

Pengaruh Cu terhadap fasa intermetalik β -Al₉Fe₂Si₂ pada sistem quaternary Al-Si-Fe-Cu

Deni Ferdian^{1,*}, Derry Rahma Yoda², Yus Prasetyo², Teguh Prasetyo², Bambang Suharno¹

¹ Dept. Teknik Metalurgi dan Material-Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok, 16424

² CMPFA, Dept. Teknik Metalurgi dan Material-Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok, 16424

* E-mail : deni @metal.ui.ac.id

Abstrak. Paduan Al-Si merupakan salah satu jenis paduan aluminium yang sering digunakan didalam aplikasi sehari-hari. Salah satu masalah yang sering dihadapi adalah keberadaan fasa intermetalik sebagai akibat adanya unsur Fe yang terakumulasi atau ditambahkan selama siklus aplikasinya. Pada penelitian ini digunakan paduan *high purity* Al-6.5Si-1Fe yang ditambahkan dengan unsur pemadu Cu, sebagai salah satu elemen yang ditambahkan pada aplikasi komersial paduan Al-Si. Penelitian ini bertujuan untuk memahami efek laju pendinginan solidifikasi serta pengaruh penambahan unsur Cu terhadap morfologi pertumbuhan dan kinetika fasa intermetalik beta. Pengujian dilakukan dengan menggunakan *Simultaneous Thermal Analysis* (STA). Karakterisasi fasa intermetalik dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik dan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Hasil penelitian menunjukkan adanya pengaruh Cu pada perubahan panjang maksimum dan rata-rata fasa intermetalik beta, dimana panjang maksimum fasa beta pada paduan Al-6,5Si-1Fe-1Cu adalah 385 μ m, sedangkan pada paduan Al-6,5Si-1Fe-8Cu adalah 288 μ m. Sedangkan penurunan panjang rata-rata fasa intermetalik beta sebesar 32%.

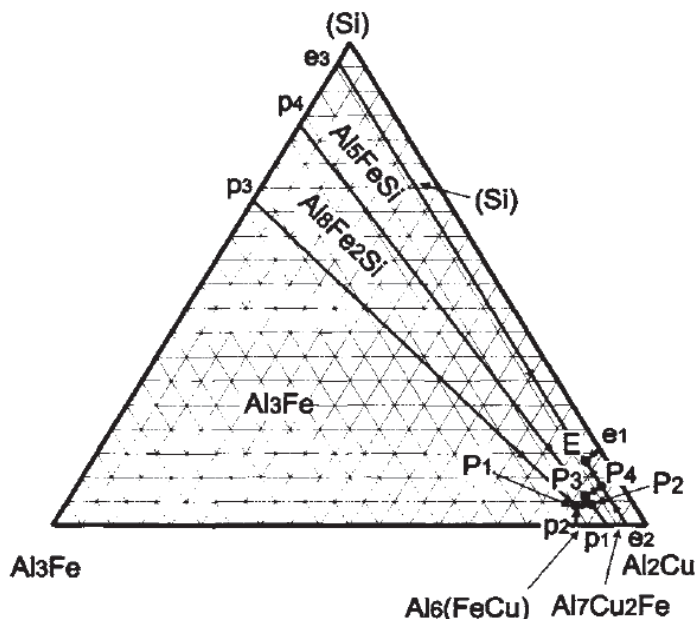
Kata Kunci: Paduan Al-Si, Fasa Intermetalik Beta, Laju Pendinginan, Solidifikasi, *Thermal Analysis*

1. Pendahuluan

Kelebihan paduan Al-Si dalam kekuatan mekanis dan karakteristiknya yang ringan mengakibatkan adanya peningkatan volume penggunaan paduan ini didalam industri otomotif. Data menunjukkan pada tahun 1990 berat rata-rata paduan Al dari berat total kendaraan hanya 50 kg, sedangkan pada tahun 2012 angka tersebut sudah meningkat hingga 140 kg [1]. Akan tetapi, salah satu kelemahan dari proses daur ulang pada industri Al adalah sulitnya untuk mengontrol kadar pengotor pada logam terutama unsur besi. Rendahnya kelarutan unsur besi didalam paduan Al mengakibatkan terbentuknya fasa intermetalik pada daerah interdendritik selama proses solidifikasi. Salah satu fasa intermetalik yang tidak diinginkan adalah fasa intermetalik beta (β -Al₉Fe₂Si₂). Penelitian oleh Gowri dan Samuel [2], Suharno et al. [3] dan Nanda et al. [4] menunjukkan pengaruh fasa intermetalik beta terhadap berkurangnya fluiditas pada saat solidifikasi. Elsebaie et al. [5] juga menunjukkan fasa intermetalik beta sebagai tempat inisiasi retakan pada hasil pengujian impak.

Pada awalnya fasa intermetalik beta dikarakterisasikan sebagai fasa dengan bentuk jarum (needle-like) akan tetapi perkembangan lebih lanjut dengan teknologi 3 dimensi melalui deep etch dan tomografi menunjukkan fasa beta sebagai plat pipih (plate-like). Dinnis dan Taylor [6] melakukan serial sectioning dan menggabungkan potongan gambar fasa intermetalik beta hasil pengujian metalografi menjadi struktur 3 dimensi yang saling terkoneksi. Walau pun, karakterisasi fasa intermetalik beta sebagai bentuk jarum tidak selamanya benar seperti yang dibuktikan oleh Ferdian et al [7]. Sehingga sebaiknya klasifikasi fasa tidak hanya berdasarkan bentuk morfologinya.

Unsur Cu merupakan unsur pemadu yang umum digunakan pada paduan Al-Si komersial. Seperti terlihat pada paduan seri A319 memiliki kandungan kimia 6%Si dan 3-4% Cu. Pada diagram fasa untuk 4 unsur seperti pada system Al-Si-Fe-Cu cukup sulit untuk diilustrasikan secara dua dimensi, sehingga arah pembekuan (*solidification path*) tidak mudah dililustrasikan. Salah satu pendekatannya dengan melihat proyeksi liquidus (*liquidus projection*) pada system presipitat Al-Fe terhadap Si dan Cu seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Proyeksi liquidus polythermal dari diagram Al-Fe-Si-Cu [8]

Dari diagram fasa Al-Si-Fe-Cu dapat dilihat precipitasi fasa intermetalik beta terjadi pada garis e3-E dengan reaksi $L \rightarrow (Al) + \beta + (Si)$ terkait reaksi primer eutektik silikon. Selain itu terdapat reaksi intermetalik lainnya yaitu reaksi presipitasi N-Al₇Cu₂Fe pada garis P4-E. Proses solidifikasi berakhir pada titik (E) sekunder eutektik atau *post eutectic* θ Al₂Cu dengan reaksi $L \rightarrow (Al) + \beta + (Si) + \theta$ Al₂Cu. Sehingga pada akhir reaksi sekunder eutektik untuk sistem dengan kandungan Cu tinggi dimungkinkan adanya 5 fasa padat pada bagian akhir yaitu primary (Al), β Al₉Fe₂Si₂, eutektik (Si), N-Al₇Cu₂Fe dan presipitat θ Al₂Cu.

Penelitian terdahulu yang dilakukan telah dilakukan oleh Ferdian et al. [9,10] pada paduan hypoeutectic sintetik Al_{6.5}Si₁Fe memperlihatkan pengaruh laju pendinginan terhadap morphology fasa beta, terutama pada pre-eutectic beta yang terbentuk sebelum reaksi presipitasi (Al)-Si. Penelitian kali ini bertujuan untuk melihat pengaruh unsur Cu dan laju pendinginan pada pertumbuhan fasa intermetalik beta.

2. Metode Penelitian

Sampel uji dibuat dengan melakukan pemaduan *master alloy* Al-Si (Al 99%, PT. Inalum) dengan penambahan Fe 80% briket dan Cu 80% briket (Hoesch-Metalurgie) untuk mendapatkan komposisi kimia akhir yang diinginkan. Peleburan dilakukan didalam dapur mini dengan penutup untuk mengurangi proses oksidasi. Selain itu, pada sampel tidak dilakukan penambahan *grain refiner* atau *modifier*. Hasil uji komposisi kimia dengan *optical emission spectrometer* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil komposisi kimia paduan quaternary Al-Si-Fe-Cu

Alloys	Persentase unsur (%)					
	Al	Si	Fe	Mg	Cu	Mn
Al-6.5Si-1Fe-1Cu	90.9	6.65	1.1	<0.0001	1.18	0.006
Al-6.5Si-1Fe-7.5Cu	85.1	6.40	0.9	<0.0001	7.47	0.002

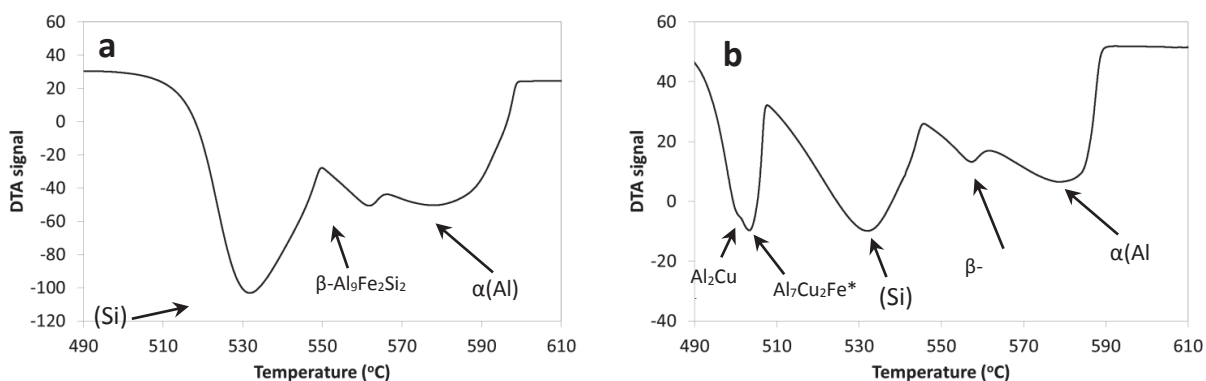
Selanjutnya sampel pengujian *thermal analysis* dilakukan dengan STA untuk mendapatkan profil solidifikasi paduan dengan laju pendinginan yang terkontrol. Pengujian dilakukan dengan memanaskan sampel dengan laju 15°C/min dari temperatur ruang. Kemudian pada temperature 650°C, sampel ditahan selama 10 menit dan dilanjut dengan pendinginan. Proses pengujian dengan variasi laju pendinginan 2, 5 dan 10°C/min. Selama pengujian, gas Nitrogen dengan laju 20 ml/min diupayakan kedalam sistem untuk menghindari terjadinya proses oksidasi sampel. Karakterisasi fasa intermetalik beta hasil pengujian STA dilakukan dengan pengamatan metalografi menggunakan SEM (*Scanning*

Electron Microscope). Persiapan sampel yang dilakukan adalah pengamplasan dengan grid #100, #220, #320, 400, #600, #800, #1000 dan #1200. Kemudian sampel di poles dengan menggunakan alumina 0,5 micron. Pengamatan metalografi dilakukan pada kondisi tanpa etsa untuk menghindari terjadinya pelarutan fasa yang terbentuk. Analisa kualitatif dan kuantitatif fasa intermetalik beta kemudian dilakukan dengan menggunakan bantuan *software image analyser* (imageJ ver 1.49 National Institute of Health, USA) [11] untuk mengetahui perubahan morfologinya.

3. Diskusi dan Pembahasan

3.1. Pengujian STA

Pada pengujian STA, dilakukan analisa temperatur karakteristik pada kurva thermogram untuk paduan Al-6,5Si-1Fe-1Cu dan Al-6,5Si-1Fe-8Cu. Reaksi perubahan fasa atau *thermal arrest* pada kurva secara exotermik ditunjukkan dengan nilai puncak signal yang lebih negatif. Gambar 2, memperlihatkan kurva thermogram Al-6,5Si-1Fe-8Cu, dimana *thermal arrest* pertama diasosiasikan dengan nukleasi primary (Al) yang kemudian tumbuh sebagai matrik utama pada paduan. Seiring dengan proses solidifikasi, presipitasi berikutnya adalah fasa intermetalik beta (β -Al₉Fe₂Si₂) yang tumbuh pada daerah interdendritik diantara dendrit (Al) sebagai akibat dari pengkayaan unsur Fe sehingga terbentuk presipitat intermetalik. Lebih lanjut pembekuan eutektik silikon, dan diakhiri presipitasi N-Al₇Cu₂Fe dan eutektik sekunder θ Al₂Cu.



Gambar 2. Thermogram STA dengan laju pendinginan 10°C/min (a) Al-6,5Si-1Fe-1Cu (b) Al-6,5Si-1Fe-8Cu

Untuk sampel Al-6,5Si-1Fe-1Cu pada Gambar 2, *thermal arrest* terjadi pada 3 puncak pertama, sedangkan puncak pada kurva yang terkait dengan intermetalik fasa Cu tidak terlihat. Hal ini disebabkan level paduan Cu yang rendah, sedangkan kelarutan Cu didalam matrik Al cukup tinggi sehingga tidak membentuk fasa intermetalik yang bebas pada daerah interdendritik.

3.2. Pengamatan SEM

Pengamatan pada SEM pada Gambar 3 memperlihatkan kontras warna yang lebih baik untuk fasa intermetalik, dimana perbedaan kontras sebagai akibat dari perbedaan berat atom dari unsur yang terkandung. Warna terang menunjukkan fasa tersebut disusun oleh atom yang lebih berat, dalam hal ini adalah atom Fe dan Cu. Pengamatan secara 2D menunjukkan fasa beta memiliki morfologi jarum dengan perubahan pada ketebalannya seiring dengan meningkatnya laju pendinginan dari 2°C/min ke 10°C/min. Namun demikian, perhitungan untuk fraksi volume sulit dilakukan karena kecilnya perbedaan kontras antara intermetalik Fe dan intermetalik Cu yang ada.

3.3. Analisa Image Analysis

Panjang fasa beta dievaluasi dengan menggunakan data gambar penampang 2 dimensi dari SEM. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan bantuan ImageJ *software*. Pengukuran panjang dilakukan dengan mengukur garis lurus dari kedua ujung jarum fasa beta. Pengukuran hanya dilakukan pada 10 partikel fasa beta terpanjang dari setiap kondisi laju pendinginan, sehingga dihasilkan panjang maksimum dan panjang rata-rata fasa beta. Lokasi pengambilan foto dilakukan pada berbagai lokasi

pada penampang sampel untuk meningkatkan sebaran dan perbedaan untuk tiap lokasi dan sampel. Hasil pengamatan menunjukkan adanya perbedaan panjang maksimum fasa beta dari kedua jenis paduan, seperti terlihat pada Gambar 4.

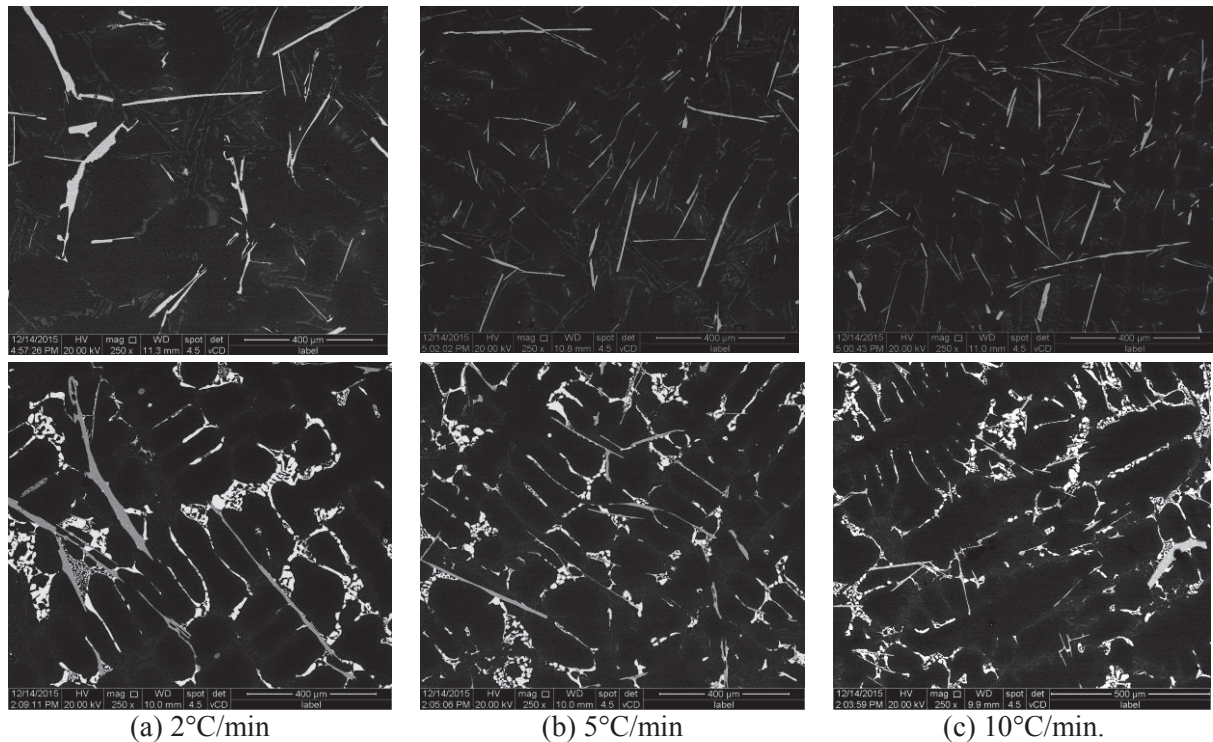
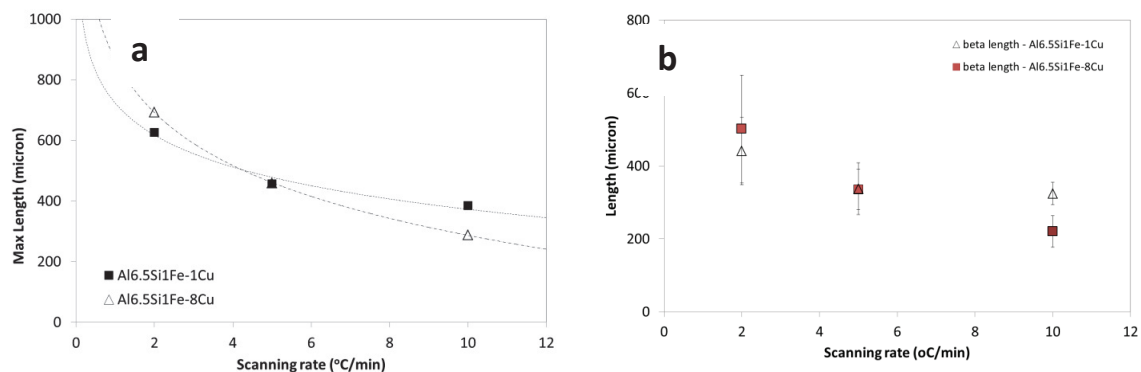


Figure 3. SEM Microstruktur sampel STA untuk paduan Al-6,5Si-1Fe-1Cu (baris atas) dan Al-6,5Si-1Fe-8Cu (baris bawah). Fasa beta diidentifikasi berbentuk jarum dan berwarna terang.

Peningkatan laju pendinginan secara umum akan mengurangi panjang fasa beta. Akan tetapi pengaruh peningkatan kadar Cu tidak mengakibatkan pengurangan ukuran pada laju pendinginan yang lambat. Pengaruh pengurangan ukuran baru dapat dilihat pada laju pendinginan 10°C/min, dimana panjang maksimum pada paduan Al-6,5Si-1Fe-1Cu adalah 385 µm, sedangkan pada paduan Al-6,5Si-1Fe-8Cu adalah 288 µm (25% reduksi). Demikian juga dengan panjang rata-rata fasa beta. Peningkatan laju pendinginan berakibat pada pengurangan rata-rata fasa beta dan lebih seragamnya ukuran, dilihat dari nilai standar deviasinya. Trend yang sama juga dapat dilihat pada ukuran panjang rata-rata, dimana pengurangan ukuran terlihat pada laju pendinginan yang lebih tinggi. Pengamatan menunjukkan adanya pengurangan rata-rata ukuran fasa beta sebesar 104 µm (32% reduksi), dari ukuran 324 µm pada paduan Al-6,5Si-1Fe-1Cu menjadi 244 µm pada paduan Al-6,5Si-1Fe-8Cu.



Gambar 4. Efek laju pendinginan pada evolusi perubahan fasa beta untuk paduan Al-6,5Si-1Fe-1Cu dan Al-6,4Si-1Fe-8Cu (a) panjang maximum (b) panjang rata-rata

4. Kesimpulan

Penelitian ini memperlihatkan adanya pengaruh unsur Cu tersebut pada morfologi dan dimensi fasa intermetalik beta. Hasil penelitian pada paduan Al-6,5Si-1Fe-1Cu dan Al-6,5Si-1Fe-8Cu menunjukkan adanya pengurangan panjang maximum dan rata-rata fasa intermetalik beta, dimana panjang maksimum pada paduan Al-6,5Si-1Fe-1Cu adalah 385 μm , sedangkan pada paduan Al-6,5Si-1Fe-8Cu adalah 288 μm (25% reduksi). Selain itu pengurangan rata-rata ukuran fasa beta sebesar 104 μm (32% reduksi), dari ukuran 324 μm pada paduan Al-6,5Si-1Fe-1Cu menjadi 244 μm pada paduan Al-6,5Si-1Fe-8Cu. Pengaruh pengurangan ukuran tersebut terlihat pada laju pendinginan 10°C/min, Akan tetapi, efek reduksi tersebut tidak terjadi pada laju pendinginan yang lebih rendah.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai melalui skema Hibah UI, DRPM Universitas Indonesia-2015. Terima kasih kepada PT. Inalum untuk penyediaan bahan baku Aluminium 99,9% dan PT. Sentosa Metalurgi Mas untuk bahan baku pendukung lainnya.

5. Daftar Pustaka

- [1] European Aluminium Association, Aluminium in cars-unlocking the light-weighting potential, (2013). http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2013/10/EAA-Aluminium-in-Cars-Unlocking-the-light-weighting-potential_September2013_03.pdf, accessed 30 June 2014.
- [2] S. Gowri, F.H. Samuel, "Effect of Alloying Element on the Solidification Characteristics and Microstructure of Al-Si-Cu-Mg-Fe 380 Alloy", *Metall. Trans.A.*, 25, 437-448, 1994.
- [3] B. Suharno, I.P. Nanda, A. Baskoro, "Pengaruh kadar besi terhadap pembentukan fasa intermetlik Al-Fe-Si dan nilai fluiditas paduan hipoeutektik Aluminium Silikon", *Jurnal Teknologi*, 3, 21, 201-208, 2007
- [4] I.P. Nanda, B. Suharno, A. Darmawan, M.A.B. Ramadian, D. Ferdian, "Effect of Al-Fe-Si Intermetallic Phase Morphology on Fluidity of Al-7%Si Alloys", in *Proc Malaysian Metallurgical Conference*, 3 - 4 December 2008, UKM, Bangi, Malaysia, 2008
- [5] O Elsebaie, A.M Samuel, F.H Samuel, "Effects of Sr-modification, iron-based intermetallics and aging treatment on the impact toughness of 356 Al-Si-Mg alloy", *Journal of Materials Science*, 46, 3027-3045, 2011.
- [6] C.M. Dinnis, J.A. Taylor, J.A., "As-cast morphology of iron-intermetallics in Al-Si foundry alloys", *Scripta Materialia* 53, 955-958, 2005
- [7] D. Ferdian, Claudie Josse, Patrick Nguyen, Nathalie Gey, Nicolas Ratel-Ramond, Philippe de Parseval, Yannick Thebault, Benoit Malard, Jacques Lacaze, Luc Salvo "Chinese Script vs Plate-Like Precipitation of Beta-Al₉Fe₂Si₂ Phase in an Al-6.5Si-1Fe Alloy", *Metallurgical and Material Transaction A*, 46, 7, 2814-2818, 2015
- [8] N.A Belov, D.G Eskin, dan A.A Aksenov, *Multicomponent Phase Diagrams: Applications for Commercial Aluminum Alloys*, Elsevier, Oxford, 2005
- [9] D. Ferdian, B. Suharno, B. Duployer, C. Tenailleau, L. Salvo, J. Lacaze, "Differential thermal analysis assessment of beta phase precipitation in Al-6.5Si-1Fe Alloy", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Volume 65, Issue 6, pp 821-825, 2012
- [10] D. Ferdian, L. Salvo, J. Lacaze, C. Tenailleau, B. Duployer, B. Malard, "3D characterization by tomography of beta phase precipitation in a Al_{6.5}Si₁Fe alloy", in *proc ICASP 4*, Windsor UK, July 2014.
- [11] W.S. Rasband, ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2015