

Kebolehbentukan-tikso Aloi 2014 dengan Penambahan Si dan Pengurangan Cu (Thixoformability of 2014 Alloy with the Addition of Si and Decreasing of Cu)

M.A.M. ARIF*, M.Z. OMAR & Z. SAJURI

ABSTRAK

Dalam kajian ini, kebolehbentukan-tikso aloi aluminium (Al) 2014 dengan penambahan unsur silikon (Si) dan pengurangan unsur kuprum (Cu) dikaji. Kandungan Si dan Cu dalam aloi 2014 diubah suai supaya kriteria kebolehbentukan-tikso dapat dipenuhi. Kebolehbentukan-tikso aloi 2014 dan aloi Al-terubah suai diukur secara termodinamik dengan menggunakan pakej perisian JMatPro dan seterusnya dibuktikan secara uji kaji melalui analisis terma dan analisis fasa. Hasil kajian ini mendapati bahawa sifat kebolehbentukan-tikso aloi 2014 dapat dipenuhi dengan penambahan Si dan pengurangan Cu. Apabila kandungan Si dalam aloi 2014 bertambah, kandungan fasa eutektik pada titik 'lutut' tertinggi yang terbentuk di atas lengkung pecahan cecair meningkat dengan ketara, manakala julat suhu pemejalan pula semakin mengecil. Di samping itu, pengurangan Cu pula menyebabkan julat suhu pemrosesan untuk pembentukan-tikso menjadi semakin luas lalu mengakibatkan sensitiviti pecahan cecair pada titik 'lutut' tertinggi menurun. Selain pembentukan fasa Al_2Cu dan fasa $\theta-Al_3Cu_2Mg_8Si_6$, kemunculan fasa $\pi-Al_8FeMg_3Si_6$ dengan struktur yang padat hasil daripada pengurangan Cu juga dijangka menyumbang kepada peningkatan sifat mekanik aloi Al-terubah suai. Akhir sekali, aloi Al-terubah suai tersebut dijangka mampu digunakan untuk menghasilkan komponen otomotif seperti rod penyambung, aci sesondol dan aci engkol melalui proses pembentukan-tikso.

Kata kunci: Aloi aluminium; JMatPro; kebolehbentukan-tikso

ABSTRACT

In the present study, the thixoformability of aluminium (Al) alloy 2014 with the addition of silicon (Si) and the reduction of copper (Cu) was studied. The contents of Si and Cu in 2014 alloy were modified in order to fulfil the thixoformability criteria. The thixoformability of 2014 alloy and Al-modified alloy were measured thermodynamically using JMatPro software package and validated experimentally via thermal and phase analysis. The study found that the thixoformability behaviour of alloy 2014 had improved with the addition of Si and Cu reduction. When Si content in the alloy was increased, the amount of eutectic phase at the highest 'knee' on the liquid fraction curve increased significantly, while the solidification temperature range decreased. In addition, the reduction in Cu had increased the temperature range for thixoforming process and lowering the liquid fraction sensitivity at the highest 'knee'. In addition to the existence of Al_2Cu and $\theta-Al_3Cu_2Mg_8Si_6$ phases, the emergence of $\pi-Al_8FeMg_3Si_6$ phase with compact structure resulting from Cu reduction is expected could be contribute to the improvement of the Al-modified alloy mechanical properties. Finally, the modified Al alloy is expected to be suitable to produce automotive components such as connecting rod, camshaft and crankshaft by using thixoforming process.

Keywords: Aluminium alloy; JMatPro; thixoformability

PENGENALAN

Proses pembentukan-tikso merupakan satu daripada proses pembentukan aloi logam yang menghasilkan komponen dengan bentuk hampir siap. Proses ini dilakukan semasa aloi logam berada dalam keadaan separa pepejal. Proses pembentukan-tikso melibatkan proses pemanasan bahan suapan (aloi logam) sehingga satu suhu separa pepejal dan diikuti proses menekan masuk bahan suapan separa pepejal tersebut ke dalam acuan. Keperluan utama proses ini adalah bahan suapan yang mempunyai sifat tiksotropik. Semasa dalam keadaan separa pepejal, bahan suapan yang memiliki sifat tiksotropik akan berkelakuan seperti mentega iaitu mampu berdiri pegun seperti pepejal sekiranya dibiarkan

dan sebaliknya akan mengalir seperti cecair apabila dikenakan daya ke atasnya (Arif et al. 2013; Kirkwood et al. 2010; Omar et al. 2011). Terdapat banyak kaedah yang telah dibangunkan untuk menghasilkan bahan suapan yang memiliki sifat tiksotropik, antaranya ialah proses tuangan cerun penyejuk. Proses tuangan cerun penyejuk melibatkan proses tuangan aloi logam di atas satu plat logam yang disejukkan dengan aliran air di bawahnya. Proses ini juga melibatkan beberapa parameter utama seperti suhu tuangan, panjang cerun penyejukan dan sudut kecondongan plat logam (Arif et al. 2018; Salleh et al. 2014).

Aloi aluminium-silikon-kuprum (Al-Si-Cu) adalah antara aloi logam yang banyak digunakan untuk proses

pembentukan-tikso. Aloi ini menawarkan pelbagai kelebihan istimewa berbanding aloi logam yang lain seperti ringan, tahan karat dan mempunyai nisbah kekuatan terhadap ketumpatan yang tinggi (Chu et al. 2008; Daud et al. 2001; Othman et al. 2018; Salleh et al. 2018; Shamsudin et al. 2007). Aloi Al-Si-Cu digunakan untuk menggantikan besi tuang dalam menghasilkan komponen otomotif seperti rod penyambung, aci engkol dan aci sesondol. Sebagai panduan, gambarajah fasa untuk aloi Al-Si-Cu boleh diperolehi dalam *ASM Handbook* (2004). Liu et al. (2005) ada menyenaraikan kriteria kebolehbentukan-tikso untuk aloi Al. Pertama, titik 'lutut' tertinggi pada lengkung pecahan cecair melawan suhu sepatutnya berlaku dalam julat pecahan cecair (Δf_L) antara 0.3 dan 0.5. Julat pecahan cecair antara 0.3 dan 0.5 adalah julat pecahan cecair yang sesuai untuk proses pembentukan-tikso. Titik 'lutut' tertinggi di atas lengkung pecahan cecair melawan suhu adalah merujuk kepada suhu keseluruhan fasa eutektik habis melebur dan bermulanya peleburan fasa utama α -Al. Semasa proses peleburan separa, fasa eutektik mesti dileburkan sepenuhnya tanpa meleburkan terlalu banyak fasa utama α -Al. Oleh itu, proses peleburan separa perlu dilakukan pada suhu di atas titik 'lutut' tertinggi. Selain itu, pembentukan fasa cecair akan mudah dikawal sekiranya titik 'lutut' tertinggi berlaku dalam julat pecahan cecair antara 0.3 dan 0.5 kerana kadar pembentukan fasa cecair di atas titik 'lutut' tertinggi adalah lebih perlahan berbanding di bawahnya. Kedua, sensitiviti pecahan cecair (df_L/dT) di atas titik 'lutut' tertinggi mestilah serendah yang mungkin (kurang daripada $0.03\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) supaya bahan suapan mudah dikendalikan apabila dipanaskan pada suhu separa pepejal. Sensitiviti pecahan cecair merujuk kepada kesan perubahan suhu terhadap pecahan cecair. Nilai sensitiviti pecahan cecair bergantung kepada keluasan 'tingkap pemrosesan' antara suhu pecahan cecair 0.3 dan 0.5 ($\Delta T_{0.3/0.5}$). Semakin luas 'tingkap pemrosesan', semakin rendah nilai sensitiviti pecahan cecair. Bagi proses pembentukan-tikso, 'tingkap pemrosesan' minimum untuk pecahan cecair adalah antara 0.3 dan 0.5 adalah 6°C . Ketiga, julat pemejalan (ΔT_{sol}) aloi Al tidak boleh terlalu besar (tidak boleh melebihi 130°C). Julat pemejalan ialah julat suhu antara sempadan pepejal dan sempadan cecair. Julat pemejalan yang terlalu besar boleh menyumbang kepada koyakan panas dan keporosan.

Sehingga kini, terdapat banyak laporan tentang uji kaji pembentukan-tikso yang dilakukan ke atas aloi Al. Namun, laporan tersebut hanya tertumpu kepada beberapa aloi Al tuang sahaja seperti A357, A356 dan A319. Oleh itu, usaha mencari dan membangunkan aloi Al yang sesuai untuk proses pembentukan-tikso perlu dilakukan supaya kemampuan proses ini dapat dipraktikkan. Pelbagai pakej perisian simulasi jangkaan termodinamik yang boleh digunakan untuk membangunkan komposisi kimia aloi Al yang dapat memenuhi kriteria kebolehbentukan-tikso seperti Thermo-Calc, ChemSage, MTDATA dan JMatPro. Pada tahun 2005, Liu et al. telah menerbitkan satu laporan mengenai kesan penambahan Cu dalam aloi A356 dan penambahan Si dalam aloi 2014 terhadap sifat

kebolehbentukan-tikso aloi tersebut. Manakala, Maciel et al. (2003) pula mengkaji kesan unsur pengaloi dalam sistem aloi Al-Zn-Mg-Cu terhadap perubahan pecahan cecair dan fasa keseimbangan yang wujud. Kedua-dua kajian tersebut dilakukan dengan menggunakan perisian MTDATA yang telah dibangunkan oleh *National Physical Laboratory* (NPL). Selain itu, Zoqui et al. (2016) pula mengkaji sifat kebolehbentukan-tikso aloi Al-Si dengan kandungan Si yang pelbagai dengan menggunakan perisian simulasi Thermo-Calc. Kajian ini signifikan kerana ia dilakukan bagi membangunkan satu komposisi kimia aloi Al yang sesuai untuk proses pembentukan-tikso melalui pengukuran kebolehbentukan-tikso aloi 2014 dengan penambahan Si dan pengurangan Cu. Kriteria kebolehbentukan-tikso aloi 2014 dan aloi 2014-terubah suai dengan penambahan Si dan pengurangan Cu diukur secara simulasi menggunakan perisian JMatPro dan seterusnya dibuktikan dengan eksperimen melalui kedua-dua analisis terma dan fasa. Evolusi mikrostruktur aloi Al-terubah suai kesan daripada proses peleburan separa dan pembentukan-tikso juga diperhatikan.

BAHAN DAN KAEDAH

Permodelan sifat termodinamik dan fasa keseimbangan dilakukan untuk mengukur sifat kebolehbentukan-tikso aloi 2014 dan aloi 2014-terubah suai secara simulasi. Permodelan tersebut dibuat dengan menggunakan perisian JMatPro (Java-based Materials Properties software) yang telah dibangunkan oleh Sente Software Ltd. United Kingdom. Komposisi kimia aloi 2014 diubah suai dengan penambahan unsur Si dan pengurangan unsur Cu. Seterusnya, bahan awal aloi Al-terubah suai dihasilkan melalui proses tuangan graviti berdasarkan komposisi kimia (Al-5Si-3Cu-0.5Mg-0.8Mn-0.7Fe-0.25Zn) yang telah diukur oleh perisian JMatPro. Komposisi kimia bahan awal tersebut disemak dengan menggunakan mesin X-Ray Fluorescence (XRF), jenama Bruker, model S8 Tiger.

Analisis terma dilakukan ke atas sampel bahan awal aloi Al-terubah suai dengan menggunakan mesin kalorimetri imbasan kebezaan (DSC) jenis Netzsch-STA (TG-DSC) 449 F3 dan dibandingkan dengan hasil simulasi yang diukur oleh JMatPro. Analisis ini dilakukan untuk menentukan perubahan kapasiti haba terhadap suhu. Perubahan kapasiti haba terhadap suhu ditentukan dengan mengukur haba yang mengalir masuk atau diserap ke dalam sampel semasa pemanasan. Bahan awal aloi Al-terubah suai dipotong kepada butiran kecil (berat kurang daripada 20 mg) untuk dijadikan sampel dan diletakkan di dalam bekas Al_2O_3 sebelum ditempatkan di atas platform mesin DSC. Sampel tersebut dipanaskan daripada suhu bilik (37°C) sehingga mencapai suhu penguraian (697°C) dengan kadar pemanasan $2.5^\circ\text{C}/\text{minit}$. Pemanasan dijalankan dalam atmosfera nitrogen untuk mengelakkan pengoksidaan. Aliran haba yang diserap diukur dengan termogandingan dan direkod menggunakan perisian NETZSCH Proteus. Seterusnya, profil pecahan cecair

melawan suhu ditentukan berdasarkan kamiran luas di atas lengkung aliran haba melawan suhu.

Analisis fasa dilakukan ke atas sampel bahan awal aloi Al-terubah suai untuk mengenal pasti fasa yang wujud. Analisis fasa dilakukan dengan menggunakan mesin pembelauan sinar-X (XRD) jenama Bruker (D8-Advance) dengan radiasi Cu-K α berturas nikel pada kadar imbasan 2°/min, berjarak gelombang 1.5406 Å dan sudut belauan 2 θ .

Bilet aloi Al-terubah suai dengan mikrostruktur bukan-dendrit dihasilkan melalui proses tuangan cerun penyejuk. Seterusnya, bilet tersebut dipanaskan semula sehingga suhu separa pepejalnya pada suhu 575°C sebelum ditekan masuk ke dalam acuan keluli dengan menggunakan mesin penekan hidraulik. Analisis mikrostruktur dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik jenis Olympus ke atas sampel yang telah dicanai, digilap dan dipunat dengan larutan Keller.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

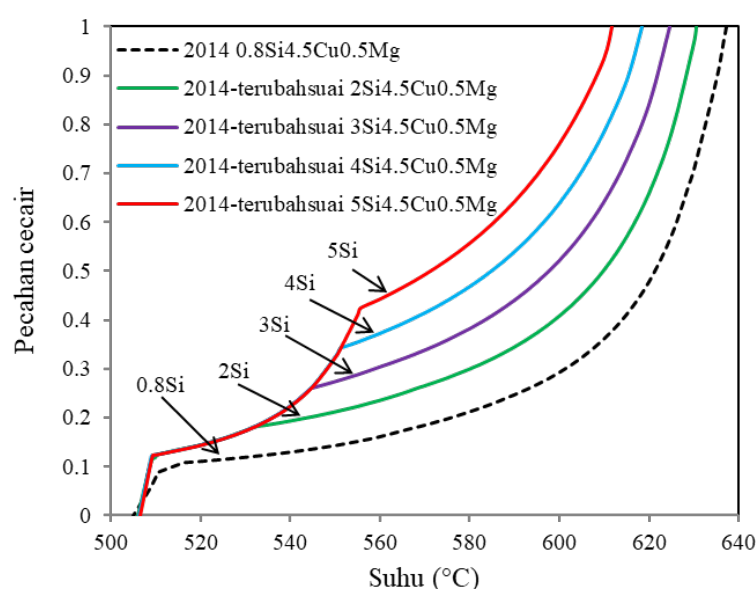
JANGKAAN TERMODINAMIK

Rajah 1 menunjukkan graf pecahan cecair melawan suhu yang diperoleh daripada hasil jangkaan simulasi ke atas komposisi kimia aloi 2014 dan aloi 2014-terubah suai dengan kandungan Si yang pelbagai. Lengkung garis putus-putus berwarna hitam mewakili jangkaan untuk hubungan pecahan cecair melawan suhu bagi aloi 2014 (Al-0.8Si-4.5Cu-0.5Mg-0.8Mn-0.7Fe-0.25Zn). Lengkung tersebut menunjukkan bahawa aloi 2014 memiliki julat pemejalanan (ΔT_{sol}) yang terlalu besar iaitu dianggarkan lebih kurang 132°C dan pecahan cecair pada titik 'lutut' tertinggi yang terlalu rendah iaitu 0.09 pecahan cecair. Oleh itu, aloi 2014

tidak dapat memenuhi kriteria kebolehbentukan-tikso yang telah dinyatakan.

Komposisi kimia aloi 2014 diubah suai dengan penambahan kandungan Si sehingga 5 % bt. Di samping menawarkan sifat kebolehtuangan yang baik, penambahan Si juga mampu mengurangkan julat pemejalanan dan meningkatkan pecahan cecair pada titik 'lutut' tertinggi (meningkatkan kandungan fasa eutektik dalam struktur aloi Al). Hasil jangkaan simulasi menunjukkan bahawa julat pemejalanan berkurang dan pecahan cecair pada titik 'lutut' tertinggi meningkat dengan ketara selepas kandungan Si dalam komposisi kimia aloi 2014 bertambah. Apabila kandungan Si dalam komposisi kimia aloi 2014 bertambah daripada 0.8 kepada 5 % bt, julat pemejalanan (ΔT_{sol}) berkurang daripada 132°C kepada 106°C, manakala pecahan cecair pada titik 'lutut' tertinggi pula meningkat daripada 0.09 kepada 0.42 pecahan cecair. Oleh itu, aloi 2014-terubah suai dengan penambahan sehingga 5 % bt. Si (Al-5Si-4.5Cu-0.5Mg-0.8Mn-0.7Fe-0.25Zn) dijangka mempunyai sifat kebolehbentukan-tikso yang lebih baik berbanding aloi 2014.

Penambahan Cu dalam aloi Al-Si boleh meningkatkan kekuatan bahan dengan ketara dan menggalakkan berlakunya proses pemendakan pengerasan akibat daripada pembentukan fasa Al₂Cu dan sebatian antara logam yang lain (Sadeghi et al. 2017). Bagaimanapun, penambahan unsur Cu boleh menyebabkan kemuluran aloi Al berkurang serta rintangan karatan dan koyakan panas semakin lemah. Selain itu, penambahan Cu juga boleh mengurangkan sifat kebolehtuangan aloi Al (Mondolfo 1976). Oleh itu, jangkaan sifat termodinamik diteruskan bagi mengkaji kesan pengurangan Cu pada sifat kebolehbentukan-tikso aloi 2014-terubah suai dengan penambahan sehingga 5 % bt. Si. Rajah 2 menunjukkan perubahan ke atas julat pemejalanan (ΔT_{sol}), pecahan cecair pada titik 'lutut' tertinggi



RAJAH 1. Graf pecahan cecair melawan suhu untuk aloi 2014 dan aloi 2014-terubah suai dengan kandungan Si yang pelbagai; dihitung menggunakan perisian simulasi JMatPro

dan tingkat pemrosesan antara pecahan cecair 0.3 dan 0.5 ($\Delta T_{0.3/0.5}$) akibat pengurangan kandungan Cu dalam aloi 2014-terubah suai dengan penambahan sehingga 5 % bt. Si (Al-5Si-4.5Cu-0.5Mg-0.8Mn-0.7Fe-0.25Zn). Hasil jangkakan simulasi mendapati bahawa apabila kandungan Cu dikurangkan daripada 4.5 kepada 3 % bt., julat pemejalan (ΔT_{sol}) bertambah daripada 106°C kepada 111°C dan pecahan cecair pada titik 'lutut' tertinggi berkurang daripada 0.42 kepada 0.39 pecahan cecair. Pada masa yang sama, 'tingkap pemrosesan' antara pecahan cecair 0.3 dan 0.5 ($\Delta T_{0.3/0.5}$) menjadi semakin luas iaitu meningkat daripada 20°C kepada 25°C lalu menjadikan sensitiviti pecahan cecair (df_L/dT) di atas titik 'lutut' tertinggi berkurang daripada 0.006 kepada 0.004 °C⁻¹. Di samping dapat memenuhi kriteria kebolehbentukan-tikso, aloi 2014-terubah suai dengan kandungan 5 % bt. Si dan 3 % bt. Cu (Al-5Si-3Cu-0.5Mg-0.8Mn-0.7Fe-0.25Zn) juga dijangkakan memiliki sifat mekanik yang baik. Oleh itu, aloi Al-terubah suai ini sangat sesuai untuk proses

pembentukan-tikso. Parameter pemejalan yang diperoleh daripada hasil permodelan termodinamik JMatPro untuk aloi 2014 dan aloi 2014-terubah suai dengan penambahan Si dan pengurangan Cu yang diterangkan sebelum ini ada dinyatakan dalam Jadual 1.

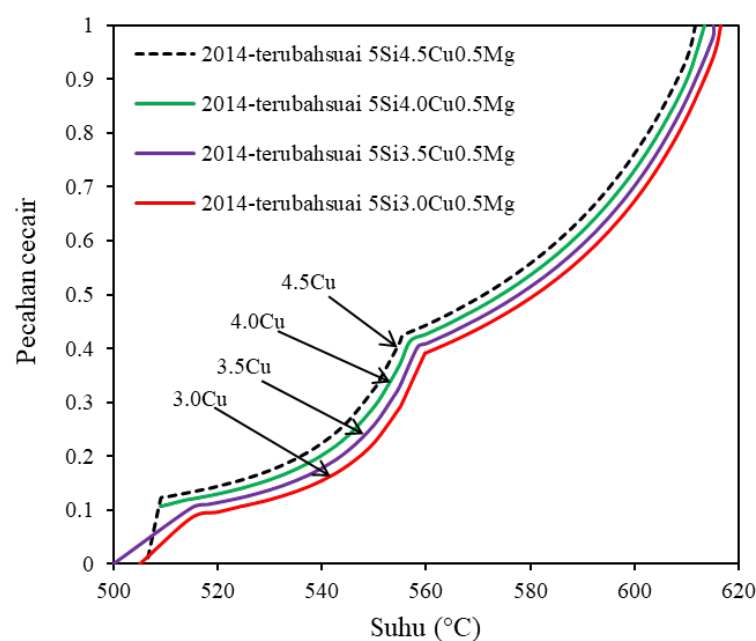
Rajah 3 menunjukkan gambarajah fasa keseimbangan untuk aloi 2014, aloi 2014-terubah suai dengan 5 % bt. Si, dan aloi 2014-terubah suai dengan 5 % bt. Si dan 3 % bt. Cu (aloi Al-terubah suai) yang dihitung oleh perisian JMatPro. Fasa yang wujud dalam ketiga-tiga aloi tersebut adalah Si, Al₂Cu, β -Al₅FeSi dan θ -Al₃Cu₂Mg₈Si₆. Manakala wujud satu lagi fasa lain iaitu π -Al₈FeMg₃Si₆ dalam aloi Al-terubah suai. Kewujudan fasa-fasa tersebut adalah disebabkan oleh penambahan unsur-unsur Si, Cu, magnesium (Mg) dan ferum (Fe) dalam Aloil Al.

Menurut Sjölander dan Seifeddine (2010), transformasi fasa π -Al₈FeMg₃Si₆ daripada fasa β -Al₅FeSi terjadi apabila kandungan Mg dalam aloi Al-Si-Cu-Mg mencapai 0.35 % bt. Peratusan berat fasa π -Al₈FeMg₃Si₆ meningkat dengan

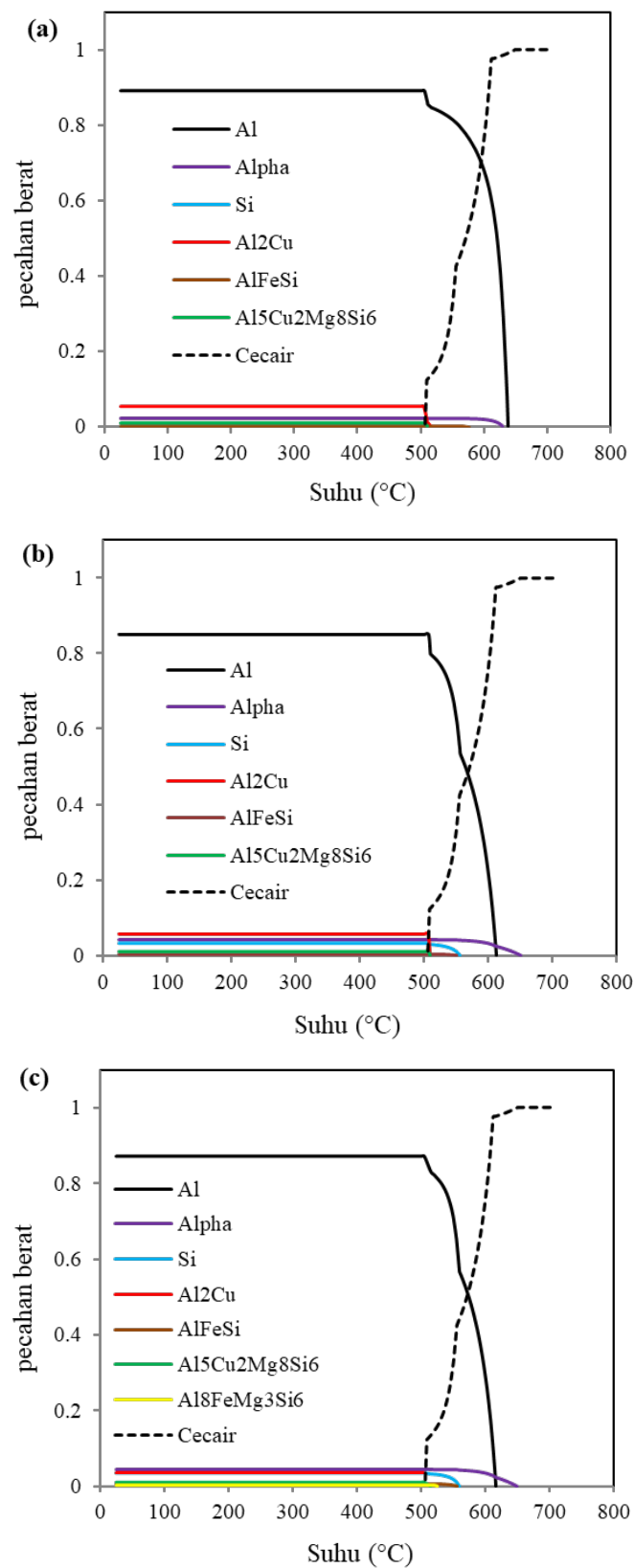
JADUAL 1. Parameter pemejalan aloi 2014 dan aloi 2014-terubah suai; dihitung oleh perisian simulasi JMatPro

Aloi aluminium	T_l (°C)	T_s (°C)	ΔT_{sol} (°C)	Kandungan eutektik	$\Delta T_{0.3/0.5}$ (°C)	df_L/dT (°C ⁻¹)
2014 0.8Si4.5Cu0.5Mg	637	505	132	0.09	22	0.001
2014-terubah suai 2Si4.5Cu0.5Mg	630	506	124	0.17	30	0.001
2014-terubah suai 3Si4.5Cu0.5Mg	625	506	119	0.26	35	0.003
2014-terubah suai 4Si4.5Cu0.5Mg	618	506	112	0.34	35	0.004
2014-terubah suai 5Si4.5Cu0.5Mg	612	506	106	0.42	20	0.006
2014-terubah suai 5Si4.0Cu0.5Mg	613	509	104	0.41	25	0.006
2014-terubah suai 5Si3.5Cu0.5Mg	615	500	115	0.40	27	0.005
2014-terubah suai 5Si3.0Cu0.5Mg	616	505	111	0.39	25	0.004

T_l ialah suhu sempadan cecair; T_s ialah suhu sempadan pepejal; ΔT_{sol} ialah julat suhu pemejalan; $\Delta T_{0.3/0.5}$ ialah julat suhu di antara pecahan cecair 0.3 dan 0.5; df_L/dT ialah sensitiviti pecahan cecair



RAJAH 2. Lengkung pecahan cecair melawan suhu untuk aloi 2014-terubah suai dengan penambahan sehingga 5 % bt. Si dan kandungan Cu yang pelbagai; dihitung menggunakan perisian simulasi JMatPro



RAJAH 3. Gambarajah fasa keseimbangan (a) aloi 2014, (b) aloi 2014-terubah suai dengan 5 % bt. Si, dan (c) aloi Al-terubah suai dengan 5 % bt. Si dan 3 % bt. Cu; dihitung menggunakan perisian simulasi JMatPro

JADUAL 2. Pecahan berat untuk setiap fasa yang wujud dalam aloi 2014, aloi 2014-terubah suai dengan 5 % bt. Si dan aloi Al-terubah suai dengan 5 % bt. Si dan 3 % bt. Cu; dihitung menggunakan perisian simulasi JMatPro

Aloi aluminium	Pecahan berat fasa				
	Si	Al ₂ Cu	β	θ	π
Aloi 2014 0.8Si4.5Cu0.5Mg	0.001	0.05	0.001	0.008	0
Aloi 2014-terubah suai 5Si4.5Cu0.5Mg	0.03	0.06	0.004	0.01	0
Aloi Al-terubah suai 5Si3.0Cu0.5Mg	0.03	0.03	0.004	0.009	0.002

JADUAL 3. Komposisi kimia aloi Al-terubah suai (% bt.)

	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Fe	Al
Aloi Al-terubah suai (JMatPro)	5.0	3.0	0.5	0.25	0.8	0.7	Baki
Aloi Al-terubah suai (XRF)	4.78	2.76	0.48	-	0.14	0.45	Baki

bertambahnya kandungan Mg. Bagaimanapun, kajian ini mendapati bahawa fasa π -Al₈FeMg₃Si₆ tidak wujud dalam kedua-dua aloi 2014 dan aloi 2014-terubah suai dengan penambahan Si sehingga 5 % bt. walaupun kandungan Mg melebihi 0.35 % bt. (0.5 % bt.). Fasa π -Al₈FeMg₃Si₆ hanya muncul dalam aloi Al-terubah suai dengan 5 % bt. Si dan 3 % bt. Cu iaitu apabila kandungan Cu dikurangkan kepada 3 % bt. Keadaan ini menunjukkan bahawa kewujudan fasa π -Al₈FeMg₃Si₆ dalam aloi Al-Si-Cu-Mg tidak hanya bergantung kepada kandungan Mg tetapi dipengaruhi juga oleh kandungan Cu. θ -Al₅Cu₂Mg₈Si₆ dan π -Al₈FeMg₃Si₆ adalah fasa yang mengandungi unsur Mg yang dapat meningkatkan sifat mekanik aloi Al. Zuo et al. (2017) mendapati bahawa kekuatan tegangan muktamad (UTS) aloi Al-Si-Cu-Mg pada suhu tinggi (250°C) bertambah daripada 157 MPa kepada 199 MPa apabila pecahan isi padu fasa θ -Al₅Cu₂Mg₈Si₆ bertambah daripada 3.2% kepada 6.4%. Farkoosh dan Pegguleryuz (2015) juga menyatakan bahawa fasa θ -Al₅Cu₂Mg₈Si₆ adalah stabil secara termodinamik dalam aloi Al-Si-Cu-Mg dan bertaburan dalam matriks Al. Di samping itu, Alkhwari et al. (2017) pula menyatakan bahawa fasa π -Al₈FeMg₃Si₆ adalah keras dan mempunyai rintangan yang tinggi terhadap lekukan. Morfologi fasa θ -Al₅Cu₂Mg₈Si₆ dan fasa π -Al₈FeMg₃Si₆ adalah berbentuk mirip-skrup-cina atau seperti blok, manakala β -Al₅FeSi pula terdiri daripada struktur yang tajam dan seperti plat. Struktur β -Al₅FeSi yang tajam dan seperti plat boleh menyebabkan sifat mekanik aloi Al berkurang. Namun, fasa θ -Al₅Cu₂Mg₈Si₆ dan fasa π -Al₈FeMg₃Si₆ pula kurang menjejaskan sifat mekanik aloi berbanding β -Al₅FeSi disebabkan morfologinya yang padat.

Berdasarkan gambarajah fasa keseimbangan dalam Rajah 3, pecahan berat bagi kedua-dua fasa Si dan β -Al₅FeSi dalam aloi 2014 adalah 0.001. Pecahan berat fasa Si dan fasa β -Al₅FeSi masing-masing meningkat kepada 0.03 dan 0.004 apabila kandungan Si dalam aloi 2014 bertambah daripada 0.8 kepada 5 % bt. Seterusnya, pecahan berat fasa Al₂Cu dalam aloi 2014 adalah 0.05 dan menurun kepada 0.03 apabila kandungan Cu dikurangkan daripada 4.5 kepada 3 % bt. Bagi fasa θ -Al₅Cu₂Mg₈Si₆, pecahan beratnya tidak menunjukkan perubahan yang ketara (daripada 0.008 kepada 0.009) dengan penambahan kandungan Si dan pengurangan Cu. Manakala, fasa π -Al₈FeMg₃Si₆ (dengan pecahan berat 0.002) hanya wujud dalam aloi Al-terubah suai dengan 5 % bt. Si dan 3 % bt. Cu. Jadual 2 ada menyenaraikan pecahan berat untuk setiap fasa bagi aloi 2014 dan aloi 2014-terubah suai dengan penambahan Si dan pengurangan Cu.

HASIL UJI KAJI

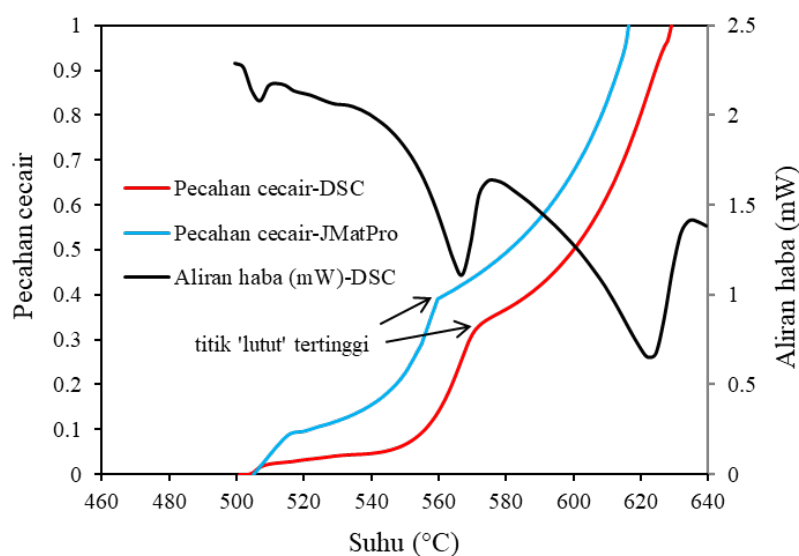
Jadual 3 menyenaraikan komposisi kimia bahan awal aloi Al-terubah suai yang telah disemak oleh mesin XRF. Sebagai perbandingan, komposisi kimia aloi Al-terubah suai yang telah diukur oleh perisian JMatPro yang dijadikan panduan untuk menghasilkan bahan awal aloi Al-terubah suai juga turut disenaraikan bersama.

Rajah 4 menunjukkan perbandingan antara lengkung pemanasan (aliran haba melawan suhu) berserta lengkung taburan cecairnya (pecahan cecair melawan suhu) yang sepadan hasil daripada analisis terma DSC ke atas sampel bahan awal aloi Al-terubah suai dan lengkung pecahan

JADUAL 4. Perbandingan parameter pemejalanan aloi Al-terubah suai yang diperolehi daripada JMatPro dan DSC

Aloi aluminium	T_l (°C)	T_s (°C)	ΔT_{sol} (°C)	Kandungan eutektik	$\Delta T_{0.3/0.5}$ (°C)	df_L/dT (°C ⁻¹)
Aloi Al-terubah suai (JMatPro)	616	505	111	0.39	25	0.004
Aloi Al-terubah suai (DSC)	629	501	128	0.33	31	0.003

T_l ialah suhu sempadan cecair; T_s ialah suhu sempadan pepejal; ΔT_{sol} ialah julat suhu pemejalanan; $\Delta T_{0.3/0.5}$ ialah julat suhu di antara pecahan cecair 0.3 dan 0.5; df_L/dT ialah sensitiviti pecahan cecair

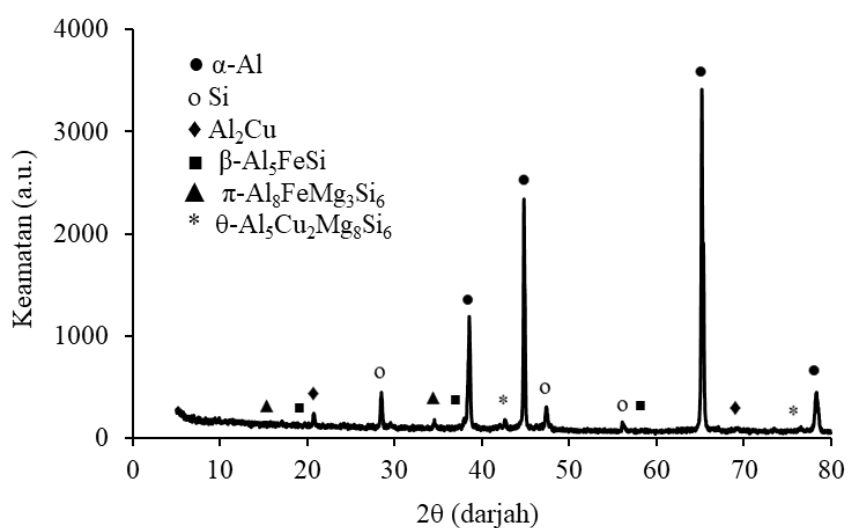


RAJAH 4. Lengkung pecahan cecair DSC berserta aliran habanya yang sepadan dan lengkung pecahan cecair JMatPro untuk aloi Al-terubah suai

cecair melawan suhu hasil daripada simulasi perisian JMatPro. Dapat diperhatikan bahawa titik 'lutut' tertinggi yang diperoleh daripada analisis terma DSC berlaku pada suhu yang lebih tinggi daripada hasil jangkaan simulasi JMatPro. Kedudukan titik 'lutut' tertinggi untuk lengkung DSC berlaku pada suhu 572°C, manakala untuk lengkung JMatPro pula ialah pada suhu 560°C. Pecahan cecair pada titik 'lutut' tertinggi adalah dianggarkan sebanyak 0.33 untuk lengkung DSC dan 0.39 untuk lengkung JMatPro. Sensitiviti pecahan cecair (df_L/dT) di atas titik 'lutut' tertinggi bagi lengkung DSC adalah bersamaan 0.003 °C⁻¹ dan bagi lengkung JMatPro ialah 0.004 °C⁻¹. Julat suhu pemejalan yang diperoleh daripada analisis DSC ialah 128°C dan yang dihitung oleh JMatPro ialah 111°C. Manakala, 'tingkap pemprosesan' antara pecahan cecair 0.3 dan 0.5 ($\Delta T_{0.3-0.5}$) untuk lengkung DSC ialah 31°C dan untuk lengkung JMatPro ialah 25°C. Jadual 4

menyenaraikan parameter pemejalan yang diperoleh daripada analisis terma DSC dan jangkaan simulasi JMatPro untuk aloi Al-terubah suai. Berdasarkan parameter pemejalan yang diperoleh daripada analisis terma DSC, aloi Al-terubah suai terbukti dapat memenuhi kriteria kebolehbentukan-tikso dan sangat sesuai untuk proses pembentukan-tikso.

Perbezaan antara hasil yang diperoleh daripada DSC dan JMatPro adalah disebabkan oleh beberapa faktor iaitu jangkaan simulasi mempertimbangkan komposisi kimia yang ideal (uji kaji yang sempurna), manakala analisis secara uji kaji pula melibatkan komposisi kimia yang tidak sekata disebabkan taburan unsur pengaloiian yang tidak seragam serta mengambil kira bendasing yang terkandung dalam jongsong aloi. Di samping itu, pengiraan yang dibuat oleh proses simulasi mempertimbangkan komposisi satu bahan yang besar, manakala ujian DSC pula dilakukan ke

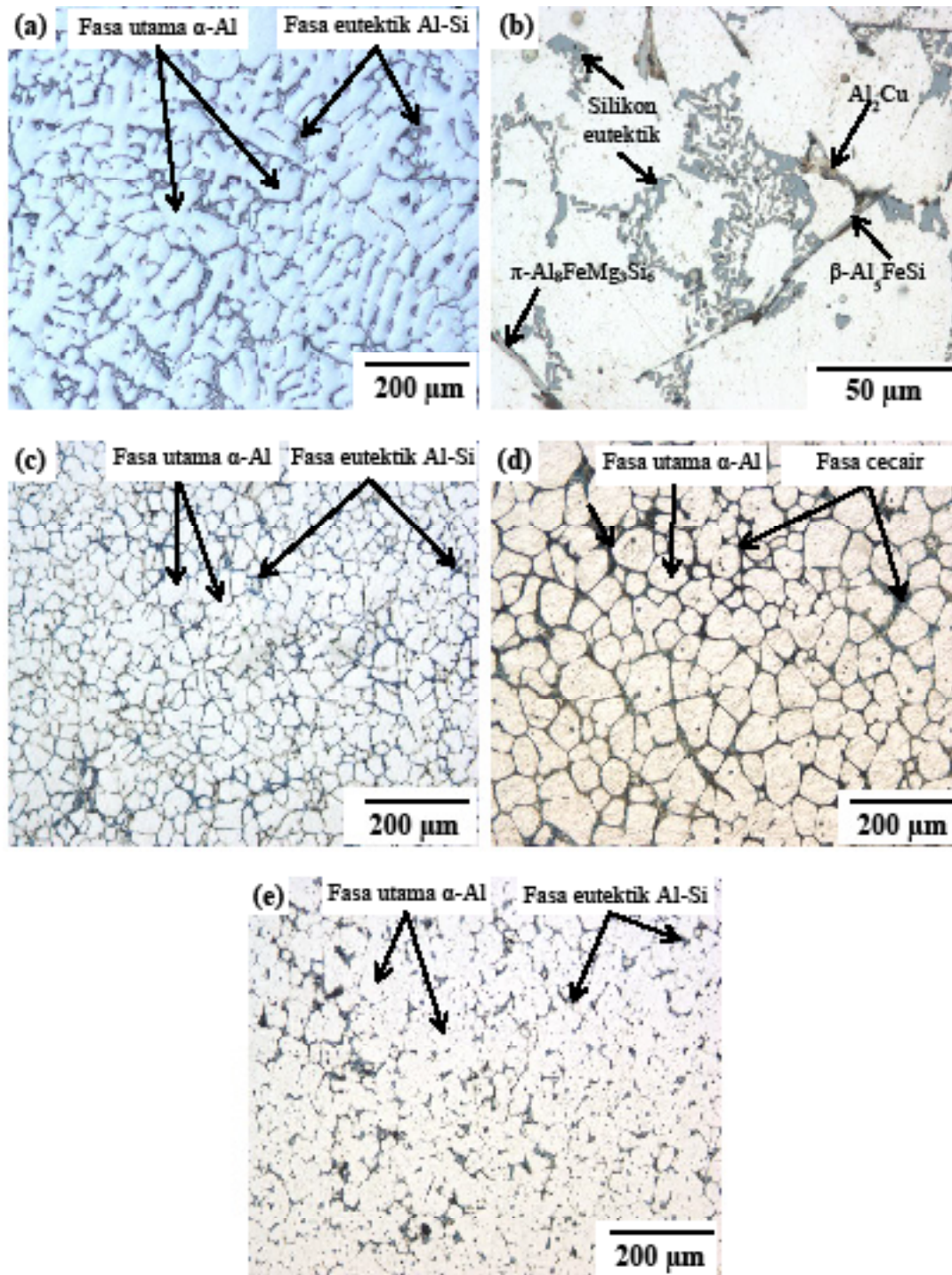


RAJAH 5. Corak XRD untuk aloi Al-terubah suai dengan 5 % bt. Si dan 3 % bt. Cu

atas sebahagian kecil sampel (berat kurang daripada 20 mg) yang diambil daripada jongkong aloi yang besar. Faktor kinetik juga menyebabkan kedudukan titik 'lutut' tertinggi lengkung DSC berlaku di bawah pecahan cecair titik 'lutut' tertinggi lengkung JMatPro. Faktor kinetik adalah merujuk kepada kadar pemanasan sampel semasa uji kaji DSC (Liu et al. 2005).

Rajah 5 menunjukkan corak XRD yang diperolehi daripada analisis fasa bagi mengenal pasti fasa yang wujud

dalam aloi Al-terubah suai. Corak XRD tersebut menunjukkan kemunculan fasa α -Al dan Si eutektik yang merupakan unsur utama dalam aloi Al-terubah suai. Fasa ini ditandakan pada puncak yang mempunyai nilai keamatan yang tinggi pada pelbagai sudut. Di samping itu, corak XRD tersebut juga membuktikan kemunculan sebatian antara logam yang mengandungi unsur Cu iaitu Al_2Cu dan $\theta\text{-Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$, dan sebatian antara logam yang kaya dengan Fe iaitu $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ dan $\pi\text{-Al}_8\text{FeMg}_3\text{Si}_6$.



RAJAH 6. Mikrostruktur aloi Al-terubah suai dengan 5 % bt. Si dan 3 % bt. Cu (a) bahan awal, (b) sampel (a) dengan pembesaran yang lebih tinggi, (c) selepas tuangan cerun penyejuk, (d) selepas peleburan separa, dan (e) selepas dibentuk-tikso

Rajah 6 menunjukkan evolusi mikrostruktur aloi Al-terubah suai hasil daripada pemprosesan logam separa pepejal. Mikrostruktur tersebut membuktikan kesesuaian dan keupayaan aloi Al-terubah suai untuk proses pembentukan-tikso. Rajah 6(a) dan Rajah 6(b) mewakili mikrostruktur bahan awal aloi Al-terubah suai (dengan pembesaran yang berbeza) yang dihasilkan melalui proses tuangan graviti. Rajah 6(a) menunjukkan bahawa mikrostruktur bahan awal terdiri daripada struktur fasa utama α -Al (berwarna cerah) yang berbentuk dendrit dan struktur antara dendrit fasa eutektik Al-Si (berwarna gelap). Manakala, Rajah 6(b) pula menunjukkan fasa yang muncul dalam aloi Al-terubah suai bagi membuktikan hasil jangkaan fasa keseimbangan melalui proses simulasi. Bagaimanapun, struktur dendrit perlu diubah kepada bentuk bukan-dendrit terlebih dahulu supaya mikrostruktur separa pepejal yang terdiri daripada struktur berbentuk hampir sfera dapat dihasilkan. Selepas proses tuangan cerun penyejuk dilakukan, bentuk mikrostruktur aloi Al-terubah suai berubah daripada dendrit kepada bukan-dendrit (rosot) yang halus seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6(c). Apabila bilet aloi Al-terubah suai yang mengandungi mikrostruktur bukan-dendrit seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6(c) dipanaskan semula sehingga suhu separa pepejalnya (575°C), mikrostruktur separa pepejal yang terdiri daripada struktur fasa pepejal berbentuk hampir sfera dalam matriks cecair berjaya dihasilkan (Rajah 6(d)). Seterusnya, Rajah 6(e) menunjukkan mikrostruktur aloi Al-terubah suai yang terbentuk-tikso hasil daripada proses pembentukan-tikso ke atas bilet aloi Al-terubah suai yang berada dalam keadaan separa pepejal. Mikrostruktur tersebut menunjukkan bahawa struktur globular fasa utama α -Al mengalami perubahan bentuk kesan daya mampatan yang dikenakan semasa proses pembentukan-tikso.

KESIMPULAN

Berdasarkan kajian ini, dapat disimpulkan bahawa aloi 2014 adalah tidak sesuai untuk proses pembentukan-tikso kerana kandungan fasa eutektik pada titik 'lutut' tertingginya yang terlalu rendah dan julat pemejalannya yang terlalu besar. Apabila kandungan Si dalam aloi 2014 ditambah, kandungan fasa eutektik pada titik 'lutut' tertingginya didapati meningkat dan julat suhu pemejalannya pula berkurang dengan ketara. Seterusnya, tingkap pemprosesan proses pembentukan-tikso menjadi bertambah luas dan sensitiviti pecahan cecair di atas titik 'lutut' tertinggi pula berkurang dengan pengurangan kandungan Cu. Oleh itu, aloi Al-terubah suai (Al-5Si-3Cu-0.5Mg-0.8Mn-0.7Fe-0.25Zn) dijangka memiliki sifat kebolehbentukan-tikso yang baik dan sesuai digunakan untuk proses pembentukan-tikso.

Di samping itu, dapat disimpulkan juga bahawa penambahan unsur Si ke dalam aloi 2014 mengakibatkan pecahan berat fasa Si eutektik meningkat. Peningkatan pecahan berat fasa Si eutektik boleh menyebabkan sifat

kebolehtuangan aloi bertambah baik. Selain itu, kajian ini juga mendapati bahawa fasa π -Al₈FeMg₃Si₆ boleh muncul dalam aloi Al-terubah suai hasil daripada pengurangan Cu. Selain fasa Al₂Cu dan θ -Al₅Cu₂Mg₈Si₆, kewujudan fasa π -Al₈FeMg₃Si₆ yang mempunyai bentuk struktur yang padat juga dijangka dapat meningkatkan sifat mekanik aloi Al-terubah suai.

PENGHARGAAN

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia dan Kementerian Pendidikan Malaysia yang telah memberikan tajaan untuk menjalankan kajian ini melalui geran penyelidikan DIP-2016-007.

RUJUKAN

- Alhawari, K.S., Omar, M.Z., Ghazali, M.J., Salleh, M.S. & Mohammed, M.N. 2017. Microstructural evolution during semisolid processing of Al-Si-Cu alloy with different Mg contents. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 27(7): 1483-1497.
- Arif, M.A.M., Omar, M.Z. & Sajuri, Z. 2018. Pembentukan mikrostruktur berbentuk sfera dalam keadaan separa pepejal aloi aluminium Al-4.8Si-2.8Cu-0.5Mg. *Jurnal Kejuruteraan* 30(2): 275-280.
- Arif, M.A.M., Omar, M.Z., Muhamad, N., Syarif, J. & Kapranos, P. 2013. Microstructural evolution of solid-solution-treated Zn-22Al in the semisolid state. *Journal of Materials Science & Technology* 29(8): 765-774.
- ASM Handbook. 2004. *Introduction to Aluminum-Silicon Casting Alloys*. Volume 2. United States of America: ASM International. Hlm. 1-9.
- Chu, K.W.M., Daud, A.R. & Jalar, A. 2008. Pengaruh unsur zirkonium terhadap sifat mekanik aloi tempaan Al-1.2Si-0.5Mg-0.25Fe. *Sains Malaysiana* 37(2): 189-193.
- Daud, A.R., Talib, I.A. & Harun, M. 2001. Effects to magnesium addition on microhardness in Eutectic Al-Si-Mg Alloys. *Sains Malaysiana* 30: 195-202.
- Farkoosh, A.R. & Pekkulyuz, M. 2015. Enhanced mechanical properties of an Al-Si-Cu-Mg alloy at 300°C: Effects of Mg and the Q-precipitate phase. *Materials Science & Engineering A* 621: 277-286.
- Kirkwood, D.H., Suery, M., Kapranos, P., Atkinson, H.V. & Young, K.P. 2010. *Semi-Solid Processing of Alloys*. London: Springer Series in Materials Science.
- Liu, D., Atkinson, H.V. & Jones, H. 2005. Thermodynamic prediction of thixotropy in alloys based on the Al-Si-Cu and Al-Si-Cu-Mg systems. *Acta Materialia* 53(14): 3807-3819.
- Maciell, C.A., Atkinson, H.V., Kapranos, P. & Argent, B.B. 2003. Thermodynamic prediction of wrought alloy compositions amenable to semi-solid processing. *Acta Materialia* 51(8): 2319-2330.
- Mondolfo, L.F. 1976. *Aluminium Alloys: Structure and Properties*. 1st ed. London: Butterworth-Heinemann.
- Omar, M.Z., Atkinson, H.V. & Kapranos, P. 2011. Thixotropy in semisolid steel slurries under rapid compression. *Metallurgical and Materials Transactions A* 42(9): 2807-2819.
- Othman, K., Ghani, J.A., Haron, C.H.C., Juri, A. & Kassim, M.S. 2018. Kajian mikrostruktur aloi aluminium A390

- selepas pemesian kasar. *Jurnal Kejuruteraan* 30(2): 257-264.
- Sadeghi, I., Wells, M.A. & Esmaeili, S. 2017. Modeling homogenization behaviour of Al-Si-Cu-Mg aluminium alloy. *Materials & Design* 128: 241-249. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.05.006>.
- Salleh, E.M., Samsu, Z., Othman, N.K. & Jalar, A. 2018. Kesan suhu celupan ke atas mikrostruktur dan kekerasan salutan aluminium pada keluli karbon. *Sains Malaysiana* 47(6): 1251-1257.
- Salleh, M.S., Omar, M.Z., Syarif, J., Alhawari, K.S. & Mohammed, M.N. 2014. Microstructure and mechanical properties of thixoformed A319 aluminium alloy. *Materials & Design* 64: 142-152.
- Shamsudin, R., Daud, A.R. & Hamid, M.A.A. 2007. Nitridation of Al-Mg-Si alloys through dynamic heating. *Sains Malaysiana* 36(2): 195-200.
- Sjölander, E. & Seifeddine, S. 2010. The heat treatment of Al-Si-Cu-Mg casting alloys. *Journal of Materials Processing Technology* 210(10): 1249-1259.
- Zoqui, E.J., Benati, D.M., Proni, C.T.W. & Torres, L.V. 2016. Thermodynamic evaluation of the thixoformability of Al-Si alloys. *Calphad* 52: 98-109.
- Zuo, L., Ye, B., Feng, J., Kong, X., Jiang, H. & Ding, W. 2017. Effect of Q-Al₅Cu₂Mg₈Si₆ phase on mechanical properties of Al-Si-Cu-Mg alloy at elevated temperature. *Materials Science and Engineering A* 693: 26-32.

Centre for Materials Engineering and Smart Manufacturing (MERCU)
Faculty of Engineering and Built Environment
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan
Malaysia

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: anifarif@gmail.com

Diserahkan: 11 Mei 2019
Diterima: 12 Oktober 2019