

Morfologi dan Karakteristik Lapisan Intermetalik Akibat *Die Soldering* pada Permukaan Baja Cetakan (*Dies*) dalam Proses Pengecoran Tekan Paduan Aluminium Silikon

Bambang Suharno, Rima Dimiyati, Bustanul Arifin, dan Sri Harjanto

Laboratorium Metalurgi Proses

Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok

Email: suharno@metal.ui.ac.id

ABSTRAK

Umumnya kerusakan cetakan pada industri *die casting* disebabkan *die soldering* yang terjadi pada permukaan cetakan yang mengalami kontak langsung dengan logam cair pada temperatur tinggi. Hal ini dapat menyebabkan perlu diadakannya perbaikan atau penggantian cetakan sehingga menurunkan produktivitas. Untuk itu dilakukan penelitian mengenai pengaruh temperatur logam cair (melt) terhadap morfologi dan karakteristik lapisan intermetalik yaitu ketebalan dan kekerasan lapisan intermetalik yang terbentuk antara permukaan cetakan dan logam cair. Pada penelitian ini digunakan baja H13 *as annealed* sebagai material cetakan yang dicelup ke dalam paduan Al-7%Si pada temperatur 680°C, 700°C, 720°C dan Al-11%Si pada temperatur 660°C, 680°C, 700°C. Peningkatan temperatur logam cair akan meningkatkan laju difusi pertumbuhan lapisan intermetalik karena laju difusi atom-atom besi dan aluminium meningkat. Sehingga ketebalan dari lapisan intermetalik akan meningkat seiring dengan peningkatan temperatur logam cair. Oleh sebab itu, tingginya temperatur logam cair mempermudah terjadinya *die soldering*.

Kata kunci: *Die casting*, *die soldering*, paduan aluminium silikon, temperatur logam cair, lapisan intermetalik.

ABSTRACT

The major mode which lead to die failure in die casting is die soldering caused by the intimate contact between alloy and die at high temperature. It leads to malfunctioning of die inserts that require replacement or repair, thus causing significant decrease in productivity. The effect of melt temperatures on morphology and characteristic of intermetallic layer such as thickness and hardness of intermetallic layer between die surface and aluminum has been studied. This experiment used as-annealed H13 tool steel as die material which dipped into Al-7%Si alloy at 680°C, 700°C, 720°C and Al-11%Si alloy at 660°C, 680°C, 700°C. High melt temperature favored the growth of intermetallic layer due to the increase of the diffusion rate of iron and aluminum atoms. Hence, high melt temperature facilitates die soldering.

Keywords: *Die casting*, *die soldering*, aluminum silicon alloy, melt temperatur, intermetallic layer.

PENDAHULUAN

Laju pertumbuhan industri otomotif di Indonesia, sebagai penghasil komponen maupun kendaraan bermotor, telah berkembang dengan cukup pesat. Metode pengecoran yang banyak diaplikasikan di industri otomotif salah satunya adalah proses pengecoran cetak (*die casting*) yang menggunakan material paduan aluminium-silikon (Al-Si). Proses ini memiliki banyak keuntungan ekonomis karena dapat memproduksi komponen dengan toleransi ukuran yang sangat kecil dan permukaan yang

halus. Meskipun keuntungan tersebut terkendala oleh mahalnya biaya material dan pembuatan cetakan (*dies*). Biasanya biaya cetakan akan mempengaruhi setidaknya 20% biaya produksi total pada industri Al *die casting* [1]. Karenanya semakin banyak komponen yang dapat diproduksi dengan menggunakan sebuah cetakan, maka biaya produksi akan semakin rendah. Umur pakai sebuah cetakan merupakan faktor penting dalam proses Al *die-casting*. Selain itu, pada industri *die casting* merupakan suatu tantangan untuk menurunkan waktu siklus proses pengecoran sehingga dapat meningkat-

kan produktivitas dan menurunkan biaya produksi [2]. Kerusakan pada cetakan dapat merupakan penghambat untuk hal ini, sebab mengakibatkan perlu diadakannya perbaikan atau penggantian cetakan sehingga menurunkan produktivitas.

Pada umumnya kerusakan cetakan disebabkan karena retak termal, *washout*, dan *die soldering* yang terjadi pada permukaan cetakan yang mengalami kontak langsung dengan logam cair.

Die soldering didefinisikan sebagai fenomena adhesi dari logam ke permukaan cetakan atau inti. Hal ini akan menyebabkan masalah pada proses *die casting* yaitu melekatnya komponen pada cetakan dan meningkatkan keausan adhesif ketika komponen dilepaskan dari cetakan. Melekatnya komponen ke permukaan cetakan biasanya terjadi pada saat proses pembekuan.

Peristiwa *die soldering* umumnya lebih sering terjadi di sekitar saluran (*gate*) yang disebabkan tingginya temperatur dan kecepatan Al cair masuk ke cetakan [3]. Temperatur logam cair dan permukaan cetakan memegang peranan penting dalam menyebabkan *die soldering*. Tingginya temperatur cetakan dan logam cair akan menurunkan kekerasan dan ketahanan aus sehingga cetakan akan mudah tererosi. Temperatur yang tinggi, baik untuk pertumbuhan fasa intermetalik karena laju difusi atom-atom besi (Fe) dan Al meningkat. Itulah sebabnya tingginya temperatur logam cair mempermudah terjadinya *die soldering* [4]. Tingginya temperatur juga akan merusak lapisan pelumas sehingga menurunkan kemampuannya untuk mencegah *die soldering*. Sebaiknya dihindari temperatur logam cair dan permukaan cetakan yang tinggi, sebab dapat menyebabkan terjadinya *soldering*. *Hot spot* juga harus dihindari pada permukaan cetakan atau dalam inti. Menurut Shankar [5] menjaga temperatur logam cair konstan pada ~ 663°C dapat meminimalisir kemungkinan terjadinya *hot spot* pada logam cair. Temperatur logam dan cetakan juga jangan terlalu rendah karena dapat menyebabkan pengisian buruk dan terjadi *cold solder* [5].

Penelitian yang dilakukan ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh temperatur logam cair (*melt*) dan kadar silikon dalam cairan logam Al terhadap pembentukan, morfologi serta karakteristik lapisan intermetalik yang terjadi selama proses *die soldering* ditinjau dari ketebalan dan kekerasan lapisan intermetalik yang terbentuk antara permukaan cetakan dan logam cair.

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini material yang digunakan adalah baja H13 *as-annealed* serta *master alloy* paduan Al 7% Si dan 11% Si. Penggunaan *master alloy* Al dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh unsur Si, tanpa melibatkan unsur paduan yang lain, terhadap pembentukan lapisan intermetalik dan kecenderungannya terhadap peristiwa *die soldering*.

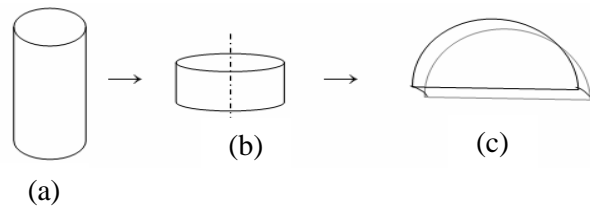
Sampel baja H13 dengan komposisi kimia pada Tabel 1, berbentuk silinder (Gambar 1a) dipotong menggunakan gergaji mesin dengan ukuran 3 x 3 x 0,5 cm (Gambar 1b) kemudian dibagi dua dengan menggunakan gergaji tangan sehingga didapat ukuran 3 x 1,5 x 0,5 cm (Gambar 1c). Kemudian dilakukan proses pengamplasan mulai dari grit 80 hingga 1000 kemudian sampel diikat menggunakan kawat nikel murni sehingga siap untuk dicelup dalam Al cair yang berada pada *holding furnace*, Gambar 2.

Tabel 1. Komposisi Kimia Baja H13 [6]

%-C	%-Si	%-Mn	%-Cr	%-Mo	%-V
0.32-0.42	0.8-1.2	0.5 max	4.5-5.5	1-1.5	0.8-1.2

Tabel 2. Komposisi Kimia Paduan Aluminium

%-Si	%-Fe	%-Cu	%-Mg	%-Cr	%-Ti	%-Sn	%-Pb	%-Ca	%-P
7	0.13	0.05	0.001	0.0015	0.009	0.008	0.01	0.001	0.0002
11.18	0.16	0.05	0.005	0.0015	0.016	0.014	0.01	0.013	0

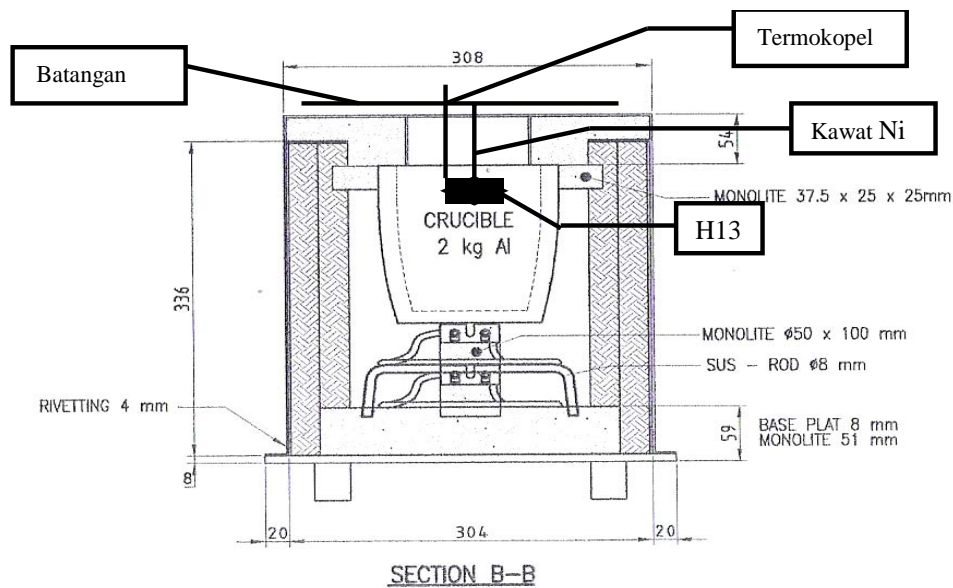


Gambar 1. Sampel Baja H13

Peleburan dilakukan menggunakan dapur krusibel berbahan bakar briket batubara yang dilakukan sebanyak dua kali, yaitu untuk *master alloy* Al-7% Si dan Al-11%Si. Sebelum digunakan untuk melebur Al, dapur krusibel dan peralatan yang akan digunakan dilakukan *thermal coating* terlebih dahulu untuk menjaga usia pakai peralatan tersebut.

Setelah temperatur Al cair melewati temperatur yang diinginkan ($\pm 5^{\circ}\text{C}$), Al cair dipindahkan ke dalam *holding furnace* sehingga temperatur Al cairnya mencapai temperatur yang diinginkan dan stabil. Kemudian sampel baja H13 dicelupkan ke dalam Al cair selama 30 menit dengan temperatur yang berbeda-beda.

Pengujian SEM dan EDS dilakukan dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) LEO 420 yang dilengkapi dengan EDS (*Energy-Dispersive Spectroscopy*). Tujuan pengujian dengan SEM ini adalah untuk mengetahui morfologi serta ketebalan lapisan intermetalik yang terbentuk. Beberapa titik lokasi diteliti dengan menggunakan uji EDS untuk mengetahui unsur yang terkandung pada lapisan. Sebelum dilakukan pengujian SEM dan EDS, terlebih dahulu dilakukan pengamplasan grit 1000-1500, kemudian dilakukan pemolesan untuk menghilangkan goresan hasil pengamplasan dan dilanjutkan dengan pengetsaan.



Gambar 2. Ilustrasi Pencelupan Sampel Baja H13 ke dalam Al Cair

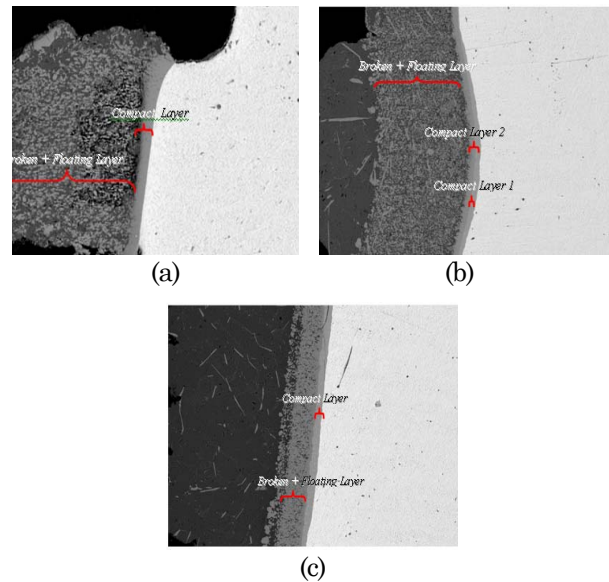
Dalam percobaan *die soldering*, dilakukan pengujian kekerasan awal baja H13 dan kekerasan lapisan intermetalik hasil pencelupan. Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode indentasi (*vickers microhardness*). Pengujian ini dilakukan sebanyak dua kali. Untuk pengujian kekerasan pertama, dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan sampel baja H13 yang dilakukan pada 3 titik yang berlainan dengan beban 500 gf selama 15 detik sebelumnya sampel baja H13 telah diampelas mulai dari grit 80 hingga 1000.

Pengujian kedua untuk mengetahui nilai kekerasan lapisan intermetalik yang terbentuk, sehingga didapatkan data untuk membandingkan antara kekerasan baja H13 dan lapisan intermetalik yang dilakukan pada 2 titik yang berlainan pada lapisan intermetalik yang ada antara Al dan baja H13 dengan beban 25 gf selama 15 detik. Sebelum dilakukan pengujian, dilakukan pengamplasan dengan grit 800 hingga 1500.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik dan Morfologi Lapisan Intermetalik

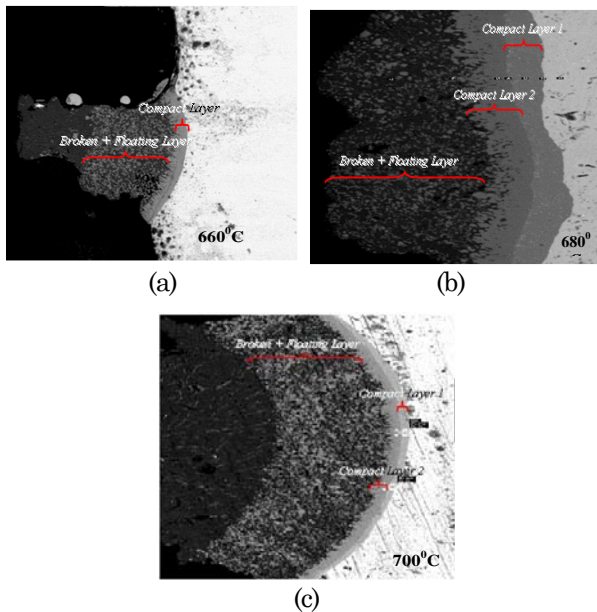
Berdasarkan hasil pengamatan SEM, Gambar 3 dan 4, pada hasil pencelupan pada Al-7%Si maupun Al-11%Si, terlihat adanya lapisan intermetalik yang terbentuk antara baja H13 dan Al. Lapisan ini terdiri atas beberapa bagian yaitu bagian yang berbentuk padat (*compact layer*) dan bagian yang tidak padat (*broken layer*). Bagian yang berbentuk padat berada dekat dengan baja H13 sedangkan bagian yang tidak padat berada lebih dekat dengan Al.



Gambar 3. Hasil SEM Pencelupan ke dalam Al-7%Si pada Temperatur a) 680, b)700, c) 720°C

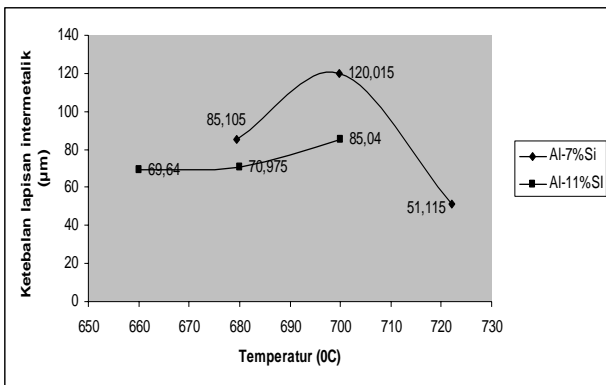
Lapisan yang berbentuk padat memiliki tebal yang lebih kecil dibandingkan dengan lapisan yang tidak padat. Hal ini berkaitan dengan pertumbuhan lapisan intermetalik bergantung pada proses difusi atom melalui lapisan padat itu sendiri. Dimana koefisien difusi atom logam melewati fasa cair 3-4 kali lebih besar dibandingkan dengan bila melewati fasa padat [7]. Dengan demikian laju difusi pada lapisan yang tidak padat lebih besar dan tentunya menghasilkan lapisan yang lebih tebal. Kebanyakan lapisan intermetalik yang terbentuk memiliki bentuk pyramid (pencelupan Al-7%Si temperatur 700°C dan Al-11%Si temperatur 660°C dan 700°C). Pertumbuhan fasa intermetalik secara radial pada permukaan cetakan menyebabkan lapisan ber-

bentuk demikian [5], sedangkan sisanya berbentuk lapisan yang lurus. Hal ini menandakan bahwa telah terjadi penggabungan antara fasa intermetalik yang letaknya saling bersebelahan.



Gambar 4. Hasil SEM Pencelupan ke dalam Al-11%Si pada Temperatur a) 660, b) 680, c) 700°C

Pengaruh Temperatur Logam Cair dan Kadar Silikon Terhadap Ketebalan Lapisan Intermetalik



Gambar 5. Pengaruh Temperatur Logam Cair dan % Silikon Terhadap Ketebalan Lapisan Intermetalik

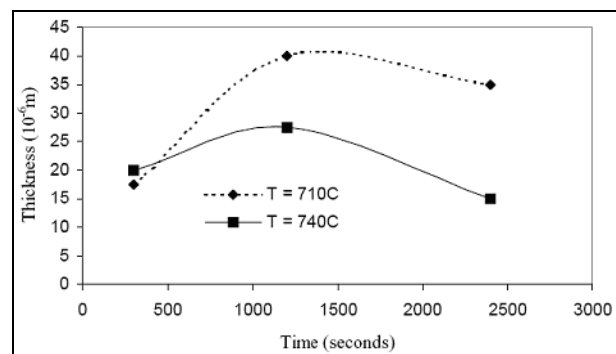
Tabel 3. Komposisi dan Ketebalan Lapisan Intermetalik Pencelupan ke dalam Al-7%Si

Temperatur (°C)	Lapisan Intermetalik	Komposisi (at%)			Tebal (µm)
		Al	Si	Fe	
680	compact layer	62,84	5,33	27,76	7,5
	broken + floating layer	70,6	8,57	8,64	77,605
700	compact layer 1	65,39	3,32	27,55	5,74
	compact layer 2	71,03	8,66	17,52	8,52
	broken + floating layer	82,68	5,09	7,06	105,755
	compact layer	65,89	3,37	28,53	12,1
720	broken + floating layer	75,33	6,12	15,45	39,015

Tabel 4. Komposisi dan Ketebalan Lapisan Intermetalik Pencelupan ke dalam Al-11%Si

Temperatur (°C)	Lapisan Intermetalik	Komposisi (at%)			Tebal (µm)
		Al	Si	Fe	
660	compact layer	68,74	8,44	18,66	9,63
	broken + floating layer	78,68	9,34	6,91	60,01
680	compact layer 1	64,41	3,03	28,42	10,82
	compact layer 2	67,97	8,64	20,37	14,075
	broken + floating layer	80,82	8,23	4,82	46,08
	compact layer 1	66,21	6,41	22,96	4,295
700	compact layer 2	69,62	9,72	17,33	10,37
	broken + floating layer	77,14	8,73	8,86	70,375

Pada pencelupan ke dalam cairan Al-7%Si (Gambar 5, Tabel 3 dan 4), ketebalan lapisan intermetalik meningkat dari temperatur 680 °C ke 700 °C yaitu dari ketebalan 85 µm menjadi 120 µm. Dengan semakin meningkatnya temperatur, laju difusi atom-atom Fe dan Al akan semakin meningkat sehingga ketebalan lapisan intermetalik juga meningkat [4]. Namun, pada temperatur 720 °C ketebalan menurun drastis menjadi 51 µm. Hal ini disebabkan karena energi difusi untuk membentuk lapisan intermetalik pada temperatur ini lebih kecil jika dibandingkan dengan energi untuk melarut. Sehingga ketebalan pada temperatur ini cenderung menurun. Hal yang serupa juga dijumpai pada penelitian Joshi [8], bahwa ketebalan lapisan intermetalik pada temperatur 710°C lebih tinggi dibandingkan pada temperatur 740°C (Gambar 6). Seiring dengan peningkatan temperatur hingga 740 °C (superheat lebih tinggi), mekanisme pelarutan lebih mendominasi sehingga ketebalan lapisan lebih rendah dan ketebalan maksimum (puncak) terjadi lebih dulu.



Gambar 6. Pertumbuhan dan Pelarutan Lapisan Intermetalik [8]

Pencelupan material H13 ke dalam cairan Al-11%Si, memperlihatkan ketebalan lapisan intermetalik meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur. Dengan semakin meningkatnya temperatur maka laju difusi atom-atom Fe dan Al akan semakin meningkat sehingga ketebalan lapisan intermetalik juga meningkat [9].

Dari Gambar 5 terlihat bahwa adanya peningkatan kadar silikon baik pada temperatur 680°C maupun 700°C akan mengurangi ketebalan lapisan intermetalik. Pada temperatur 680°C, ketebalan lapisan intermetalik turun dari 85 µm (untuk kadar Si 7%) ke 71 µm (untuk kadar Si 11%). Hal yang sama juga terjadi pada temperatur 700°C, ketebalan lapisan intermetalik turun dari 120 µm (untuk kadar Si 7%) ke 85 µm (untuk kadar Si 11%). Adanya silikon pada sistem Al-Fe-Si akan menurunkan laju difusi atom Al ke matriks Fe, sehingga mengurangi dan menghalangi pembentukan lapisan intermetalik. Dengan demikian penambahan Si mengurangi interaksi antara material cetakan (baja) dan aluminium cair [10].

Pengaruh Temperatur Terhadap Kekerasan Lapisan Intermetalik

Tabel 5. Hasil Pengujian Kekerasan Baja H13

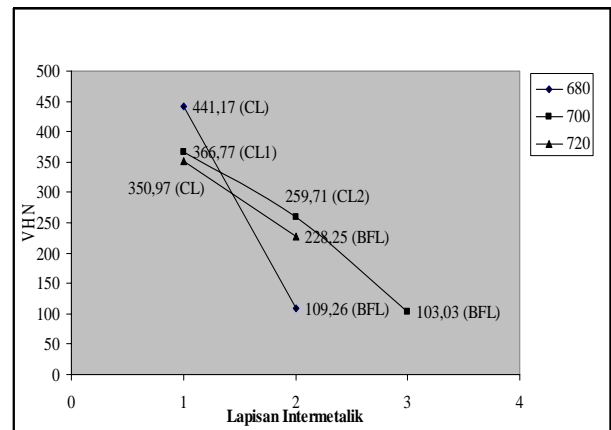
No Indentasi	Jejak (µm)			VHN (kg/mm)	VHN _{ave}
	D ₁	D ₂	d _{ave}		
1	68,5	68,5	68,5	197,56224	183,25554
2	74,5	75,5	74,5	167,02686	
3	71	70,5	70,75	185,17752	

Tabel 6. Hasil Pengujian Kekerasan Lapisan Intermetalik Pencelupan ke dalam Al-7%Si

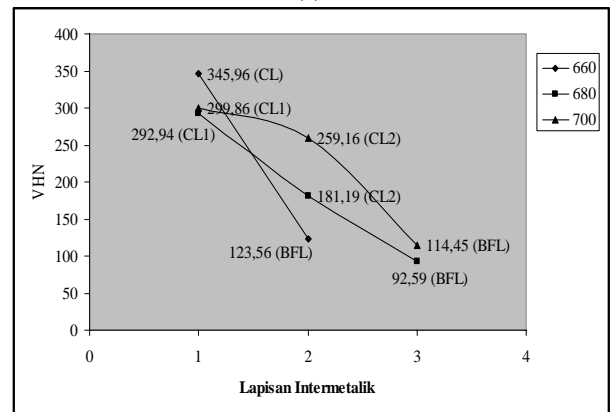
Temperatur (°C)	Lapisan	Titik	Diameter (µm)		Diameter rata-rata (µm)	VHN	VHN rata-rata
			D ₁	D ₂			
			680	Compact Layer			
	Broken + Floating Layer	1	22	18	20	115,88	
		2	23	19,5	21,25	102,64	109,26
700	Compact Layer 1	1	11	12	11,5	350,47	366,77
	Compact Layer 2	2	10	12	11	383,06	
	Broken + Floating Layer	1	12,5	13,5	13	274,26	259,71
		2	13,5	14	13,75	245,16	
		1	21,5	22,5	22	95,76	
		2	20,5	20,5	20,5	110,29	103,03
720	Compact Layer	1	11,5	11	11,25	366,22	350,97
	Broken + Floating Layer	2	11,5	12	11,75	335,72	
		1	14	14,5	14,25	228,25	228,25
		2	14,5	14	14,25	228,25	

Tabel 7. Hasil Pengujian Kekerasan Lapisan Intermetalik Pencelupan ke dalam Al-11%Si

Temperatur (°C)	Lapisan	Titik	Diameter (µm)		Diameter rata-rata (µm)	VHN	VHN rata-rata
			D ₁	D ₂			
			660	Compact Layer			
	Broken + Floating Layer	2	13,5	11	12,25	308,87	
		1	16,5	18,5	17,5	151,35	123,56
		2	23	21	22	95,76	
680	Compact Layer 1	1	12,5	11,5	12	321,88	292,94
	Compact Layer 2	2	13	13,5	13,25	264,01	
	Broken + Floating Layer	1	16,5	16	16,25	175,53	181,19
		2	16	15,5	15,75	186,85	
		1	22	22,5	22,25	93,62	
		2	22,5	22,5	22,5	91,56	92,59
700	Compact Layer 1	1	14	9,5	11,75	335,72	299,86
	Compact Layer 2	2	14,5	12	13,25	264,01	
	Broken + Floating Layer	1	13,5	13,5	13,5	254,32	259,16
		2	13,5	13	13,25	264,01	
		1	21	19,5	20,25	113,03	
		2	20,5	19,5	20	115,88	114,45



(a)

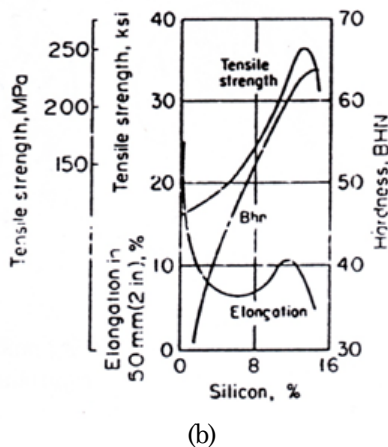
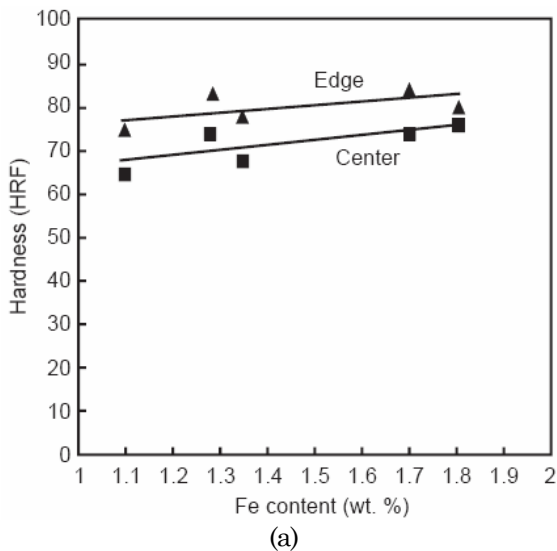


(b)

Gambar 7. Grafik Nilai Kekerasan Lapisan Intermetalik pada Pencelupan ke dalam Cairan Al-7%Si (a) dan Al-11%Si (b)

Berdasarkan Gambar 7, dapat dilihat pada lapisan intermetalik 1 kekerasan terendah dicapai oleh temperatur 720°C sebesar 350,97 VHN. Menurut penelitian Langsurd [11], dengan kekerasan sebesar itu, berarti lapisan intermetalik yang terbentuk adalah Fe₃Al. Mengacu pada tabel 3, komposisi Al pada lapisan ini merupakan komposisi paling besar (mencapai 50,08%), sedangkan untuk komposisi Fe, mencapai 44,51%, merupakan komposisi tertinggi. Karena temperatur ini memiliki komposisi Al terbesar, maka lapisan ini memiliki kekerasan terendah walaupun komposisi Fe pada temperatur ini juga paling besar tapi ternyata tidak mempengaruhi nilai kekerasan karena komposisi besi masih lebih kecil dibandingkan dengan komposisi Al.

Untuk lapisan intermetalik 2, kekerasan terendah dicapai oleh temperatur 680°C sebesar 109,26 VHN. Komposisi Al pada temperatur ini mencapai 65,03%, sedangkan untuk komposisi Fe mencapai 16,47%, merupakan komposisi terkecil jika dibandingkan dengan temperatur lain. Dengan komposisi Al yang besar (paling besar) dan komposisi besi yang kecil (paling kecil), maka kekerasan lapisan intermetalik pada temperatur ini merupakan yang terendah. Gambar 8 menjelaskan bahwa semakin tinggi komposisi Fe maka kekerasan juga akan meningkat .



Gambar 8. (a) Pengaruh Komposisi Besi Terhadap Nilai Kekerasan, (b) Pengaruh Komposisi Silikon Terhadap Kekerasan [12]

Berdasarkan Gambar 7 (b), sama halnya dengan Gambar 7 (a) secara umum nilai kekerasan tiap lapisan intermetalik menurun. Semakin jauh jarak lapisan intermetalik yang terbentuk dari cetakan, maka nilai kekerasan akan semakin menurun. Hal ini disebabkan karena komposisi Fe pada lapisan intermetalik yang terdekat dengan cetakan (lapisan intermetalik 1) merupakan komposisi terbesar dibandingkan dengan lapisan intermetalik lain. Besi yang berdifusi keluar dari cetakan langsung membentuk lapisan intermetalik dengan Al yang ada sehingga terbentuk penghalang untuk besi lebih jauh berdifusi ke luar sehingga komposisi Fe pada lapisan intermetalik yang lebih jauh lebih rendah. Selain itu, laju difusi Fe melewati fasa padat (cetakan dan lapisan intermetalik padat) lebih rendah dibanding dengan laju difusi Al melewati Al cair [7].

Pada Gambar 7 (b) juga dapat dilihat, lapisan intermetalik 1 dengan kekerasan terendah dicapai pada temperatur 680°C. Mengacu pada Tabel 4 kadar Si pada lapisan ini merupakan yang terendah (2,39%), sehingga sedikitnya kadar Si pada lapisan ini sangat mempengaruhi nilai kekerasan lapisan.

Karena meningkatnya kadar Si dapat meningkatkan nilai kekerasan paduan Al.

Sedangkan untuk lapisan intermetalik 2, nilai kekerasan terendah dicapai oleh temperatur 660°C sebesar 123,56 VHN, dimana kadar Fe paling rendah dibanding dengan temperatur lain, yaitu mencapai 13,26%. Untuk lapisan intermetalik 3, nilai kekerasan tertinggi dicapai oleh temperatur 700°C sebesar 114,45 VHN, dimana kadar Fe pada temperatur ini mencapai 16,52% jauh lebih tinggi dibanding temperatur 680°C yang hanya 9,62%. Perbedaan komposisi ini dipengaruhi oleh laju difusi Fe dimana pada temperatur yang lebih tinggi laju difusi lebih tinggi.

KESIMPULAN

Dari hasil dan pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Lapisan intermetalik yang terbentuk antara baja H13 dan Al terdiri atas dua bagian yaitu bagian yang berbentuk padat, berada lebih dekat dengan baja H13 dan bagian yang tidak padat, berada lebih dekat dengan Al dimana ketebalan *compact layer* lebih kecil dibandingkan dengan *broken floating layer*.
2. Pada paduan Al-7%Si ketebalan lapisan intermetalik meningkat hingga mencapai ketebalan optimum seiring dengan meningkatnya temperatur logam cair. Setelah melewati ketebalan optimum pada temperatur 700°C, ketebalan lapisan akan menurun karena energi pelarutan pada temperatur ini lebih besar daripada energi pembentukan lapisan intermetalik. Pada paduan Al-11%Si ketebalan lapisan intermetalik meningkat seiring dengan peningkatan temperatur.
3. Adanya peningkatan kadar Si pada paduan Al mengakibatkan ketebalan lapisan intermetalik berkurang.

Semakin jauh jarak lapisan intermetalik dari baja H13, nilai kekerasan semakin turun. Untuk lapisan intermetalik 1 (lapisan terdekat dengan baja H13), nilai kekerasan cenderung turun seiring dengan peningkatan temperatur. Untuk lapisan intermetalik 2 dan 3 (lapisan yang dekat dengan Al), nilai kekerasan meningkat seiring dengan peningkatan temperatur.

DAFTAR PUSTAKA

1. Zhu, Yulong., et al., Evaluation of soldering, washout and thermal fatigue resistance of advanced metal materials for aluminum die-casting dies, *Materials Science and Engineering A*, 379, 2004.
2. Makhlof M. Makhlof, Apelian Diran, *Casting Characteristics of Aluminum Die Casting Alloys*, Institute Politechnik of Worcester-Massachusetts, 2002.

3. Holz, E. K, *Trouble-Shooting Aluminum Die Casting Quality Problems*, Transactions of 7th. SDCE International Die Casting Congress, 1972, Paper No. 4372.
4. Chu, Y.L., P.S. Cheng, dan R. Shivpuri, *Soldering Phenomenon in Aluminum Die Casting: Possible Causes and Cures*, Transactions Rosemon Illinox: North American Die Casting Association, 1993.
5. Sumanth Shankar, Apelian Diran, *Mechanism of the Interface Reaction between Molten Aluminum Alloy and Tool Steel*, Metallurgical & Materials Transactions, 2002.
6. Winkelman, G.B *et al.*, Morphological Features of Interfacial Intermetallics and Interfacial Reaction Rate in Al-11,2Si-2,5Cu-(0,15-0,6) Fe Cast Alloy/Die Steel Couples, *Journal of Material Science*, 2004.
7. Joshi, V., A. Srivastava, R. Shivpuri, Intermetallic Formation and Its Relation to Interface Mass Loss and Tribologi in Die Casting Dies, *Science Direct*, 2004.
8. Wagner, C., *Thermodynamics of Alloys* (Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, MA.)
9. Xiaoxia, H, *et al.*, *Effect of Si on The Interaction between Die Casting and Aluminium Alloy*, Material Letters, 2004.
10. Langsurd Y., Silicon in Comercial Aluminum Alloys-What Becomes of It During DC-Casting, *Key Engineering Materials*, Vol 44 & 45, 1990.
11. Niu, X.P. B.H. Hu, S.W. Hao, Effect of iron on the microstructure and mechanical properties of Al de casting alloys, *Journal Materials Science Letters* 17, 1998.
12. Hatch, John E. *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*. Ohio: ASM Metals Park, 1995.