

PENGARUH WAKTU KONTAK TERHADAP REAKSI ANTAR MUKA PADUAN ALUMINIUM 7%-Si DAN ALUMINIUM 11%-Si DENGAN BAJA CETAKAN SKD 61

Bambang Suharno, Neni Octapiani Nurhayati, Bustanul Arifin, dan Sri Harjanto

Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia

E-mail: suharno@metal.ui.ac.id

Abstrak

Die soldering merupakan salah satu cacat proses pengecoran logam dimana cairan logam melekat pada permukaan baja cetakan. Proses ini merupakan hasil reaksi antar muka antara aluminium cair dengan permukaan cetakan. Aluminium dengan kandungan silikon 7 dan 11% serta baja cetakan SKD 61 merupakan hal yang umum digunakan sebagai cairan logam dan material cetakan pada proses pengecoran tekan (*die casting*) paduan aluminium. Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari morfologi dan karakteristik lapisan intermetalik $Al_xFe_ySi_z$ yang terbentuk selama proses reaksi antar muka pada saat pencelupan. Sampel uji yang digunakan yaitu baja perkakas jenis SKD 61 hasil *annealing*, yang dicelup pada Al-7%Si dengan temperatur tahan 680°C dan dicelup pada Al-11%Si dengan temperatur tahan 710°C pada waktu kontak yang berbeda-beda, yaitu 10 menit; 30 menit dan 50 menit. Hasil penelitian menunjukkan dua lapisan intermetalik terbentuk pada permukaan baja perkakas SKD 61 yakni *compact intermetallic layer* dengan fasa intermetalik Al_xFe_y dan *broken intermetallic layer* dengan fasa intermetalik $Al_xFe_ySi_z$. Peningkatan waktu kontak pada proses pencelupan baja perkakas SKD 61 baik pada paduan Al-7%Si maupun Al-11%Si akan meningkatkan ketebalan lapisan intermetalik yang terbentuk sampai titik optimum kemudian menurun kembali. Sedangkan nilai kekerasan mikro dalam setiap lapisan intermetalik $Al_xFe_ySi_z$ tergantung dari kadar Fe di dalamnya. Semakin meningkat kadar Fe maka kekerasan intermetalik akan semakin meningkat. Hal ini terjadi karena peningkatan kadar Fe akan berakibat pembentukan partikel fasa intermetalik $Al_xFe_ySi_z$ mejadi lebih cepat.

Abstract

Effect of Contact Time on Interface Reaction between Aluminum Silicon (7% and 11%) Alloy and Steel Dies SKD 61. Die soldering (die sticking) is a defect of metal casting in which molten metal "welds" to the metallic die mold surface during casting process. Die soldering is the result of an interface reaction between the molten aluminum and the die material. Aluminum alloy with 7 and 11% silicon and SKD 61 die steel are the most common melt and die material used in aluminum die casting. This research is done to study the morphology and the characteristics of the formed $Al_xFe_ySi_z$ intermetallic layer during interface reaction at dipping test. The samples of as-anneal SKD 61 tool steel was dipped into the molten of Al-7%Si held at temperature 680°C and into molten Al-11%Si held at temperature 710°C with the different contact time of 10 minutes; 30 minutes; and 50 minutes. The research results showed that the interface reaction can form a compact intermetallic layer with Al_xFe_y phase and a broken intermetallic layer with $Al_xFe_ySi_z$ phase on the surface of SKD 61 tool steel. The increasing of the contact time by the immersion of material SKD 61 tool steel in both of molten Al-7%Si and Al-11%Si will increase the thickness of the $Al_xFe_ySi_z$ intermetallic layer until an optimum point and then decreasing. The micro hardness of the $Al_xFe_ySi_z$ intermetallic layer depends on the content of the iron. Increasing of the iron content in intermetallic layer will increase the micro hardness of the $Al_xFe_ySi_z$. This condition happened because the increasing of Fe content will cause forming of intermetallic $Al_xFe_ySi_z$ phase becomes quicker.

Keywords: Aluminum silicon alloy, interface reaction, $Al_xFe_ySi_z$ intermetallic layer, die soldering, SKD 61 tool steel

1. Pendahuluan

Pengecoran logam (*metal casting*) sebagai suatu proses manufaktur dalam industri otomotif umumnya

digunakan dalam memproduksi komponen-komponen mesin kendaraan bermotor dengan spesifikasi yang berbeda-beda. Metode pengecoran yang banyak diaplikasikan di industri otomotif salah satunya adalah

proses cetak tekan (*die casting*). Pada prakteknya, proses *die casting* digunakan pada industri sebagai suatu proses dengan siklus yang berlangsung terus menerus. Tantangan di industri *die casting* adalah meminimalisasi waktu siklus (*cycle time*) dari operasi pengecoran dengan tujuan meningkatkan produktivitas dan menurunkan biaya operasional. Salah satu tantangan tersebut adalah terjadinya fenomena *die soldering* (pelengketan cetakan) yaitu ketika cairan aluminium menempel pada permukaan material *dies* (cetakan) dan ada bagian benda cor yang tersisa ketika dikeluarkan dari cetakannya. *Die soldering* dapat menyebabkan terjadinya kegagalan dari pemakaian cetakan yang memerlukan penggantian ataupun perbaikan cetakan. Kejadian ini dapat menyebabkan terjadinya penurunan produktivitas proses pengecoran [1]. Karena afinitas logam aluminium terhadap besi (Fe) yang tinggi, maka reaksi fisika-kimia antar muka (*interface reaction*) akan cepat terjadi pada permukaan cetakan dengan aluminium cair. Reaksi ini menghasilkan pembentukan senyawa intermetalik Fe-Al-Si yang banyak pada permukaan cetakan dan bahkan produk cor akan menempel pada lapisan intermetalik ini [2]. Untuk lebih memperjelas fenomena reaksi antar muka antara aluminium cair dengan cetakan yang terbuat dari baja khusus ini, karenanya pada penelitian ini diidentifikasi dan diteliti hubungan antara pengaruh waktu kontak antara cetakan yang terbuat dari SKD 61 *tool steel* dengan cairan *master alloy* Al-Si 7% dan Al-Si 11% terhadap pembentukan lapisan intermetalik serta dikaitkan dengan fenomena *die soldering* yang sering dijumpai pada proses pengecoran tekan paduan aluminium.

2. Metode Penelitian

Bahan material yang digunakan untuk penelitian ini adalah *master alloy* paduan aluminium Al-7%wtSi dan Al-11%wtSi dengan komposisi kimia pada Tabel 1. Pemilihan *master alloy* dengan hanya penambahan paduan silikon dimaksudkan agar dapat lebih memperjelas proses reaksi antar muka ini tanpa melibatkan unsur paduan yang lain dengan kadarnya dibuat sangat rendah. Untuk material *tool steel* yang digunakan memiliki komposisi kimia seperti terlihat pada Tabel 2.

Penelitian ini didahului dengan pemotongan sampel SKD 61 *tool steel* kondisi anil dengan menggunakan gergaji mesin. Dimensi sampel berbentuk silinder dengan diameter 30 mm dan tinggi 4 mm. Kemudian sampel dipotong kembali menjadi dua bagian dengan menggunakan gergaji tangan untuk mendapat bentuk setengah lingkaran.

Sampel ini kemudian dilakukan pengujian kekerasan awal dengan metode Vickers Hardness. Preparasi akhir yaitu pengamplasan sampel SKD 61 *tool steel* dilakukan

untuk mendapatkan permukaan sampel yang rata dan halus dengan menggunakan kertas amplas SiC dengan grid 80-1000. Setiap peningkatan grid, arah pengamplasan harus $45^{\circ} - 90^{\circ}$ dari arah sebelumnya agar goresan dapat dihilangkan dengan baik.

Sebelum ingot aluminium dilebur, dilakukan beberapa proses persiapan peleburan yaitu pemotongan ingot Al-Si dengan menggunakan mesin potong gerinda. Kemudian material ditimbang seberat ± 1.4 kg dengan menggunakan timbangan digital. Setelah itu dilakukan peng-coating-an kowi, dapur krusibel, sendok besi dan penjepit, untuk kemudian dipanaskan (*preheating*). Setelah *preheating*, dilakukan peleburan ingot dengan cara memasukkannya ke dalam kowi untuk dilebur sampai temperatur 725°C untuk Al-Si 7% dan 695°C untuk Al-Si 11%. Pengecekan temperatur menggunakan *thermocouple*. Sebelum dilakukan proses pencelupan baja SKD 61, aluminium cair ini dipindahkan ke dalam dapur *holding* dan temperatur logam cairnya dijaga konstan sebesar 710°C untuk paduan Al-Si 7%, sedangkan temperatur pemanasnya dijaga 850°C . Untuk paduan Al-Si 11%, temperatur logam cair dipertahankan 680°C dan temperatur pemanasnya 800°C .

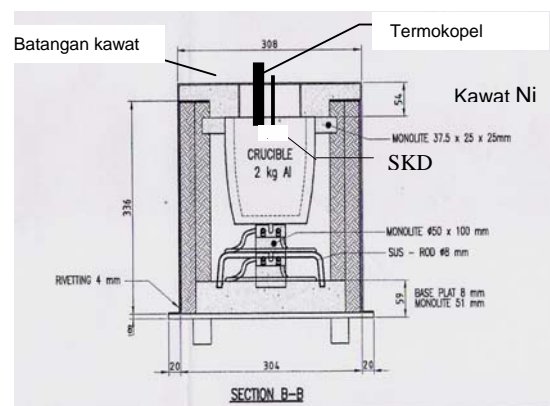
Setelah itu maka dilakukan proses pencelupan sampel SKD 61 yang telah diikat dengan kawat Ni ke dalam cairan aluminium. Pencelupan sampel dilakukan selama 10, 30, dan 50 menit. Skema proses pencelupan dapat dilihat pada Gambar 1.

Tabel 1. Komposisi kimia paduan master Al-Si (%berat)

Paduan Al-Si	Fe (%)	Cu (%)	Mg (%)	Cr (%)	Ti (%)
7 %	0.13	0.05	0.001	0.0015	0.009
11 %	0.16	0.05	0.004	0.0015	0.016

Tabel 2. Komposisi kimia SKD 61 kondisi anil

C(%)	Si(%)	Mn(%)	Cr(%)	Mo(%)	V(%)
0.37	1.00	0.5	5.00	1.25	1.00



Gambar 1. Skema proses pencelupan

Pengujian SEM dan EDS dilakukan dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) LEO 420 yang dilengkapi dengan EDS (*Energy-Dispersive Spectroscopy*). Pengujian ini bertujuan untuk melihat morfologi dan karakteristik dari lapisan intermetalik dengan mengukur ketebalannya dan mengetahui unsur-unsur kimia dari fasa lapisan. Tahap pertama yaitu pengamplasan grit 1000-1500 dengan kertas amplas SiC, kemudian dilakukan pemolesan dengan alumina cair (Al_2O_3). Setelah itu dilakukan pengetsaan sampel untuk memunculkan fasa jejak batas butir SKD 61 *tool steel* dan aluminum pada lapisan intermetalik. Proses etsa yang dilakukan merupakan etsa kimia dengan menggunakan larutan Nital 3-4% untuk SKD 61 *tool steel* selama 5 detik dan larutan HF 0.5% untuk aluminum selama 3 detik. Proses etsa ini dilakukan secara berturut-turut (*double etching*).

Dalam percobaan die soldering, dilakukan pengujian kekerasan awal baja SKD 61 dan kekerasan lapisan intermetalik hasil pencelupan. Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode indentasi (*Vickers micro hardness*). Permukaan sampel hasil SEM diampelas dengan menggunakan kertas amplas SiC grit 1000-1500, kemudian dipoles dengan alumina cair (Al_2O_3). Indentasi dilakukan sebanyak 2 titik pada tiap lapisan dengan beban 25 gf selama 15 detik.

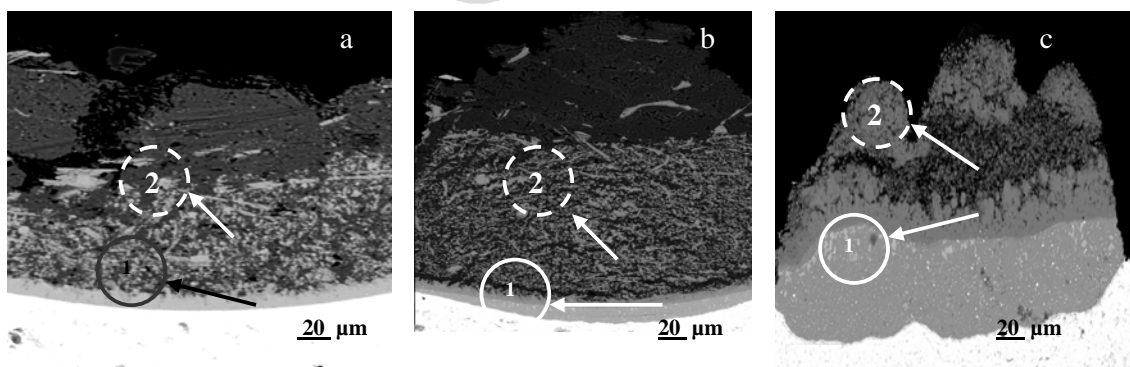
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakteristik dan morfologi lapisan intermetalik $\text{Al}_x\text{Fe}_y\text{Si}_z$

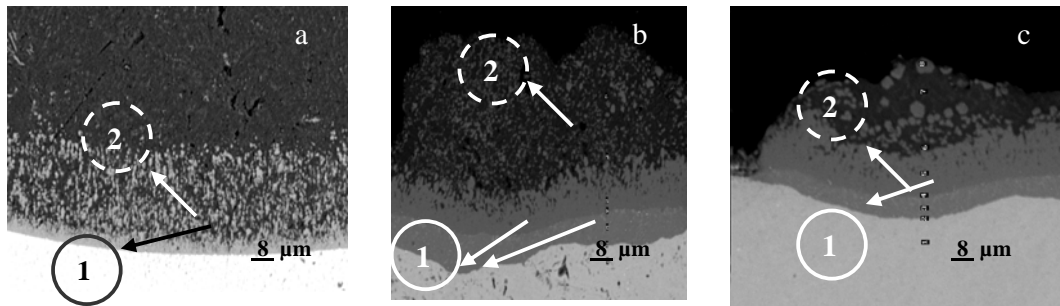
Berdasarkan pengujian SEM, Gambar 2 dan 3, terlihat bahwa lapisan intermetalik yang terbentuk pada reaksi antar muka (*interface reaction*) antara baja perkakas SKD 61 dengan cairan paduan aluminum tersebut berupa *pyramid* yang tumbuh pada fasa Al-Fe-Si. Aluminium mulai menempel setelah lapisan tipis ini terbentuk akibat terjadinya *soldering*. Lapisan

intermetalik pertama yang terbentuk pada permukaan baja perkakas SKD 61 merupakan lapisan intermetalik yang compact (padat), lapisan 1. Semakin menuju ke permukaan aluminum ke-compact-an dari lapisan intermetalik semakin menurun yakni membentuk lapisan 2 berupa *broken intermetallic layer*. Umumnya “compact intermetallic layer yang bersifat solid, sedangkan “broken intermetallic layer bersifat semi-solid^[3]. Hubungan antara morfologi pertumbuhan lapisan intermetalik dan laju reaksi dilihat sejak pertumbuhan (migrasi pada baja/lapisan intermetalik) difusi atom melewati *compact layer*. Karena koefisien difusi pada fasa semi-solid lebih besar 3-4 kali dibandingkan dengan koefisien difusi pada fasa solid, maka laju yang digunakan untuk reaksi adalah laju difusi pada keadaan solid melewati *compact layer*.

Data uji komposisi kimia mengindikasikan bahwa pada lapisan kompak 1 (*compact layer*) terbentuk fasa biner AlFe. Walaupun terdapat unsur-unsur lain pada lapisan kompak intermetalik ke-1 ini namun unsur Al dan Fe merupakan unsur yang paling dominan dan perbedaan komposisi dengan unsur lainnya cukup signifikan, sehingga unsur lainnya dapat diabaikan. Aluminium mula-mula bereaksi dengan permukaan butir yang besar, dan pada permukaan lubang lebih banyak mengandung fasa biner Fe-Al sehingga terbentuk seperti FeAl, FeAl₂, Fe₂Al₅, dan FeAl₃^[4]. Pembentukan lapisan senyawa biner ini disebabkan oleh reaksi dari setiap fasa intermetalik dengan aluminium cair yang baru secara kontinu dan difusi unsur Fe keluar dari permukaan baja^[5]. Sedangkan pada *broken intermetallic layer*, lapisan 2, terbentuk fasa terner $\text{Al}_x\text{Fe}_y\text{Si}_z$. Fasa terner ini merupakan fasa kedua yang terbentuk atau fasa yang terbentuk setelah terbentuknya fasa biner AlFe. Fasa AlFe akan bereaksi dengan Al dan Si pada cairan logam sehingga membentuk fasa ternary $\alpha\text{-(Al, Fe, Si)}$ ^[4]. Hal ini dapat terjadi karena adanya pertumbuhan radial dari fasa intermetalik keluar dari lubang pada permukaan baja.



Gambar 2. Hasil Pengujian SEM ketebalan *compact intermetallic layer* (1) dan *broken intermetallic layer* (2) antara baja SKD 61 dengan paduan Al-7%Si (a) 10 menit, (b) 30 menit, (c) 50 menit



Gambar 3. Hasil Pengujian SEM ketebalan *compact intermetallic layer* (1) dan *broken intermetallic layer* (2) antara baja SKD 61 dengan paduan Al-11%Si (a) 10 menit, (b) 30 menit, (c) 50 menit

Tabel 3. Komposisi dan Ketebalan Lapisan Intermetalik antara Baja SKD 61 dengan Al-7%Si

Waktu (Menit)	Lapisan Intermetalik	Komposisi (wt %)			Tebal Total (μm)	Indikasi Senyawa
		Al	Si	Fe		
10	<i>Compact</i>	57.16	7.85	31.90	43	Al_xFe_y
	<i>Broken</i>	80.17	5.65	8.71		$\text{Al}_x\text{Fe}_y\text{Si}_z$
30	<i>Compact 1</i>	50.27	2.29	44.02	142	Al_xFe_y
	<i>Compact 2</i>	59.38	6.65	29.61		Al_xFe_y
	<i>Broken</i>	81.76	4.63	9.47		$\text{Al}_x\text{Fe}_y\text{Si}_z$
50	<i>Compact 1</i>	51.80	1.88	41.47	86,4	Al_xFe_y
	<i>Compact 2</i>	59.46	6.53	30.70		Al_xFe_y
	<i>Broken</i>	76.62	5.88	11.09		$\text{Al}_x\text{Fe}_y\text{Si}_z$

Tabel 4. Komposisi dan Ketebalan Lapisan Intermetalik antara Baja SKD 61 dengan Al-11%Si

Waktu (Menit)	Lapisan Intermetalik	Komposisi (wt %)			Tebal Total (μm)	Indikasi Senyawa
		Al	Si	Fe		
10	<i>Compact</i>	48.44	2.44	44.61	30,2	Al_xFe_y
	<i>Broken</i>	55.55	7.60	34.34		$\text{Al}_x\text{Fe}_y\text{Si}_z$
30	<i>Compact 1</i>	48.40	2.39	44.57	70,9	Al_xFe_y
	<i>Compact 2</i>	55.59	7.36	34.48		Al_xFe
	<i>Broken</i>	77.94	8.26	9.62		$\text{Al}_x\text{Fe}_y\text{Si}_z$
50	<i>Compact</i>	49.11	2.30	43.48	17,4	Al_xFe_y
	<i>Broken</i>	57.54	7.67	32.53		$\text{Al}_x\text{Fe}_y\text{Si}_z$

Tabel 3 dan 4 memperlihatkan data uji EDS pada *compact intermetallic layer* dan *broken intermetallic layer* yang terbentuk pada reaksi antar muka cairan logam 7% Si dan 11% Si dengan baja SKD 61. Lapisan intermetalik tersebut terbentuk atas unsur Al, Fe, dan Si. Pada penelitian ini permukaan baja perkakas SKD 61 tidak di-coating. Hal ini menyebabkan tidak adanya

hambatan unsur Fe dari baja perkakas SKD 61 berdifusi ke dalam cairan paduan aluminium-silikon. Terbentuknya lapisan intermetalik ini disebabkan oleh fenomena difusi yang terjadi antara baja cetakan dengan paduan aluminium cair yang diinjeksikan ke dalam rongga cetakan pada proses *die casting*. Pada fenomena difusi ini, atom Fe akan berikatan dengan atom Al

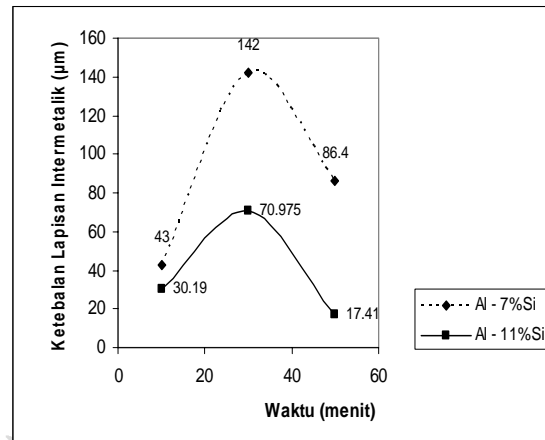
karena afinitas Fe terhadap Al lebih tinggi dari afinitas Al terhadap Al itu sendiri^[2]. Berdasarkan hukum Ficks, kontak antara logam A dan B pada temperatur tinggi, berakibat terjadinya proses difusi. Proses difusi yang terjadi, melibatkan 2 logam yang mempunyai nilai diffusifitas intrinsik yang berbeda. Kemudian pada aliran tidak stationer, konsentrasi unsur yang berdifusi pada suatu titik berubah dengan waktu. Dengan menggabungkannya koefisien interdifusi untuk substitusi, maka secara kuantitatif terjadi adanya gradasi konsentrasi substansi yang berdifusi pada sepanjang jarak difusi. Konsekuensi logis yang timbul adalah perbedaan laju difusi pada sepanjang jarak difusi^[6].

3.2. Ketebalan lapisan intermetalik $Al_xFe_ySi_z$.

Pada Gambar 4 ditunjukkan bahwa dengan semakin tinggi waktu kontak antara cetakan yang terbuat dari SKD 61 baja perkakas dengan paduan Al-7%Si dan Al-11%Si, berakibat terjadi peningkatan ketebalan lapisan intermetalik yang terbentuk sampai dengan titik optimum kemudian ketebalannya akan kembali menurun. Pada tahap awal laju pertumbuhan dari lapisan intermetalik ini disebabkan adanya reaksi fisika-kimia secara kinetik. Sedangkan laju pelarutan dari lapisan intermetalik karena kandungan Fe pada Al cair menjadi rendah. Pelarutan ini dikontrol oleh kelarutan Fe dalam cairan Al-Si. Pada kurva puncak, laju difusi sama dengan laju pelarutan. Hubungan dinamik antara difusi dan pelarutan dari atom Fe dan Al menghasilkan kehilangan berat dan volume pada substrat [2].

Ketebalan lapisan kompak (*compact layer*) yang dihasilkan akan semakin meningkat dengan meningkatnya waktu kontak antara cetakan dengan cairan paduan aluminium. Sedangkan ketebalan *broken layer*, akan meningkat secara signifikan dengan meningkatnya waktu kontak sampai titik optimum, kemudian ketebalan akan menurun kembali. *Broken layer* yang dihasilkan lebih tebal dibandingkan dengan *compact layer* karena konsentrasi (densitas) pada *compact layer* lebih tinggi dibandingkan dengan *broken layer*.

Pada Gambar 4 terlihat bahwa ketebalan lapisan intermetalik pada pencelupan baja perkakas SKD 61 ke dalam cairan paduan Al-Si 7% lebih tinggi dibandingkan dengan Al-Si 11%. Hal ini disebabkan karena difusi yang sangat aktif oleh Al dalam fasa Al-Si-Fe, mengarah kepada pembentukan lapisan intermetalik. Kehadiran Si pada system Fe-Si-Al menurunkan laju difusi dari Fe ke cairan paduan aluminium, sehingga dapat menurunkan dan menghambat laju pembentukan dari lapisan intermetalik [7]. Inokulasi Si tidak hanya mengoptimalkan



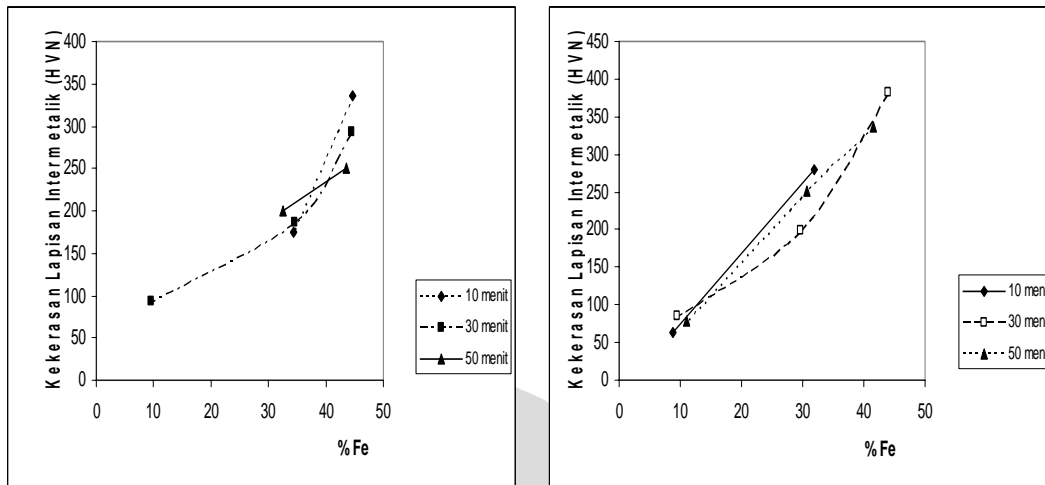
Gambar 4. Grafik perbandingan ketebalan lapisan intermetalik pada *interface* antara baja SKD 61 dengan Al - 7%Si dan Al - 11%Si dengan waktu celup 10, 30 dan 50 menit

kemampuan dari die casting tetapi juga menurunkan interaksi antara cetakan baja dengan cairan paduan aluminium.

3.3. Kekerasan lapisan intermetalik $Al_xFe_ySi_z$.

Grafik pada Gambar 5 menunjukkan kekerasan lapisan intermetalik yang didapat sangat terpengaruh oleh kandungan kadar Fe di dalamnya. Terlihat bahwa dengan meningkatnya kadar Fe dalam lapisan intermetalik yang terbentuk akan mengakibatkan peningkatan kekerasan. Menurut Shankar dan Apelian^[4], lapisan intermetalik disebabkan oleh Fe berdifusi keluar dari cetakan (*die*) ke dalam cairan Aluminium. Meningkatnya Fe dapat meningkatkan kekerasan dan menurunkan keuletan lapisan intermetalik^[8,9]. Semakin banyak kadar Fe yang berdifusi ke dalam lapisan intermetalik, maka nilai kekerasan dari lapisan intermetalik tersebut akan semakin meningkat.

Dari data tabel kekerasan (Tabel 5) diperlihatkan bahwa pada waktu celup yang sama, kekerasan pada lapisan intermetalik yang terbentuk dekat dengan permukaan baja perkakas SKD 61 lebih tinggi dibandingkan dengan yang dekat permukaan paduan aluminium-silikon, hal ini diakibatkan karena Fe yang dikandungnya lebih tinggi. Proses *die soldering* terjadi karena atom Fe dari baja perkakas SKD 61 berdifusi ke dalam cairan paduan aluminium, sehingga cairan paduan aluminium yang jaraknya lebih dekat dengan permukaan baja perkakas akan memiliki kandungan Fe yang lebih tinggi^[6,8]. Dengan demikian, densitas dari lapisan yang dekat dengan permukaan akan menjadi lebih tinggi karena semakin banyak ikatan antara Al dengan Fe.



Gambar 5. Grafik pengaruh kandungan % Fe pada lapisan intermetalik yang terbentuk terhadap kekerasan pada pencelupan baja SKD 61 ke dalam molten Al - 7%Si (a) dan Al - 11%Si (b) dengan variasi waktu celup

Tabel 5. Hasil Pengujian Kekerasan Lapisan Intermetalik Paduan Al-Si

Waktu Celup (menit)	Layer	Kekerasan mikro Vickers (HVN) Rata-Rata Paduan Al-7%Si	Kekerasan mikro Vickers (HVN) Rata-Rata Paduan Al-11%Si
10	Compact	279	336
	Broken	64	175
30	Compact 1	383	292
	Compact 2	199	186
	Broken	84	92
50	Compact 1	335	249
	Compact 2	250	
	Broken	79	200

4. Kesimpulan

Reaksi antar muka antara cairan logam paduan aluminium dengan baja cetakan SKD 61 akan menghasilkan lapisan berupa *compact intermetallic layer* dan *broken intermetallic layer*. Semakin meningkatnya waktu kontak antara baja cetakan SKD 61 dengan cairan paduan Al-7%Si dan Al-11%Si, maka akan cenderung terjadi difusi atom Fe ke dalam lapisan *intermetallic* yang lebih banyak untuk membentuk *compact intermetallic layer* (Al_xFe_y) serta *broken intermetallic layer* ($Al_xFe_ySi_z$). Semakin meningkatnya waktu kontak maka ketebalan lapisan intermetalik yang terbentuk akan meningkat sampai dengan titik optimum kemudian ketebalannya akan kembali menurun. Kehadiran Si pada system Fe-Si-Al dapat menurunkan laju difusi dari atom Al ke dalam matriks Fe dan menurunkan interaksi antara cetakan baja dengan cairan paduan aluminium. Kandungan Fe pada lapisan

intermetalik (baik *compact* maupun *broken layer*) berpengaruh terhadap nilai kekerasan mikro yang dimilikinya. Besi mengakibatkan densitas lapisan meningkat karena semakin banyak ikatan antara Al dengan Fe, dengan demikian pada lapisan yang lebih kaya akan Fe akan memiliki nilai kekerasan lebih tinggi.

Daftar Acuan

- [1] Q. Han, S. Viswanathan. Analysis of the Mechanism of Die Soldering in Aluminum Die Casting. *Metallurgical and Material Transactions Proquest Science Journals* (2003) 139-144.
- [2] J. Joshi, V. A. Srivastava and R. Shivpuri. *Intermetallic Formation and Its Relation to Interface Mass Loss and Tribology in Die Casting Dies*, Elsevier B.V. New Zealand, 2003, p.2233.
- [3] G. B. Winkelman, Z. W. Chen D. H. St. John, M. Z. Jahedi, *Morphological Features of Interfacial*

- Intermetallics and Interfacial Reaction Rate in Al-11Si-2.5Cu-(0.15/0.60)Fe Cast Alloy/Die Steel Couples*, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [4] Shankar, Sumanth and Diran Apelian. Die Soldering: Mechanism of the Interface Reaction Between Molten Aluminum Alloy and Tool Steel. *Metallurgical And Materials Transactions* Vo. 33B (2002) 465
- [5] John E Gruzleski, dan Closset, Bernard M, *The Treatment of Liquid Aluminium-Silicon Alloys*, Americans Foundrymen's Society Inc, USA, 1990.
- [6] Mohammad Zainuddin, *Studi Pengaruh Kondisi Pencelupan dan Proses Cor Terhadap Keadaan Lapisan Intermetalik dan Cacat di Dekat Daerah Cincin Penahan Piston Diesel C-223 yang Dibuat Dengan Menggunakan Metode Alfin*. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 1995.
- [7] Xiaoxia Hou, Yang Hua, Zhao Yan, Pan Fuzhen, *Effect of Si on the Interaction Between Die Casting Die and Aluminum Alloy*, Elsevier B.V. New Zealand, 2004
- [8] John A Taylor, *The Effect of Iron in Al-Si Casting Alloys*. The University of Queensland, Brisbane, Australia, 2000
- [9] X. P. Niu, B. H. Hu, S. W. Hao, *Effect of Iron on the Microstructure and Mechanical Properties of Al Die Casting Alloys*, Gintic Institute of Manufacturing Technology, 71 Nanyang Drive, Singapore, 1998.

