

Permodelan Termodinamik Aloi Al-Si-Cu untuk Pemprosesan Logam Separa Pepejal (Thermodynamic Modelling of Al-Si-Cu Alloys for Semisolid Metal Processing)

M.S. SALLEH*, M.Z. OMAR, J. SYARIF & M.N. MOHAMMED

ABSTRAK

Pembentukan-tikso merupakan teknologi baharu untuk menghasilkan produk hampir siap dalam keadaan separa pepejal. Proses ini dapat mengurangkan makropengasingan, keliatan serta memerlukan daya pembentukan yang rendah. Sehingga kini, terdapat beberapa aloi aluminium seperti gred A319, A356 dan A357 digunakan untuk pemprosesan logam separa pepejal. Oleh itu, terdapat permintaan untuk mempelbagaikan aloi aluminium daripada gred yang lain untuk pemprosesan logam separa pepejal. Kajian ini membincangkan tentang permodelan termodinamik untuk meramal perubahan sifat aloi aluminium gred A319 apabila kandungan elemen pengalioan seperti tembaga, mangan dan ferum dipelbagaikan agar memenuhi kriteria pemprosesan logam separa pepejal. Kesemua pengiraan dalam kerja permodelan ini menggunakan perisian komersial 'Java-based Material Properties' (JMatPro). Pengiraan termodinamik berdasarkan persamaan 'Scheil' digunakan untuk menentukan julat suhu pemejalan (ΔT), kepekaan pecahan cecair (df_L/dT) dan suhu tingkap pemprosesan ($\Delta T^{30/50}$). Daripada pengiraan termodinamik, didapati suhu pemejalan aloi yang telah ditingkatkan %bt kandungan tembaga, mangan dan ferum menurun daripada 130 kepada 113°C manakala suhu eutektik meningkat daripada 510 kepada 515°C. Kepekaan pecahan cecair pula berkurangan daripada 0.017 kepada 0.007°C⁻¹ manakala suhu tingkap pemprosesan menurun daripada 26 kepada 24°C. Tindak balas perduaan eutektik pula berlaku antara 30 dan 50% pecahan cecair untuk kesemua kumpulan aloi. Gambarajah fasa digunakan untuk mengetahui fasa sebatian antara logam seperti β -Al₅FeSi dan Al₂Cu yang terbentuk dalam aloi tersebut. Hasil daripada permodelan termodinamik ini menunjukkan kesesuaian aloi yang dipelbagaikan %bt elemen tembaga, mangan dan ferum digunakan untuk pemprosesan logam separa pepejal.

Kata kunci: Julat suhu pemejalan; kepekaan pecahan cecair; pembentukan-tikso; pengiraan termodinamik; suhu tingkap pemprosesan

ABSTRACT

Thixoforming is a new technology in producing near net-shape products in semisolid state. This process can reduce macrosegregation, porosity and involve low forming forces. Currently, there are a few grades of aluminum alloys such as A319, A356 and A357 commonly used in semi-solid metal processing. Therefore, there is a demand to widen the range of aluminum alloys specially tailored for semisolid metal processing. This study discusses the thermodynamic modelling to predict changes in the properties of aluminum alloy A319 especially when the content of alloying elements such as copper, manganese and iron are varied in order to fulfill the criteria of semisolid metal processing. All the calculations in the present work were performed using Java-based Material Properties (JMatPro) commercial software. Thermodynamic calculation based on Scheil's equation is used to determine solidification temperature range (ΔT), liquid fraction sensitivity (df_L/dT) and processing window temperature ($\Delta T^{30/50}$). The thermodynamic calculation shows that the solidification temperatures have decreased from 130 to 113°C while the eutectic temperatures have increased from 510 to 515°C when the wt.% of copper, manganese and iron were increased. The liquid fraction sensitivity is reduced from 0.017 to 0.007°C⁻¹ and the processing window temperature is reduced from 26 to 24°C. Eutectics binary reactions occurred between 30 and 50% liquid fraction for all alloy groups. Phase diagram is used to identify the formation of intermetallic phase compound such as β -Al₅FeSi and Al₂Cu in the alloys. The results indicate the suitability of these modified alloys as potential materials for semisolid processing.

Keywords: Liquid fraction sensitivity; processing window temperature; solidification temperature range; thermodynamic calculation; thixoforming

PENGENALAN

Pemprosesan logam separa pepejal atau lebih dikenali sebagai pembentukan-tikso, adalah proses pembentukan komponen logam yang dibentuk semasa logam

tersebut berada dalam keadaan separa pepejal. Logam menunjukkan sifat tiksotropik dalam keadaan jeda suhu pepejal dan cecair yang disebabkan daripada peningkatan daya ricihan sehingga struktur rangka fasa

pepejal logam terurai sepenuhnya (Omar et al. 2011). Pembentukan-tikso telah menarik perhatian industri automotif untuk menghasilkan kenderaan cekap tenaga. Penggunaan tuangan aluminium dalam penghasilan komponen kenderaan telah meningkat dan membawa kepada keperluan untuk penghasilan komponen yang mempunyai kekuatan serta kebolehhidupan yang tinggi. Melalui kaedah pembentukan-tikso, kos serta masa penghasilan komponen adalah rendah kerana ia dihasilkan kepada bentuk produk hampir siap tanpa memerlukan proses sekunder (Birol 2007). Sehingga kini, kesemua aloi yang digunakan untuk pembentukan-tikso adalah daripada bahan logam yang dihasilkan khusus untuk proses tuangan atau tempaan. Lantaran itu, pembangunan aloi baharu yang sesuai untuk proses pembentukan-tikso amat penting agar ciri mekanikal aloi tersebut dapat digunakan sepenuhnya (Salleh et al. 2012). AloI yang terdiri daripada silikon sebagai pengaloi utama adalah penting kerana aloi tersebut bukan sahaja mempunyai kadar kebendaliran yang tinggi malah mempunyai isi padu eutektik Al-Si yang besar. Pengiraan termodinamik berpotensi untuk digunakan dalam mereka bentuk aloi baharu atau mempelbagaikan komposisi kimia aloi komersial dengan meningkatkan atau mengurangkan peratus berat (%bt) sesuatu elemen terhadap aloi tersebut supaya memenuhi kriteria pemprosesan logam separa pepejal. Perisian komersial seperti 'Java-based Material Properties' (JMatPro) biasanya digunakan untuk mengetahui kesan kepelbagaian komposisi pengaloi semasa pembangunan aloi baharu. Setiap elemen pengaloi seperti silikon, magnesium, tembaga dan mangan mempunyai peranan dalam menentukan ciri mekanikal aloi aluminium.

Permodelan termodinamik ini digunakan untuk mengetahui kesan peningkatan %bt elemen pengaloi seperti tembaga, mangan dan ferum terhadap aloi aluminium gred A319. Pemilihan kombinasi elemen pengaloi adalah berdasarkan cara Taguchi dengan menggunakan tatasusunan ortogon $L_9(3^4)$ yang terdiri daripada tiga elemen pengaloi iaitu tembaga, mangan dan ferum. Kriteria pemilihan aloi untuk pemprosesan logam separa pepejal adalah julat suhu pemejalan (ΔT), kepekaan pecahan cecair (df_L/dT) dan suhu tingkap pemprosesan ($\Delta T^{30/50}$). Penggunaan perisian JMatPro dapat meramalkan perubahan sifat bahan apabila elemen pengaloi divariasikan dengan cara meningkatkan %bt kandungan tembaga, mangan dan ferum serta berupaya mengenal pasti fasa sebatian antara logam yang terbentuk terhadap aloi yang dimodelkan dengan menggunakan pengiraan termodinamik.

KRITERIA PEMILIHAN ALOI UNTUK PEMROSESAN LOGAM SEPARA PEPEJAL

Pemilihan aloi yang sesuai untuk pemprosesan logam separa pepejal amat penting untuk menentukan kebolehbentukan-tikso yang dirujuk kepada kesesuaian sesuatu aloi untuk proses pembentukan-tikso. Sejak 10 tahun yang lalu,

beberapa penyelidik seperti Camacho et al. (2003); Chang et al. (2011); Han dan Viswanathan (2004) dan Liu et al. (2005) menggunakan permodelan termodinamik untuk mengkaji kebolehbentukan-tikso yang berasaskan aloi aluminium. AloI baharu yang sesuai untuk pembentukan-tikso diperlukan kerana aloi yang diperoleh di pasaran biasanya direka bentuk untuk kegunaan penuangan atau pengetukan. Dalam keadaan ini, aloi tersebut boleh dijalankan pengubahsuaian terhadap elemen pengaloi seperti mengurangkan kandungan elemen silikon atau meningkatkan kandungan elemen magnesium bergantung kepada penggunaan aloi tersebut (Modigell & Koke 2001). Kriteria pemilihan aloi adalah seperti berikut.

JULAT SUHU PEMEJALAN (ΔT)

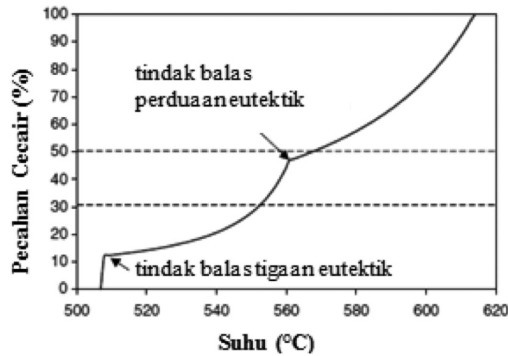
Suhu pemejalan ditakrifkan sebagai suhu di antara fasa pepejal dan cecair. AloI yang mempunyai suhu pemejalan yang kecil atau terlalu besar tidak sesuai untuk proses pembentukan-tikso. Ini adalah disebabkan suhu pemejalan yang terlalu kecil akan menyebabkan kesukaran untuk mengawal suhu semasa pemprosesan manakala suhu pemejalan terlalu besar akan menyebabkan koyakan panas berlaku. Julat suhu pemejalan yang dicadangkan ialah antara 20-130°C (Yuan-dong et al. 2010) dan 10-150°C (Patel et al. 2008).

KEPEKAAN PECAHAN CECAIR (df_L/dT)

Kepekaan pecahan cecair ditakrifkan oleh kecerunan keluk yang diperoleh daripada graf pecahan cecair melawan suhu seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1. Tindak balas perduaan eutektik harus berlaku antara 30 dan 50% pecahan cecair dengan pepejal- α aluminium mula mencair pada suhu antara 545 dan 575°C (Liu et al. 2005). Ini adalah untuk memudahkan kawalan pemprosesan kerana pembentukan cecair di atas 50% pecahan cecair akan menjadi perlahan. Kepekaan pecahan cecair perlu sekecil mungkin kerana nilai yang besar akan mengakibatkan perubahan besar pecahan cecair dengan perubahan kecil suhu. Ini akan membawa kepada perubahan yang tidak menentu dalam kelakuan reologi aloi tersebut dan biasanya kecacatan akan berlaku pada produk yang dihasilkan.

SUHU TINGKAP PEMROSESAN ($\Delta T^{30/50}$)

Suhu tingkap pemprosesan ditakrifkan sebagai selang suhu untuk pecahan cecair pada 30 dan 50% pecahan cecair. Suhu tingkap pemprosesan perlu besar untuk mendapatkan kestabilan serta memudahkan pemprosesan logam separa pepejal. Sebagai contoh, Tzimas dan Zavaliangos (1999) telah menjalankan modifikasi terhadap aloi A356 dengan meningkatkan kandungan tembaga daripada 1 hingga 10%. AloI yang diperoleh telah menunjukkan peningkatan suhu tingkap pemprosesan daripada 1 kepada 32°C. Liu et al. (2005) mencadangkan suhu tingkap pemprosesan paling minimum ialah 6°C antara 30 dan 50% pecahan cecair agar pengawalan suhu pemprosesan dapat dikawal dengan lebih mudah.



RAJAH 1. Diagram pecahan cecair melawan suhu (Liu et al. 2005)

Berdasarkan tiga kriteria di atas, pengiraan termodinamik digunakan untuk mempelbagaikan kandungan elemen pengalioan yang terdapat pada aloi gred A319 dengan cara meningkatkan %bt elemen tembaga, mangan dan ferum yang digunakan secara meluas dalam industri automotif. Cara Taguchi digunakan untuk mengoptimumkan %bt elemen pengalioan yang dipilih adalah dengan menggunakan tatasusunan ortogon $L_9(3^4)$ seperti dalam Jadual 1 dan 2. Pengiraan yang digunakan dalam permodelan termodinamik untuk mendapatkan persamaan Scheil bagi menentukan pecahan cecair adalah seperti berikut (Fredriksson & Akerlind 2012).

$$(C_L - C_S)df_s = (f_L) dC_L, \quad (1)$$

dengan C_S ialah jumlah bahan terlarut dalam pepejal, C_L ialah jumlah bahan terlarut dalam cecair, f_s adalah pecahan pepejal dan f_L adalah pecahan cecair. k ialah pekali agihan dan boleh ditulis seperti berikut:

$$k = \frac{C_s}{C_L}, \quad (2)$$

dengan menggantikan C_s ke dalam (1) persamaan berikut diperoleh:

$$C_L(1-k)df_s = (1-f_s). \quad (3)$$

Kamiran dijalankan di (3) dari 0 ke f_s dan dari C_0 ke C_L ($C_L = C_0$ pada $f_s = 0$)

$$\int_0^{f_s} \frac{df_s}{1-f_s} = \frac{1}{1-k} \int_{C_0}^{C_L} \frac{dC_L}{C_L}. \quad (4)$$

Hasil daripada (4) diperoleh persamaan Scheil (5) untuk menganggarkan pecahan cecair (f_L)

$$C_L = C_0(f_L)^{k-1}. \quad (5)$$

Kesan peningkatan pelbagai %bt elemen pengalioan seperti tembaga, mangan dan ferum serta perubahan fasa antara logam dimodelkan dan dianalisis menggunakan perisian JMatPro untuk mendapatkan gambarajah fasa yang terbentuk semasa pemprosesan logam separa pepejal.

HASIL DAN PERBINCANGAN

JULAT SUHU PEMEJALAN

Pengiraan suhu pemejalan bagi setiap aloi A hingga I telah dijalankan dan didapati penurunan ketara suhu pemejalan aloi A hingga I masing-masing iaitu 130, 128, 126, 125, 122, 119, 117, 115 dan 113°C seperti yang

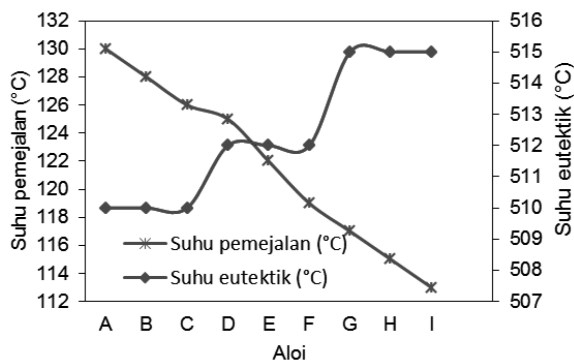
JADUAL 1. %bt elemen pengalioan mengikut cara Taguchi

Elemen pengalioan	Unit	Peringkat		
		1	2	3
A: Tembaga	%bt	3.5	5.5	7.5
B: Mangan	%bt	0.5	0.9	1.3
C: Ferum	%bt	0.8	1.2	1.6

JADUAL 2. Komposisi kimia aloi yang dikaji

Komposisi aloi (%bt)	Si	Cu	Mg	Mn	Zn	Ni	Fe	Al
Spesifikasi A319	5.0-6.5	3.0-4.0	0.30	0.50	1.0	0.35	0.8	Bal
Aloi A	5.7	3.5	0.30	0.50	1.0	0.35	0.8	Bal
Aloi B	5.7	3.5	0.30	0.90	1.0	0.35	1.2	Bal
Aloi C	5.7	3.5	0.30	1.30	1.0	0.35	1.6	Bal
Aloi D	5.7	5.5	0.30	0.50	1.0	0.35	0.8	Bal
Aloi E	5.7	5.5	0.30	0.90	1.0	0.35	1.2	Bal
Aloi F	5.7	5.5	0.30	1.30	1.0	0.35	1.6	Bal
Aloi G	5.7	7.5	0.30	0.50	1.0	0.35	0.8	Bal
Aloi H	5.7	7.5	0.30	0.90	1.0	0.35	1.2	Bal
Aloi I	5.7	7.5	0.30	1.30	1.0	0.35	1.6	Bal

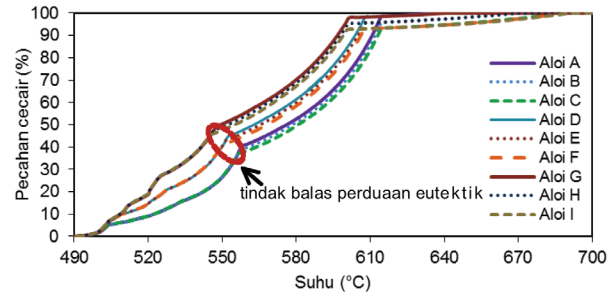
ditunjukkan dalam Rajah 2. Suhu pemejaln yang besar akan menyebabkan koyakan panas berlaku seperti yang telah dibincangkan dalam bahagian kriteria pemilihan aloi. Suhu pemejaln untuk aloi yang dikaji berada dalam julat suhu pemejaln yang dicadangkan oleh penyelidik yang terdahulu seperti Patel et al. (2008) dan Yuan Dong et al. (2010). Suhu eutektik pula meningkat iaitu 510°C untuk aloi A, B dan C, 512°C untuk aloi D, E dan F manakala 515°C untuk aloi G, H dan I. Dengan peningkatan suhu eutektik serta pengurangan suhu pemejaln, dijangka aloi yang telah ditingkatkan %bt elemen tembaga, mangan dan ferum sesuai digunakan untuk pemprosesan logam separa pepejal.



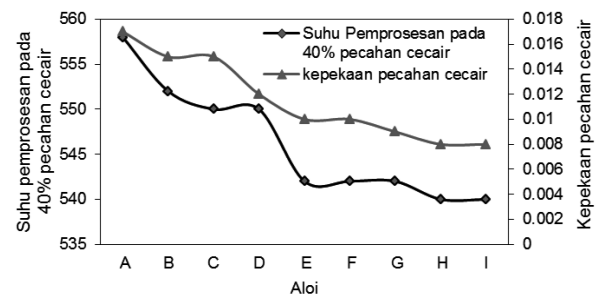
RAJAH 2. Suhu pemejaln dan suhu eutektik

KEPEKAAN PECAHAN CECAIR

Kepekaan pecahan cecair amat penting dalam pemprosesan logam separa pepejal kerana ia menentukan kestabilan suhu tingkap pemprosesan semasa proses ini dijalankan. Ia juga dapat mengawal sifat reologi dan mikrostruktur aloi tersebut dalam keadaan separa pepejal. Pengiraan kepekaan pecahan cecair diperolehi daripada graf pecahan cecair melawannya suhu seperti dalam Rajah 3. Tindak balas perduaan eutektik berlaku antara 30 dan 50% pecahan cecair pada graf tersebut. Untuk aloi A, B dan C tindak balas ini berlaku pada 38, 36 dan 34% pecahan cecair pada suhu 558, 557 dan 556°C manakala untuk aloi D, E dan F, tindak balas perduaan eutektik pula berlaku pada 44, 42 dan 40% pecahan cecair iaitu pada suhu 554, 552 dan 550°C. Untuk aloi G, H dan I pula, tindak balas ini berlaku pada 50, 47 dan 44% pecahan cecair pada suhu 548, 546 dan 544°C. Rajah 4 pula menunjukkan suhu pemprosesan pada 40% pecahan cecair dan kepekaan pecahan cecair untuk aloi A hingga I. Aloi A yang mempunyai komposisi kimia aluminium gred A319 mempunyai kepekaan pecahan cecair yang tinggi iaitu $0.017^{\circ}\text{C}^{-1}$ manakala penurunan kepekaan pecahan cecair kepada $0.015^{\circ}\text{C}^{-1}$ dapat dilihat pada aloi B dan C. Corak yang sama dapat dilihat pada aloi D dengan kepekaan pecahan cecair $0.012^{\circ}\text{C}^{-1}$ berkurangan kepada $0.010^{\circ}\text{C}^{-1}$ pada aloi E dan F manakala kepekaan pecahan cecair untuk aloi G ialah $0.009^{\circ}\text{C}^{-1}$ berkurangan kepada $0.007^{\circ}\text{C}^{-1}$ pada aloi H dan I. Ini menunjukkan nisbah %bt mangan kepada ferum 0.9: 1.2 adalah optimum kerana



RAJAH 3. Graf pecahan cecair melawannya suhu



RAJAH 4. Suhu pemprosesan dan kepekaan pecahan cecair aloi A hingga I

peningkatan %bt kedua-dua elemen ini kepada 1.3:1.6 dan tidak dapat mengurangkan lagi kepekaan pecahan cecair. Berdasarkan kriteria pemilihan aloi, peningkatan %bt elemen mangan dan ferum terhadap aloi A319 dapat mengurangkan peratus pecahan cecair dan menurunkan kepekaan pecahan cecair menjadikan aloi tersebut sesuai untuk pemprosesan logam separa pepejal.

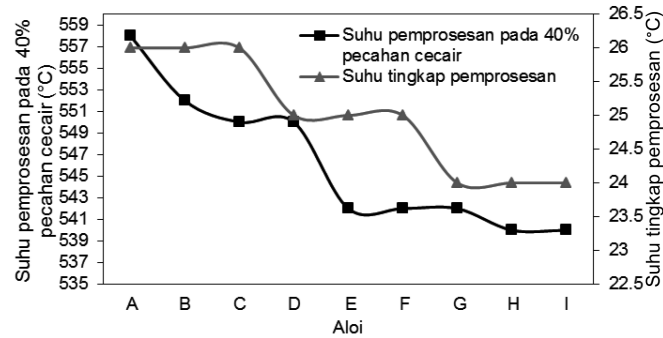
SUHU TINGKAP PEMROSESAN

Suhu tingkap pemprosesan untuk aloi A, B, C ialah 26°C menurun kepada 25°C pada aloi D, E, F seterusnya berkurangan kepada 24°C pada aloi G, H dan I. Kesemua suhu tingkap pemprosesan melebihi 6°C seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5 melebihi nilai minimum yang dicadangkan oleh Liu et al. (2005). Suhu tingkap pemprosesan yang besar memastikan proses pembentukan-tikso berada dalam keadaan stabil sekiranya perubahan suhu berlaku terlalu cepat semasa proses pembentukan-tikso. Penurunan suhu tingkap pemprosesan ini adalah disebabkan oleh kesan peningkatan %bt kandungan tembaga dalam aloi A319.

Ketiga-tiga ciri yang dibincangkan menggambarkan kesan peningkatan %bt elemen tembaga, mangan dan ferum terhadap aloi aluminium gred A319 sehingga dapat memenuhi kriteria pembentukan-tikso seperti yang telah dibincangkan.

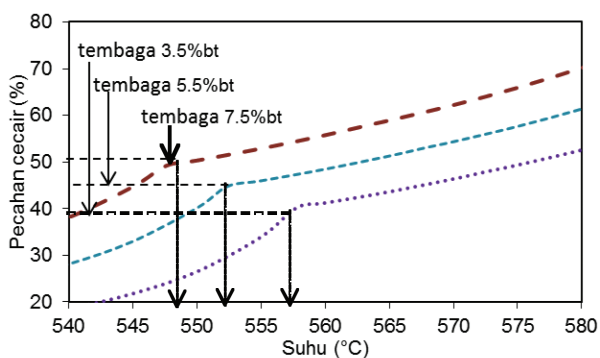
KESAN PENINGKATAN KANDUNGAN TEMBAGA

Tembaga mempunyai kesan yang besar untuk memberikan kekuatan dan kekerasan kepada aloi aluminium. Tembaga



RAJAH 5. Suhu pemrosesan pada 40% pecahan cecair dan suhu tingkap pemrosesan untuk aloi A hingga I

digunakan untuk memperbaiki kebolehmesinan aloi dengan menambahkan kekerasan kepada matriks aloi serta dapat memberikan rintangan kakisan kepada aloi aluminium. Rajah 6 menunjukkan kesan peningkatan peratus kandungan tembaga terhadap aloi A319. Didapati, tindak balas perduaan eutektik berlaku pada 38, 44 dan 50% pecahan cecair apabila peratusan berat tembaga ditingkatkan daripada 3.5, 5.5 dan 7.5 %bt. Ini menunjukkan kandungan 7.5 %bt tembaga adalah maksimum untuk aloi A319 dalam mengawal pecahan cecair agar berada dalam julat 30 dan 50% pecahan cecair seperti yang telah dibincangkan. Peningkatan %bt elemen tembaga dalam aloi A319 juga dapat mengurangkan suhu pemrosesannya iaitu 558°C untuk 3.5 %bt kandungan tembaga, 553°C untuk 5.5 %bt kandungan tembaga dan 548°C untuk 7.5 %bt kandungan tembaga seperti ditunjukkan dalam Rajah 6. Pengurangan suhu pemrosesan ini dapat memanjangkan lagi jangka hayat acuan melalui pengurangan kejutan terma yang berlaku pada acuan semasa proses pembentukan-tikso (Salleh et al. 2013).

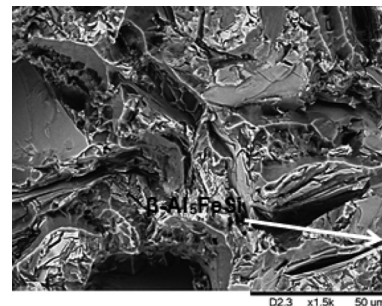


RAJAH 6. Peningkatan peratus kandungan tembaga terhadap aloi A319

KESAN PENINGKATAN KANDUNGAN MANGAN DAN FERUM

Penambahan ferum ke dalam aloi Al-Si-Cu adalah untuk menambahkan kekuatan aloi tersebut di samping dapat mengurangkan lekatan aloi kepada acuan logam. Analisis ini dijalankan terhadap aloi A, B dan C memandangkan

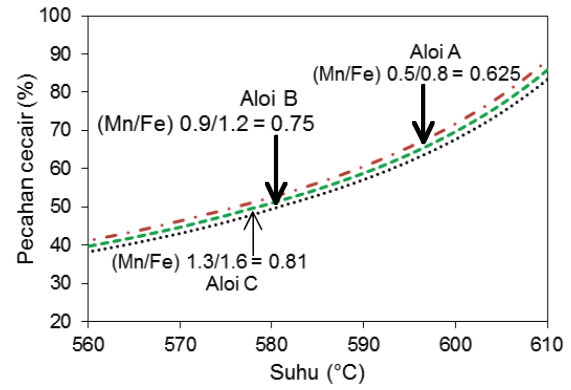
nisbah mangan kepada ferum adalah sama untuk aloi D, E dan F serta aloi G, H dan I. Elemen ferum yang terdapat dalam aloi aluminium biasanya membentuk sebatian antara logam yang dikenali sebagai $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ yang menghasilkan penukleusan keporosan dan mempunyai pengaruh yang besar dalam perambatan rekahan lesu. Rajah 7 menunjukkan fraktograf yang diperoleh daripada aloi A, membuktikan penukleusan keporosan berlaku pada anak panah yang ditunjukkan dan seterusnya perambatan rekahan lesu yang disebabkan oleh sebatian antara logam $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$. Sebatian antara logam ini juga membawa kepada pengurangan kemuluran kepada aloi tersebut. $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ mula terbentuk pada suhu antara 100 hingga 210°C dan 455 hingga 573°C seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 3. Setelah modifikasi dijalankan dengan meningkatkan %bt elemen mangan dan ferum terhadap aloi A seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 8, didapati fasa berbentuk jarum $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ yang ditunjukkan dalam Rajah 9 berkurangan pada aloi B dan tidak wujud pada aloi C. Rajah 10, 11 dan 12 membuktikan pengurangan fasa ini dengan peningkatan nisbah %bt kandungan mangan dan ferum. Ini membuktikan 1.3 %bt mangan dapat meneutralkan fasa berbentuk jarum $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ yang mempunyai 1.6 %bt kandungan ferum yang terdapat di dalam aloi A319. Peneutralan fasa ini menyebabkan pembentukan fasa baharu iaitu $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$ yang dikenali sebagai 'skrip Cina' yang terdapat pada aloi C, F dan I seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 3.



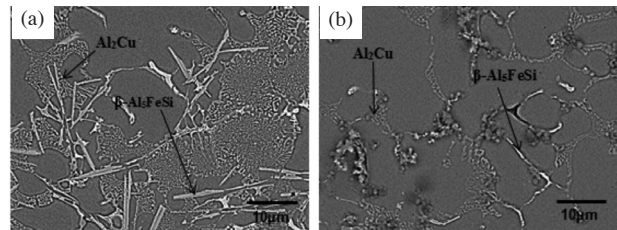
RAJAH 7. Fraktograf SEM (1000x) dalam aloi A menunjukkan penukleusan keporosan yang disebabkan oleh fasa $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$

JADUAL 3. Suhu pembentukan sebatian antara logam dari perisian JMatPro

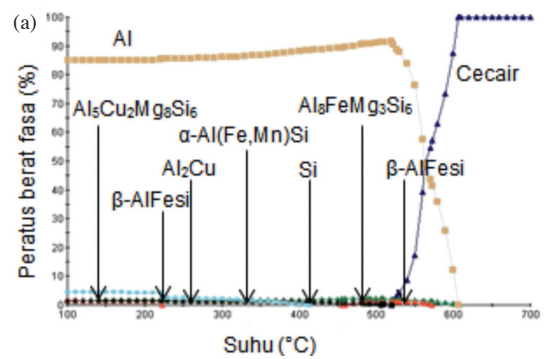
Aloi	Sebatian antara logam	Suhu (°C)
A	Al ₂ Cu	100-468
	β-Al ₅ FeSi	100-210
	α-Al(Fe,Mn)Si	455-573
	Al ₅ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆	222-490
	Al ₈ FeMg ₃ Si ₆	507-521
B	Al ₂ Cu	100-469
	β-Al ₅ FeSi	100-210
	α-Al(Fe,Mn)Si	100-638
	Al ₇ Cu ₄ Ni	100-515
	Al ₅ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆	100-490
C	Al ₂ Cu	100-469
	α-Al(Fe,Mn)Si	100-648
	Al ₇ Cu ₄ Ni	100-515
	Al ₅ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆	100-515
	Al ₁₅ (Mn,Fe) ₃ Si ₂	100-324
D	Al ₂ Cu	100-479
	β-Al ₅ FeSi	100-210
	α-Al(Fe,Mn)Si	455-565
	Al ₅ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆	100-499
	Al ₇ Cu ₄ Ni	100-518
E	Al ₂ Cu	100-480
	β-Al ₅ FeSi	100-210
	α-Al(Fe,Mn)Si	100-639
	Al ₅ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆	100-510
	Al ₇ Cu ₄ Ni	100-519
F	Al ₂ Cu	100-480
	α-Al(Fe,Mn)Si	100-649
	Al ₅ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆	100-508
	Al ₇ Cu ₄ Ni	100-518
	Al ₁₅ (Mn,Fe) ₃ Si ₂	100-323
G	Al ₂ Cu	100-491
	β-Al ₅ FeSi	100-210
	α-Al(Fe,Mn)Si	455-573
H	α-Al(Fe,Mn)Si	220-627
	Al ₅ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆	222-507
	Al ₇ Cu ₄ Ni	222-514
	Al ₂ Cu	100-493
	β-Al ₅ FeSi	100-210
I	α-Al(Fe,Mn)Si	100-640
	Al ₅ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆	100-509
	Al ₇ Cu ₄ Ni	100-518
	Al ₂ Cu	100-492
	α-Al(Fe,Mn)Si	100-650
I	Al ₅ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆	100-507
	Al ₇ Cu ₄ Ni	100-518
	Al ₁₅ (Mn,Fe) ₃ Si ₂	100-324



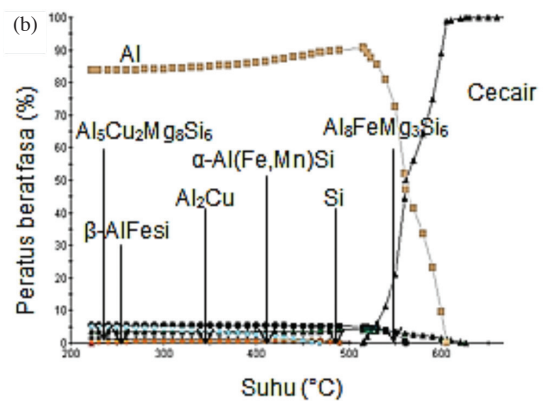
RAJAH 8. Nisbah (Mn:Fe) dalam aloi A319



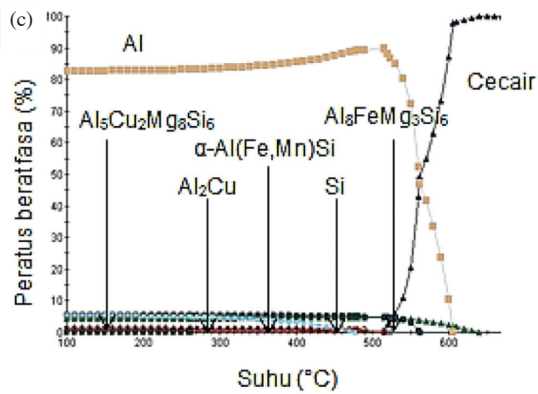
RAJAH 9. Imej SEM (1000× pembesaran) untuk aloi A (a) penuangan lazim (b) pembentukan-tikso



RAJAH 10. Rajah fasa aloi A



RAJAH 11. Rajah fasa aloi B



RAJAH 12. Rajah fasa aloi C

KESIMPULAN

Sebelum sesuatu aloi dapat digunakan untuk proses pembentukan-tikso, ia terlebih dahulu perlu memenuhi kriteria pemprosesan logam separa pepejal. Oleh itu, permodelan menggunakan pengiraan termodinamik digunakan terhadap aloi A319 untuk mengetahui kesan peningkatan %bt kandungan tembaga, mangan dan ferum terhadap kriteria pemprosesan logam separa pepejal seperti julat suhu pemejalan, kepekaan pecahan cecair dan suhu tingkat pemprosesan. Cara Taguchi digunakan untuk mengoptimumkan peningkatan %bt elemen pengalioan yang dipilih untuk aloi A hingga I. Daripada pengiraan termodinamik, didapati suhu pemejalan menurun setelah 5.5 dan 7.5 %bt tembaga ditingkatkan serta peningkatan %bt kandungan mangan dan ferum masing-masing mengikut nisbah 0.9 : 1.2 dan 1.3 : 1.6 turut menyumbang kepada penurunan suhu pemejalan. Suhu eutektik pula meningkat dengan peningkatan %bt kandungan tembaga manakala peningkatan %bt elemen mangan dan ferum tidak memberi kesan kepada peningkatan suhu eutektik. Tindak balas perduaan eutektik pula berlaku pada 30 dan 50% pecahan cecair untuk kesemua aloi dan kepekaan pecahan cecair menunjukkan corak penurunan iaitu $0.017^{\circ}\text{C}^{-1}$ pada aloi A dan $0.015^{\circ}\text{C}^{-1}$ pada aloi B dan C. Corak penurunan yang sama dapat dilihat pada aloi D dengan kepekaan pecahan cecair $0.012^{\circ}\text{C}^{-1}$ berkurangan kepada $0.010^{\circ}\text{C}^{-1}$ pada aloi E dan F manakala kepekaan pecahan cecair untuk aloi G ialah $0.009^{\circ}\text{C}^{-1}$ berkurangan kepada $0.007^{\circ}\text{C}^{-1}$ pada aloi H dan I. Peningkatan %bt elemen tembaga memberi kesan kepada penurunan kepekaan pecahan cecair manakala peningkatan %bt elemen mangan dan ferum mengikut nisbah 0.9 : 1.2 adalah optimum dan tidak berlaku penurunan kepekaan pecahan cecair apabila nisbah %bt mangan dan ferum ditingkatkan kepada 1.3 : 1.6. Suhu tingkat pemprosesan pula menunjukkan corak penurunan apabila %bt elemen tembaga ditingkatkan dan tiada kesan penurunan suhu tingkat pemprosesan apabila %bt mangan dan ferum ditingkatkan. Peningkatan peratus elemen tembaga juga memberi kesan kepada peningkatan peratus pecahan cecair dan pengurangan suhu pemprosesan

logam separa pepejal. Peningkatan peratus mangan berjaya mengurangkan fasa berbentuk jarum $\beta\text{-Al}_3\text{FeSi}$ dan didapati 1.3 %bt mangan dapat meneutralkan fasa $\beta\text{-Al}_3\text{FeSi}$ yang mengandungi 1.6 %bt ferum. Peneutralan fasa ini menyebabkan pembentukan fasa baharu iaitu $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$ yang dikenali sebagai 'skrip Cina' yang terdapat pada aloi C, F dan I. Berdasarkan pengiraan termodinamik, aloi A hingga I berpotensi untuk dijadikan aloi untuk pemprosesan logam separa pepejal kerana memenuhi kriteria pembentukan-tikso.

PENGHARGAAN

Kajian ini telah dibiayai oleh Kementerian Pendidikan Malaysia (dahulu dikenali sebagai Kementerian Pengajian Tinggi) 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: 94-101.
- Chang, K., Liu, S., Zhao, D., Du, Y., Zhou, L. & Chen, L. 2011. Thermodynamic description of the Al-Cu-Mg-Mn-Si quinary system and its application to solidification simulation. *Thermochimica Acta* 512: 258-267.
- Camacho, A.M., Atkinson, H.V., Kapranos, P. & Argent, B.B. 2003. Thermodynamic predictions of wrought alloy compositions amenable to semi-solid processing. *Acta Materialia* 51: 2319-2330.
- Fredriksson, H. & Akerlind, U. 2012. *Solidification and Crystallization Processing in Metals and Alloys*. New York: John Wiley & Sons Ltd.
- Han, Q. & Viswanathan, S. 2004. The use of thermodynamic simulation for the selection of hypoeutectic aluminium-silicon alloys for semisolid metal processing. *Materials Science and Engineering A* 364: 48-54.
- 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: 3807-3819.
- Modigell, M. & Koke, J. 2001. Rheological modelling on semi-solid alloys and simulation of thixocasting processes. *Journal of Materials Processing Technology* 111: 53-58.
- Omar, M.Z., Atkinson, P. & Kapranos, P. 2011. Thixotropy in semisolid steel slurries under rapid compression. *Metallurgical and Material Transaction A* 42: 2807-2819.
- Patel, J.B., Liu Y.Q., Shao, G. & Fan, Z. 2008. Rheo-processing of an alloy specifically designed for semisolid metal processing based on the Al-Mg-Si system. *Material Science Engineering A* 476: 341-349.
- Salleh, M.S., Omar, M.Z., Syarif, J. & Mohammed, M.N. 2013. Thermodynamic simulation on thixoformability of aluminium alloys for semi-solid processing. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation* 7: 286-293.
- Tzimas, E. & Zavaliangos, A. 1999. Materials selection for semisolid processing. *Materials and Manufacturing Processes* 14(2): 217-230.
- Yuan-dong, L., Apelian, D., Bo, X., Ying, M. & Yuan, H. 2010. Commercial AM60 alloy for semisolid processing: Alloy optimization and thermodynamic analysis. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 20: 1572-1578.

M.S. Salleh*, M.Z. Omar, J. Syarif & M.N. Mohammed
Jabatan Kejuruteraan Mekanik dan Bahan
Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 Bangi, Selangor
Malaysia

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: shukor@utem.edu.my

Diserahkan: 15 Januari 2013
Diterima: 3 September 2013

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