixoformability in alloys based on the Al-Si-Cu and Al-Si-Cu-Mg systems. *Acta Materialia* 53(14): 3807-3819.

Mohammed, M.N., Omar, M.Z., Salleh, M.S., Alhawari, K.S. & Kapranos, P. 2013. Semisolid metal processing techniques for nondendritic feedstock production. *The Scientific World Journal* 2013: 752175.

Nafsin, N. & Rashed, H.M.M.A. 2013. Effects of copper and magnesium on microstructure and hardness of Al-Cu-Mg alloys. *International Journal of Engineering and Advanced Technology* 2(5): 533-536.

Salleh, M.S., Omar, M.Z., Syarif, J., Alhawari, K.S. & Mohammed, M.N. 2014a. Microstructure and mechanical properties of thixoformed A319 aluminium alloy. *Materials & Design* 64: 142-152.

Salleh, M.S., Omar, M.Z., Syarif, J. & Mohammed, M.N. 2014b. Pemodelan termodinamik aloi Al-Si-Cu untuk pemprosesan logam separa pepejal. *Sains Malaysiana* 43(5): 791-798.

Salleh, M.S., Omar, M.Z., Syarif, J., Mohammed, M.N. & Alhawari, K.S. 2013. Thermodynamic simulation on thixoformability of aluminium alloys for semi-solid metal processing. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation* 7(3): 286-293.

Solek, K.P., Kuziak, R.M. & Karbowniczek, M. 2007. The application of thermodynamic calculations for the semi-solid processing design. *Symposium I "Phase Diagrams; Phase Stability; Theory and Applications"* Warsaw, Poland. hlm. 4-8.

- Wannasin, J. & Thanabumrunikul, S. 2008. Development of a semi-solid metal processing technique for aluminium casting applications. *Songklanakarın Journal of Science and Technology* 30(2): 215-220.
- Zhang, Y., Ma, Q., Xie, S., Xu, J. & Guo, H. 2011. Orthogonal experiment in rheocasting-rolling for semi-solid magnesium alloy used by slope and mechanical stirring. *The Open Materials Science Journal* 5(3): 134-139.
- Zolotarevskii, V.S., Glazoff, M.V. & Belo, N.A. 2007. *Casting Aluminum Alloys*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science. hlm. 544.
- Zoqui, E.J. & Naldi, M.A. 2011. Evaluation of the thixoformability of the A332 Alloy (Al-9.5 wt%Si-2.5 wt%Cu). *Journal of Materials Science* 46(23): 7558-7566.

A.M. Aziz\*, M.Z. Omar & M.S. Salleh  
Jabatan Kejuruteraan Mekanik dan Bahan  
Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina  
Universiti Kebangsaan Malaysia  
43600 Bangi, Selangor Darul Ehsan  
Malaysia

M.S. Salleh  
Jabatan Proses Pembuatan  
Fakulti Kejuruteraan Pembuatan  
Universiti Teknikal Malaysia Melaka  
76100 Durian Tunggal, Melaka  
Malaysia

\*Pengarang untuk surat-menyurat; email: ahmadaziz@siswa.ukm.edu.my

Diserahkan: 9 Januari 2015

Diterima: 21 Disember 2015