

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Komposisi Kimia Paduan Aluminium AC4B dengan Penambahan 0.019 wt. % Ti

Hasil pengujian komposisi paduan AC4B sebelum dan sesudah (saat mulai pengamatan proses *fading*) penambahan 0.018 wt. % Ti dapat dilihat pada Tabel 4.1. Dari Tabel 4.1 tersebut terlihat bahwa sebelum penambahan *grain refiner*, kandungan komposisi Ti adalah sebesar 0.029 wt. %. Setelah penambahan *grain refiner*, kadar Ti bertambah menjadi 0.048 wt. %. Terjadi peningkatan kadar Ti sebesar 0.019 wt. %. Peningkatan kadar Ti tersebut merupakan penambahan wt. % Ti yang telah dilakukan. Dapat dinyatakan penambahan 0.018 wt. % Ti yang dilakukan sesuai perhitungan *material balance* memiliki nilai yang sedikit lebih rendah dari penambahan kadar Ti hasil pengujian komposisi, namun tidak terlalu signifikan. Hal ini dimungkinkan karena kesalahan dalam memperkirakan massa aluminium dalam *holding furnace* dan kurang akuratnya perhitungan kesetimbangan material (*material balance*) yang dilakukan.

Tabel 4.1 Hasil pengujian komposisi paduan aluminium AC4B sebelum dan sesudah penambahan 0.019 wt. % Ti dibandingkan dengan standar JIS H 5202 dan standar AC4B di PT.X, dalam wt. %

Unsur	Komposisi hasil penambahan 0 wt. % Ti	Komposisi hasil penambahan 0.019 wt. % Ti	Komposisi standar JIS H 5202	Komposisi standar AC4B PT.X
Si	9,412	8.879	7.0 – 10.0	7.0 – 10.0
Cu	2,837	2.663	2.0 – 4.0	2.0 – 4.0
Mg	0,222	0.138	0.5 max	0.5 max
Zn	0,712	0.562	1.0 max	1.0 max
Fe	0,658	0.949	1.0 max	1.0 max
Mn	0,242	0.282	0.5 max	0.5 max
Ni	0,049	0.071	0.3 max	0.35 max
Ti	0,029	0.048	0.2 max	0.2 max
Pb	0,124	0.074	-	0.2 max
Sn	0,043	0.023	-	0.1 max
Cr	0,021	0.025	-	0.2 max
Al	Sisa	Sisa	Sisa	Sisa

Dengan demikian, jumlah penambahan titanium yang akan di bahas untuk selanjutnya mengacu pada 0.019 wt.% Ti. Hasil pengujian komposisi ini juga menunjukkan bahwa unsur seperti Si, Cu dan Fe sudah sesuai dengan rentang komposisi standar, hal ini penting karena unsur-unsur tersebut merupakan paduan yang berpengaruh secara signifikan pada paduan AC4B.

Unsur Silikon (Si) sebagai unsur pemuat utama di dalam paduan AC4B ini memiliki kadar dalam *range* yang ditentukan yaitu sebesar 8,879 wt.%. Kehadiran silikon penting dalam memberikan memperbaiki karakteristik coran yang secara dinamis akan meningkatkan sifat fluiditas, ketahanan *hot tear* dan karakteristik tuangannya^[7].

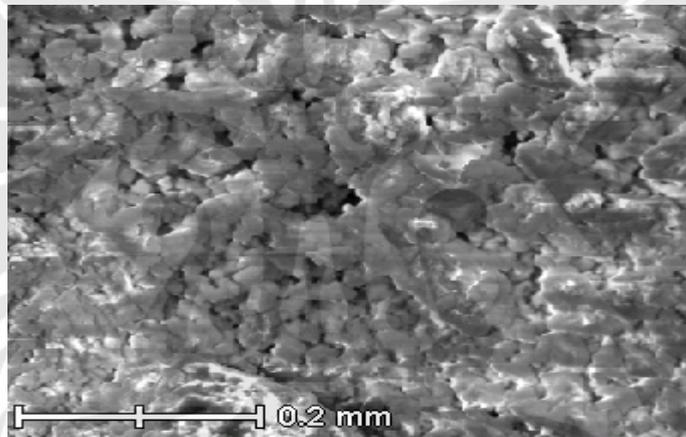
Kadar tembaga (Cu) yang tercatat dalam uji komposisi memenuhi batas kadar Cu yang diperbolehkan yaitu sebesar 2.663 wt.% dari rentang 2.0-4.0 wt.% yang diperbolehkan. Keberadaan unsur tembaga pada paduan aluminium silikon, berfungsi untuk meningkatkan kekuatan tanpa harus kehilangan sifat mampu coranya^[10].

Sementara komposisi besi (Fe) menunjukkan jumlah yang cukup tinggi walaupun masih berada dibawah rentang standar yaitu sebesar 0.949 wt.% dari batas maksimal 1.0 wt.%. Kandungan Fe yang cukup tinggi ini mungkin disebabkan masuknya Fe dari peralatan yang digunakan saat proses pengecoran seperti tangkai ladle penciduk dan pengaduk yang terbuat dari baja. Peningkatan kadar Fe pada paduan akan menurunkan sifat pengumpanan dan keuletannya. Besi akan bereaksi membentuk fasa tidak terlarut berupa $FeAl_3$, $FeMnAl_6$, dan $AlFeSi$ ^[10]. Fasa-fasa tak larut ini berpengaruh pada peningkatan kekuatan, terutama pada kondisi kenaikan temperatur. Unsur yang secara alami sebagai pengotor pada aluminium ini dalam jumlah kecil juga akan mengurangi kecenderungan retak panas (*hot-cracking*) dalam pengecoran. Akan tetapi adanya kadar besi pada paduan yang berlebihan secara substansial akan menurunkan sifat keuletan dan ketahanan korosi paduan aluminium silikon dan mengakibatkan struktur butir yang kasar^[10].

Dapat disimpulkan bahwa unsur-unsur paduan AC4B yang digunakan dalam penelitian ini memiliki komposisi yang sesuai dengan rentang komposisi standar. Kehadiran unsur-unsur lain yang tidak tertera di standar JIS H 5205

seperti Pb, Sn, dan Cr, masih dalam jumlah kecil dan dalam rentang komposisi standar dari PT.X.

Untuk mengkonfirmasi kandungan titanium dalam *grain refiner*, maka dilakukan analisa struktur yang dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Tabel 4.2. Dari Gambar 4.1 dapat dilihat struktur mikro dari *grain refiner* yang ditambahkan menunjukkan struktur yang mirip dengan struktur garam. Hal ini diperkuat oleh analisa SEM X ray *-mapping* pada Tabel 4.2 yang menunjukkan bahwa terdapat kandungan unsur penyusun garam, yaitu K, Na, F, dan Cl. Kandungan dari boron tidak terdeteksi, hal ini menunjukkan tidak adanya kandungan unsur boron pada *grain refiner* titanium.



Gambar 4.1 Mikrostruktur dari penghalus butir dengan perbesaran 800 x.

Tabel 4.2. Komposisi kimia *grain refiner* berdasarkan analisa SEM X – Ray mapping

Unsur	Komposisi Kimia (wt. %)
F	34,15
Na	0,55
Cl	1,34
K	32,84
Ti	14,95

Berdasarkan analisa dari SEM X – Ray mapping ternyata kandungan titanium dalam *grain refiner* yang ditambahkan tidak sesuai dengan asumsi awal pada perhitungan *material balance* yaitu sebesar 30 wt.%. Kandungan titanium

aktual pada *grain refiner* sebesar 14.95 wt. %. Dibandingkan dengan asumsi pada *material balance*, terdapat perbedaan kandungan sebesar 15.05 wt. %. Kandungan titanium yang dideteksi pada SEM *X-ray mapping* ini tidak dapat merepresentasikan kandungan dari keseluruhan *grain refiner*. Hal ini disebabkan *grain refiner* berbentuk serbuk sehingga kemungkinan kandungan titanium tidak tersebar secara merata pada serbuk *grain refiner*.

Selanjutnya juga dilakukan pengujian komposisi kimia di saat akhir pengamatan proses *fading* untuk membandingkan komposisi kimia paduan AC4B yang digunakan saat awal penambahan 0.019 wt.% Ti (mulai pengamatan proses *fading*, menit ke-0) dan akhir dari pengamatan proses *fading* (menit ke-120). Perbandingan komposisi kimia tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.3

Tabel 4.3 Perbandingan komposisi paduan aluminium AC4B saat awal penambahan 0.019 wt.% Ti (mulai pengamatan proses *fading*) dan akhir dari pengamatan proses *fading* (menit ke-120), dalam wt. %.

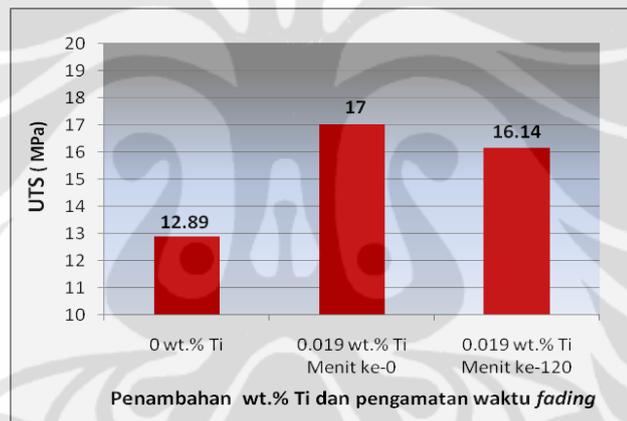
Unsur	Awal penambahan 0.019 wt.% Ti (menit ke-0)	Akhir dari pengamatan proses <i>fading</i> (menit ke-120)	Komposisi standar JIS H 5202	Komposisi standar AC4B PT.X
Si	8.879	9.540	7.0 – 10.0	7.0 – 10.0
Cu	2.663	2.670	2.0 – 4.0	2.0 – 4.0
Mg	0.138	0.141	0.5 max	0.5 max
Zn	0.562	0.264	1.0 max	1.0 max
Fe	0.949	0.966	1.0 max	1.0 max
Mn	0.282	0.290	0.5 max	0.5 max
Ni	0.071	0.045	0.3 max	0.35 max
Ti	0.048	0.044	0.2 max	0.2 max
Pb	0.074	0.056	-	0.2 max
Sn	0.023	0.010	-	0.1 max
Cr	0.025	0.019	-	0.2 max
Al	Sisa	Sisa	Sisa	Sisa

Ada beberapa komposisi unsur yang menunjukkan perbedaan yang cukup jauh seperti Si, Zn, dan Ni, namun masih menunjukkan jumlah komposisi dalam rentang standar. Secara keseluruhan, komposisi kimia paduan AC4B yang digunakan saat awal penambahan 0.019 wt.% Ti dan di akhir pengamatan proses *fading* tidak jauh berbeda. Berdasarkan Tabel 4.3 komposisi titanium di akhir pengamatan proses *fading* tidak menunjukkan perubahan jumlah yang besar dibandingkan saat awal penambahan 0.019 wt.% Ti. Proses pengambilan sampel

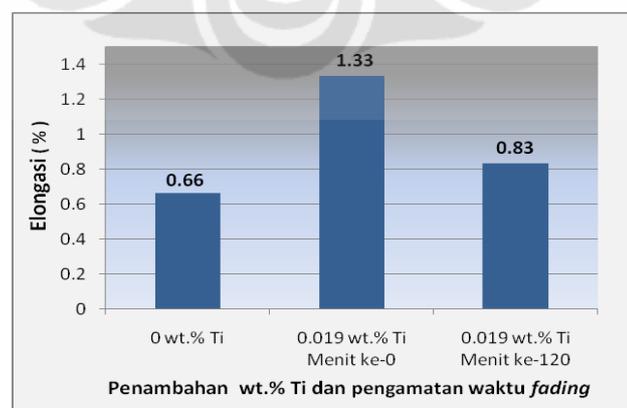
dari aluminium cair di *holding furnace* pada saat akhir pengamatan proses *fading* (setelah menit ke-120) yang disertai dengan sedikit efek pengadukan diduga menjadi faktor yang mempengaruhi kondisi tersebut diatas, dimana efek *fading* partikel *grain refiner* yang sebelumnya kemungkinan terjadi perlahan kembali merata ke seluruh cairan aluminium (dijelaskan lebih lanjut pada sub.bab berikutnya).

4.2 Pengaruh Waktu *Fading* Penambahan 0.019 wt.% Ti terhadap Sifat Mekanis Paduan Aluminium AC4B

4.2.1 Pengaruh Waktu *Fading* Penambahan 0.019 wt.% Ti terhadap Kekuatan Tarik Paduan Aluminium AC4B



Gambar 4.2 Perbandingan UTS sebelum dan sesudah penambahan 0.019 wt.% Ti, serta pengaruh waktu *fading* terhadap nilai UTS.



Gambar 4.3 Perbandingan elongasi sebelum dan sesudah penambahan 0.019 wt.% Ti, serta pengaruh waktu *fading* terhadap nilai elongasi.

Dari data pengujian tarik diperoleh nilai UTS (*Ultimate Tensile Strength*) dan nilai elongasi (data pada Lampiran 2). Pada Gambar 4.2 terlihat bahwa dengan penambahan 0.019 wt.% Ti, menghasilkan peningkatan UTS dari 12.89 MPa menjadi 17 MPa. Peningkatan yang terjadi sebesar 4.11 MPa atau 31 %. Begitu juga pada Gambar 4.3, terlihat elongasi meningkat dari 0.66 % menjadi 1.33 % (selisih peningkatan sebesar 0.67 %). Hal ini sesuai dengan literatur bahwa sifat mekanik seperti kekuatan tarik dan elongasi dapat di tingkatkan dengan penambahan *grain refiner*^[4]. Sifat mekanis meningkat karena struktur butir yang halus akibat penambahan *grain refiner*. Beberapa teori juga mengungkapkan bahwa bila terjadi penghalusan butir maka akan meningkatkan tegangan luluh dan UTS suatu paduan^[13]. Selain itu juga dijelaskan tentang hubungan besar butir dengan dislokasi dan peningkatan kekuatan material, diantaranya^[13] :

- Hall-Petch, menyatakan bahwa butir yang semakin halus akan meningkatkan tegangan luluhnya, hal ini disebabkan karena batas butir merupakan penghalang dislokasi dan tempat penumpukan dislokasi. Semakin halus butir, maka batas butir juga semakin banyak.
- Li dan Conrads, menyatakan bahwa batas butir adalah sumber dislokasi dan semakin halus butir akan menyebabkan kerapatan dislokasi semakin meningkat.

Kemudian diamati pengaruh waktu *fading* terhadap nilai UTS dan elongasi pada penambahan 0.019 wt.% Ti. Pada Gambar 4.2 terlihat bahwa nilai UTS yang meningkat setelah penambahan 0.019 wt.% Ti (menit ke-0) mengalami penurunan saat berakhir pengamatan *fading* (menit ke-120) dari 17 MPa menjadi 16.14 MPa. Penurunan yang terjadi tidak terlalu signifikan yaitu sebesar 5 %, masih lebih kecil dibandingkan peningkatan yang terjadi sebelumnya sebesar 31 %. Perilaku yang sama juga ditunjukkan oleh nilai elongasi. Pada Gambar 4.3 terlihat bahwa nilai elongasi yang mengalami peningkatan setelah penambahan 0.019 wt.% Ti (menit ke-0), kembali mengalami penurunan setelah 120 menit dari 1.33 % menjadi 0.83 % (selisih penurunan sebesar 0.5 %). Dapat disimpulkan bahwa keefektifan *grain refiner* setelah 120 menit semakin berkurang. Jika waktu

kontak *grain refiner* terlalu lama, keefektifan *grain refiner* juga semakin turun^[6]. Kontak waktu yang semakin lama, mengakibatkan ukuran butir yang halus kembali semakin meningkat. Sehingga berdampak terhadap sifat mekanis.

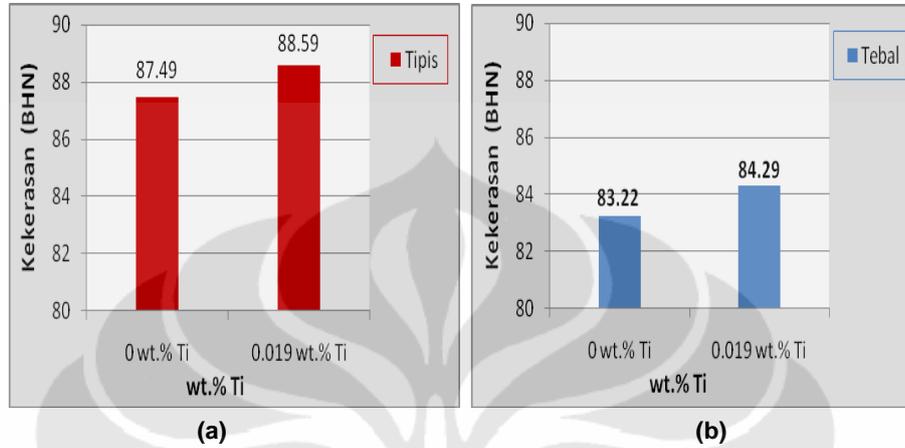
Dari Gambar 4.2 dan 4.3 juga dapat terlihat bahwa nilai masing-masing, UTS dan elongasi, setelah mengalami penurunan di menit ke-120 masih lebih besar dibandingkan sebelum penambahan *grain refiner* (0 wt.% Ti), berarti masih terdapat pengaruh dari *grain refiner* yang telah ditambahkan. Hal ini menunjukkan bahwa keefektifan *grain refiner* yang ditambahkan semakin menurun seiring dengan meningkatnya waktu. Menurunnya keefektifan ini menunjukkan terjadinya efek *fading*. Namun hasil ini belum dapat mengindikasikan waktu *fading* yang sebenarnya. Waktu *fading* minimum secara signifikan terjadi setelah 20 menit hingga 30 menit^[6]. Pada penelitian ini perlu diamati pengaruh *fading* yang terjadi di setiap 30 menit variabel waktu *fading* mulai dari penambahan *grain refiner* hingga 120 menit. Untuk itu, dilakukan pengujian kekerasan di setiap variabel waktu *fading* tersebut yang hasilnya akan dibahas lebih lanjut.

4.2.2 Pengaruh Waktu *Fading* Penambahan 0.019 wt.% Ti terhadap Kekerasan Paduan Aluminium AC4B

Penambahan 0.019 wt.% Ti dapat meningkatkan kekerasan paduan aluminium AC4B seperti terlihat pada Gambar 4.4. Sampel untuk uji kekerasan penambahan 0.019 wt.% Ti yang dibandingkan dengan sampel tanpa penambahan 0.019 wt.% Ti ini adalah sampel *cylinder head* hasil injeksi proses LPDC setelah 30 menit dari waktu mulai penambahan, yang merupakan waktu kontak efektif bereaksinya *grain refiner*^[6]. Waktu 30 menit merupakan variabel waktu *fading* ke-1 yang diterapkan pada penelitian ini. Data mentah dari pengujian kekerasan dan konversi dari *Brinell* ke *Rockwell* dapat dilihat pada Lampiran 3.

Untuk bagian yang tipis dari *cylinder head* (Gambar 4.4(a)), penambahan 0.019 wt.% Ti meningkatkan kekerasan dari 87.49 BHN menjadi 88.59 BHN. Sedangkan pada bagian yang tebal dari *cylinder head* (Gambar 4.4(b)), juga mengalami hal yang serupa dimana kekerasan meningkat dari 83.22 BHN menjadi 84.29 BHN. Dapat disimpulkan bahwa penambahan *grain refiner* dapat

meningkatkan nilai kekerasan dari paduan aluminium AC4B. Hal ini sesuai dengan literatur bahwa penambahan *grain refiner* dapat meningkatkan kekerasan yang dihasilkan dari semakin halusya butir^[4,5].

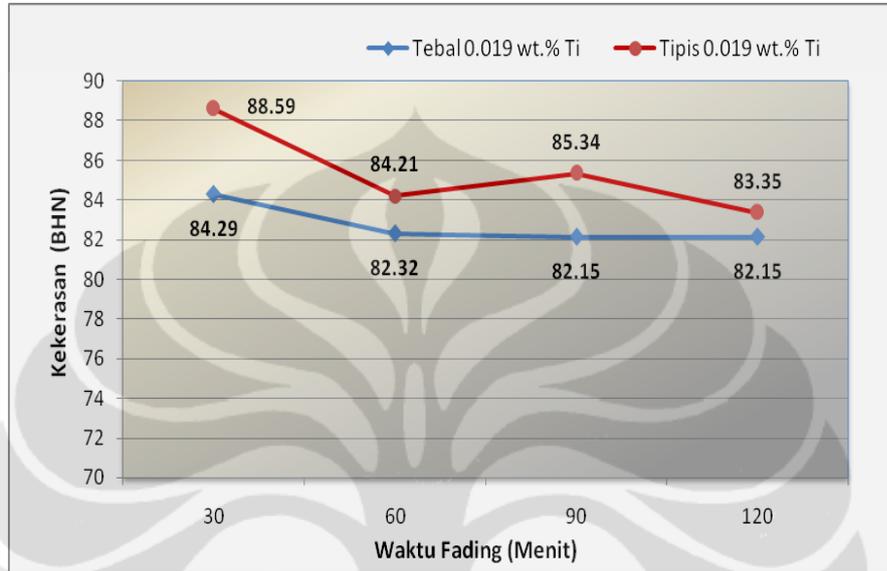


Gambar 4.4 Perbandingan nilai kekerasan sebelum dan sesudah penambahan 0.019 wt.% Ti pada bagian yang tipis (a) dan bagian yang tebal (b) dari *cylinder head*.

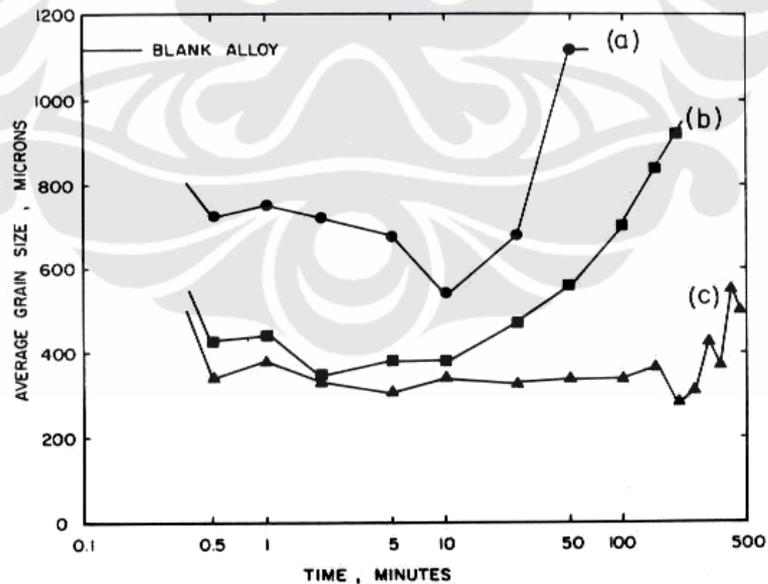
Hubungan butir yang semakin halus dengan peningkatan kekerasan juga persis seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada sub bab 4.2.1. Semakin halus butir menyebabkan kerapatan dislokasi semakin meningkat yang pada akhirnya meningkatkan nilai kekerasan dan kekuatan. Struktur butir yang halus diperoleh dari laju pembekuan yang cepat, dimana penambahan *grain refiner* dapat menghasilkan laju pembekuan yang lebih cepat. Laju pembekuan yang cepat ini juga berdampak pada semakin kecilnya DAS sehingga nilai kekuatannya semakin meningkat. Hal ini dibahas lebih lanjut pada sub.bab pembahasan struktur mikro.

Mengenai pengaruh waktu *fading* terhadap kekerasan *cylinder head* pada bagian yang tipis dan tebal setelah penambahan 0.019 wt.% Ti dapat dilihat pada Gambar 4.5. Dari Gambar 4.5, secara keseluruhan terlihat bahwa untuk masing-masing sampel bagian yang tipis dan tebal dari *cylinder head*, keduanya sama-sama mengalami kecenderungan penurunan kekerasan seiring bertambahnya waktu hingga menit ke-120 setelah penambahan 0.019 wt.% Ti. Hal ini menunjukkan keefektifan 0.019 wt.% Ti semakin menurun seiring bertambahnya waktu yang direpresentasikan dengan menurunnya kekerasan. Dapat disimpulkan bahwa terjadi efek *fading* setelah penambahan 0.019 wt.% Ti pada paduan aluminium AC4B. Dari Gambar 4.5 juga dapat dilihat bahwa efek *fading* tersebut

terjadi setelah 30 menit dimana pada waktu tersebut, masing-masing sampel tipis dan tebal mulai cenderung mengalami penurunan kekerasan hingga 120 menit. Kemungkinan terjadinya efek *fading* ini akan dibahas pada sub bab selanjutnya.



Gambar 4.5 Perbandingan pengaruh waktu *fading* terhadap kekerasan *cylinderhead* pada bagian yang tipis dan tebal setelah penambahan 0.019 wt.% Ti.



Gambar 4.6 Pengaruh *grain refiner* terhadap selang waktu dalam 99.7% Al pada penambahan (a) 0.01 % Ti (5.35 % Ti master alloy) (b) 0.01 % Ti (5.4% Ti-0.034 % B master alloy) (c) 0.01 % Ti (5.0 % Ti-0.2 % B master alloy) ^[4]

Semakin berkurangnya kemampuan *grain refiner* karena waktu kontak yang semakin lama, juga dapat dilihat pada Gambar 4.6 yang diperoleh dari literatur^[4]. Pada Gambar 4.6, untuk penambahan 5.35 wt.% Ti *master alloy* yang mengandung 0.01 wt.% Ti (grafik (a)), mengakibatkan ukuran butir semakin berkurang seiring bertambahnya waktu, hingga waktu tertentu. Kemudian pada *range* 20 hingga 30 menit ukuran butir kembali meningkat tajam, menunjukkan terjadinya *fading*. Semakin meningkatnya ukuran butir menyebabkan kekerasan semakin menurun.

Selanjutnya mengenai kekerasan bagian yang tipis dan tebal dari *cylinder head*, pada Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa bagian yang tipis memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan bagian yang tebal setelah penambahan 0.019 wt.% Ti. Jika membandingkan nilai kekerasan dari bagian yang tipis dan tebal terdapat perbedaan yang cukup signifikan dengan penambahan titanium yang sama. Perbedaan nilai kekerasan ini dikarenakan perbedaan kecepatan pembekuan pada masing-masing bagian sehingga besar butir yang dihasilkan juga berbeda. Menurut literatur, dalam proses pengecoran sifat mekanis suatu material ditentukan salah satunya oleh kecepatan pembekuan, makin cepat proses pembekuan maka butir yang terbentuk semakin kecil sehingga kekerasan material tersebut juga semakin meningkat^[7]. Karena pada bagian tebal proses pembekuannya lebih lambat maka butir yang terbentuk juga lebih besar sehingga kekerasannya lebih kecil. Sebaliknya pada bagian tipis terjadi proses pembekuan yang lebih cepat sehingga butir yang terbentuk lebih halus dan kekerasan lebih tinggi. Daerah pada dinding cetakan merupakan daerah pendinginan cepat (*chill zone*) sehingga sering diperoleh struktur yang berbutir halus yang tergantung pada gradien temperatur antara cetakan dan logam cair. Bagian yang tipis berarti memiliki daerah yang dekat dengan dinding cetakan, sehingga setelah proses pembekuan logam cair pada daerah ini, tidak jarang diperoleh butir yang lebih halus.

4.3 Pengaruh Waktu *Fading* Penambahan 0.019 wt.% Ti terhadap Struktur Mikro Paduan Aluminium AC4B

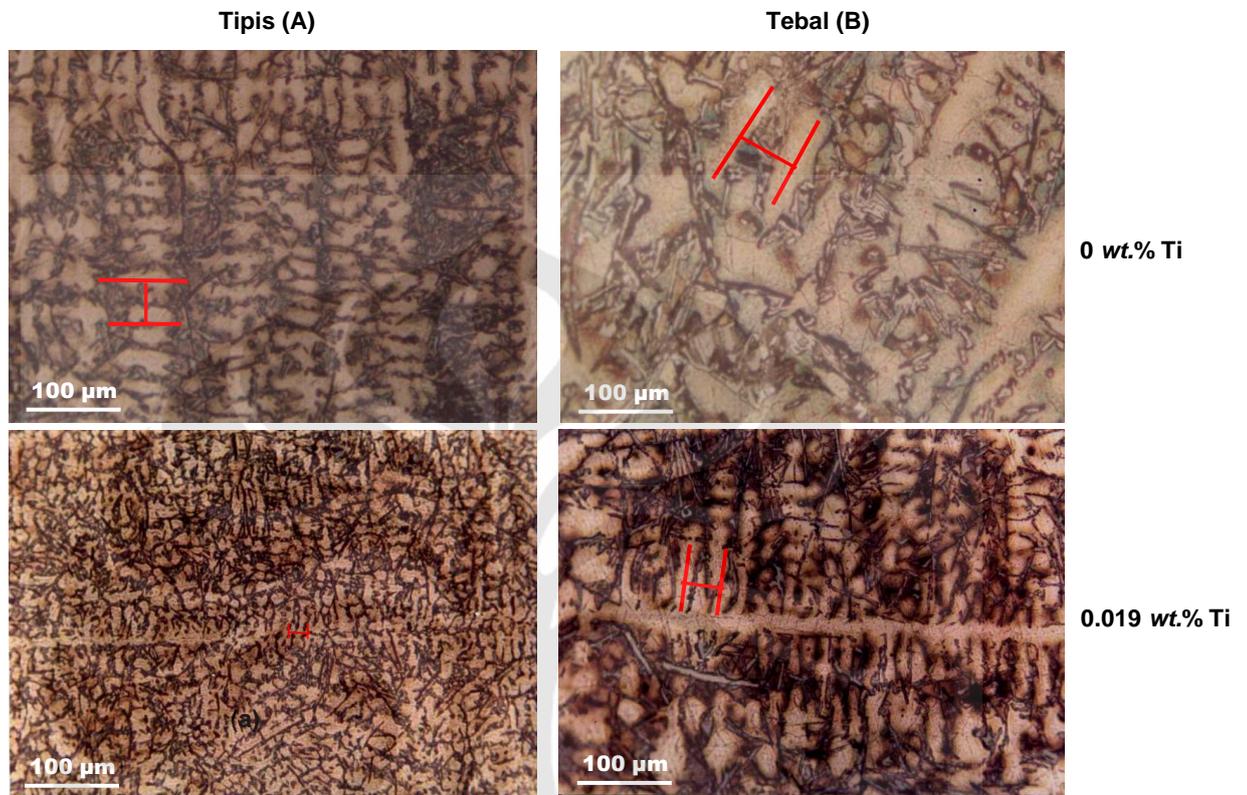
4.3.1 Pengamatan Mikroskop Optik

Pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik untuk mengamati struktur dendrit yang terbentuk karena pengaruh penambahan titanium serta kaitannya dengan sifat mekanis. Pengukuran DAS ini dilakukan dengan mengukur panjang lengan dendrit pada foto struktur mikro dengan perbesaran 200 kali sebanyak 10 kali. kemudian dilakukan penghitungan sesuai dengan skala yang digunakan untuk mencari rata-rata dari nilai DAS. Data perhitungan DAS dapat dilihat pada Lampiran 4.

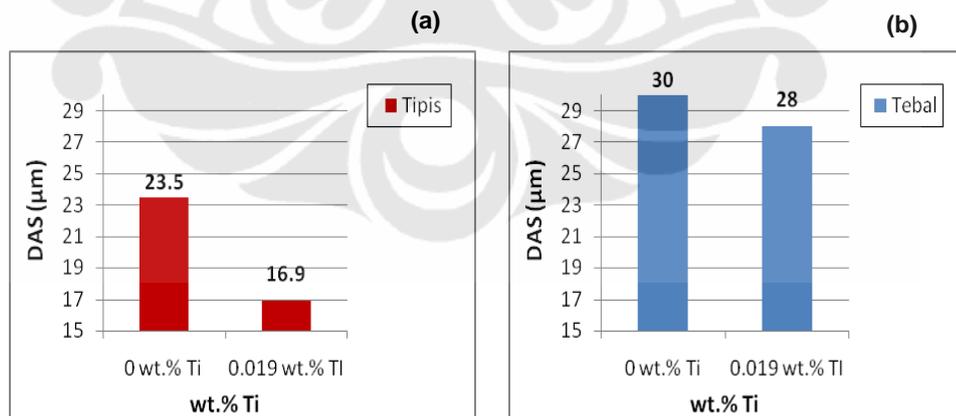
Gambar 4.7 menunjukkan perbandingan struktur mikro paduan AC4B sebelum dan sesudah penambahan 0.019 wt.% Ti pada bagian yang tipis dan tebal dari *cylinderhead*. Terlihat bahwa struktur dendrit semakin halus (berkurang) setelah penambahan 0.019 wt.% Ti untuk masing-masing sampel tipis dan tebal. Berarti penambahan *grain refiner* 0.019 wt.% Ti mengakibatkan terjadinya penurunan nilai *Dendrite Arm Spacing* (DAS). Hasil perhitungan nilai DAS sebelum dan sesudah penambahan 0.019 wt.% Ti untuk masing-masing sampel tipis dan tebal ditunjukkan oleh Gambar 4.8, dimana nilai DAS menurun dari 23.5 μm menjadi 16.9 μm untuk sampel tipis (selisih penurunan sebesar 28 %) dan dari 30 μm menjadi 28 μm untuk sampel tebal (selisih penurunan sebesar 6.66 %). Dapat disimpulkan bahwa penambahan *grain refiner* 0.019 wt.% Ti dapat meningkatkan laju pembekuan sehingga nilai DAS semakin menurun. Penurunan nilai DAS berdampak pada meningkatnya kekuatan dari paduan aluminium. Hal ini terlihat dari hasil uji kekerasan dari sampel yang sama pada Gambar 4.4(a) dan (b) pada pembahasan sebelumnya, dimana nilai kekerasan meningkat setelah penambahan 0.019 wt.% Ti.

DAS ini dipengaruhi oleh cepat lambatnya proses pembekuan pada proses pengecoran dan mempengaruhi sifat mekanis suatu paduan logam^[10]. Struktur dari fasa intermetalik pada pembekuan cepat juga menjadi lebih halus dikarenakan fraksi volume solid interdendritik makin rendah. DAS mengecil dengan laju pembekuan yang cepat, dimana penambahan *grain refiner* dapat menghasilkan

laju pembekuan yang lebih cepat. Semakin kecil DAS, maka nilai kekuatannya semakin meningkat dan elongasinya juga bertambah besar^[15].



Gambar 4.7 Perbandingan foto struktur mikro paduan AC4B bagian yang tipis (A) dan tebal (B) dari *cylinderhead* sebelum dan sesudah penambahan 0.019 wt.% Ti. Perbesaran 200 X, dengan etsa Tucker.

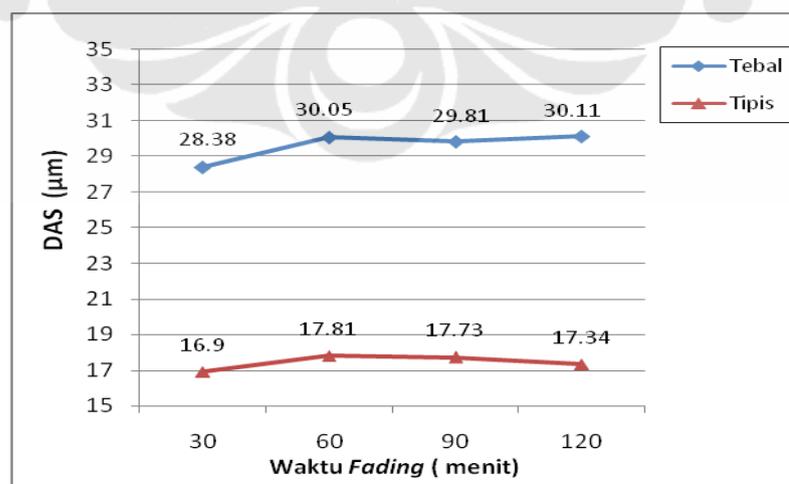


Gambar 4.8 Perbandingan nilai DAS bagian yang tipis (a) dan tebal (b) dari *cylinderhead* sebelum dan sesudah penambahan 0.019 wt.% Ti.

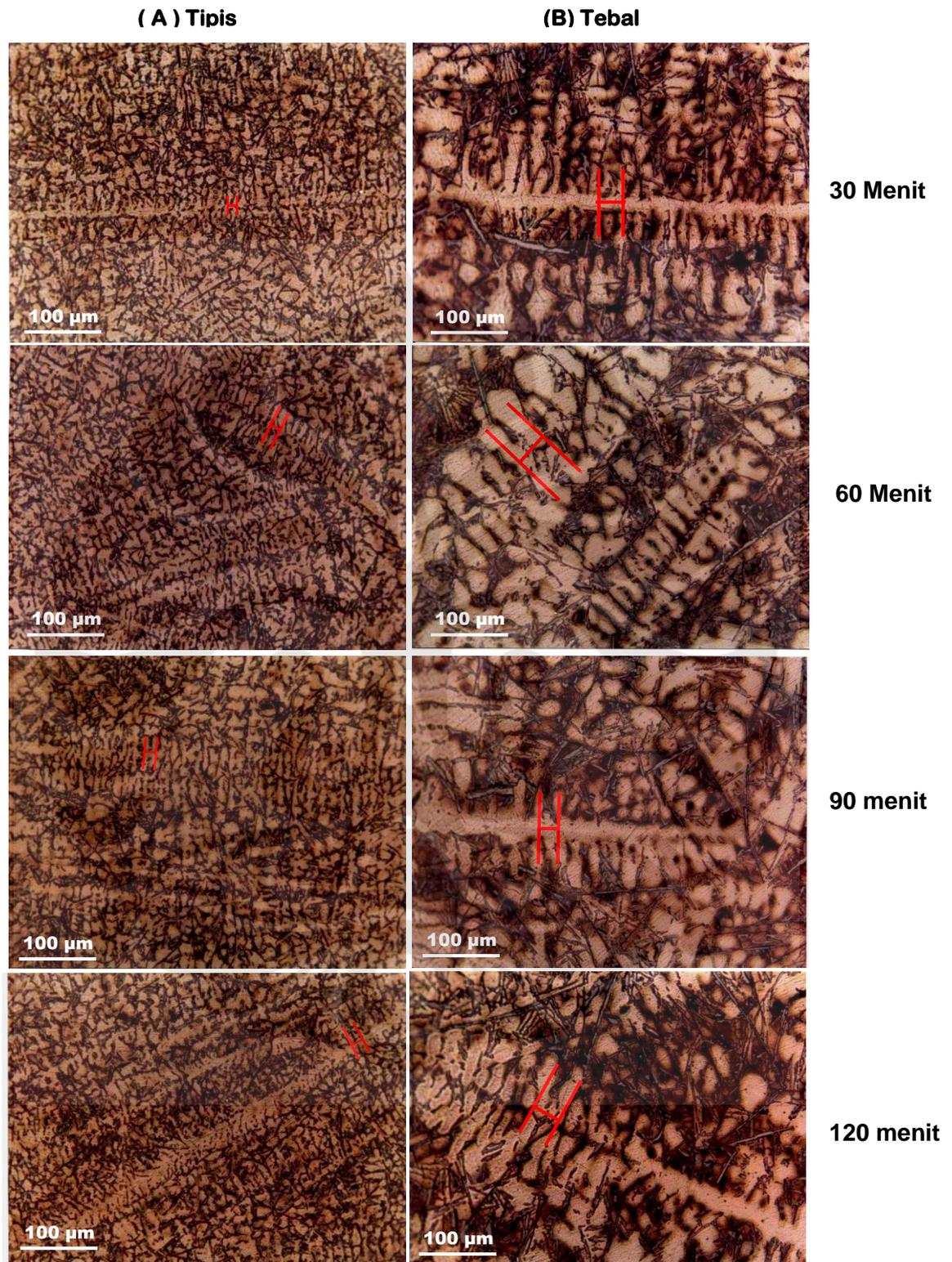
Keterangan : sampel sesudah penambahan 0.019 wt.% Ti pada pengamatan struktur mikro ini adalah sampel yang sama pada uji kekerasan sampel *cylinder head* hasil injeksi proses LPDC setelah 30 menit dari waktu mulai penambahan.

Laju pembekuan yang cepat akibat penambahan *grain refiner* dapat menghasilkan butir yang halus. Kondisi ini memiliki korelasi dengan penurunan nilai DAS, dimana nilai DAS juga menurun akibat laju pembekuan yang cepat dan pada akhirnya dapat meningkatkan sifat mekanis paduan logam. Penambahan *grain refiner* menghaluskan butir dengan cara mempercepat laju nukleasi dan menahan laju pertumbuhan kristal^[4]. *Grain refiner* (seperti Ti dan TiB) yang bereaksi dengan aluminium akan menjadi TiAl₃ dan menjadi tempat benih awal terbentuk yang kemudian akan terjadi pecahan butir dari partikel utama akibat adanya benih butir TiAl₃. Akibatnya dihasilkan butir yang lebih banyak dan lebih halus, sehingga pertumbuhan dendrit dapat ditekan^[4].

Pengaruh waktu *fading* terhadap nilai DAS pada masing-masing sampel tipis dan tebal dari *cylinder head* ditampilkan pada gambar 4.9. Terlihat bahwa terjadi kecenderungan peningkatan nilai DAS seiring dengan bertambahnya waktu hingga 120 menit baik pada bagian yang tipis maupun bagian yang tebal. Kecenderungan semakin besarnya nilai DAS terjadi setelah menit ke-30. Setelah 30 menit nilai DAS meningkat dari 28.38 μm menjadi 30.05 μm pada sampel tebal (selisih peningkatan sebesar 5.9 %) dan 16.9 μm menjadi 17.81 μm pada sampel tipis (selisih peningkatan sebesar 5.3 %). Pada grafik sampel tipis juga terlihat terjadi penurunan nilai DAS secara perlahan mulai dari menit ke-60 hingga menit ke-120. Namun selisih penurunan tidak terlalu signifikan.



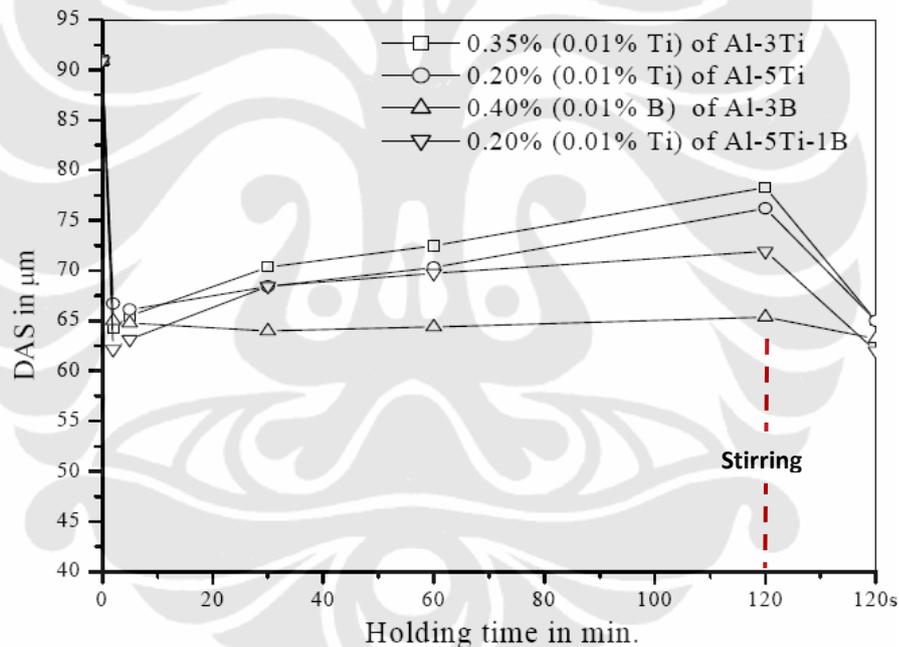
Gambar 4.9 Perbandingan pengaruh waktu *fading* terhadap kekerasan *cylinderhead* pada bagian yang tipis dan tebal setelah penambahan 0.019 wt% Ti.



Gambar 4.10 Perbandingan foto struktur mikro paduan AC4B bagian yang tipis (A) dan tebal (B) dari *cylinderhead* dengan penambahan 0.019 wt.% Ti pada masing-masing variabel waktu *fading*. Perbesaran 200x, dengan etsa Tucker.

Perbandingan struktur mikro paduan aluminium AC4B masing-masing sampel tipis dan tebal setelah penambahan 0.019 wt.% Ti dapat dilihat pada Gambar 4.10. Terlihat bahwa struktur dendrit cenderung meningkat seiring meningkatnya waktu pada masing-masing sampel. Terjadi fenomena *fading* pada kondisi ini, dimana keefektifan grain refiner (0.019 wt.% Ti) mulai berkurang sehingga mengakibatkan peningkatan nilai DAS dan pada akhirnya dapat menurunkan kekuatan (menunjukkan perilaku yang sama dengan pengaruh *fading* terhadap nilai kekerasan yang telah dibahas sebelumnya).

Mengenai kemungkinan penyebab terjadinya fenomena *fading* ini, dapat dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh Kori, Auradi, Murty, dan Chakraborty (tahun 2005)^[19]. Hasil penelitiannya dapat dilihat pada Gambar 4.11



Gambar 4.11 Hasil pengukuran DAS paduan Al-7Si dengan penambahan berbagai *grain refiner* terhadap selang waktu *holding*^[19]

Dari gambar 4.11 terlihat bahwa pada kondisi tanpa penambahan *grain refiner*, nilai DAS paduan Al-7Si adalah 90 μm (0 menit). Dengan penambahan 0.35 % (0.01 % Ti) Al-3Ti *master alloy* ke dalam paduan aluminium cair Al-7Si, nilai DAS berkurang dari 90 μm hingga 66 μm pada periode *holding* yang singkat (2 menit). Kemudian pada waktu *holding* yang lama (5-120 menit), nilai DAS semakin meningkat dari 70 μm (5 menit) hingga 78 μm (120 menit). Hal ini mengindikasikan terjadinya pengendapan partikel Al₃Ti (terjadi efek *fading*).

Setelah 120 menit, dilakukan *stirring* selama 10 detik sehingga kembali terjadi penurunan ukuran dendrit α -Al hingga 64 μm . Kondisi yang sama juga terjadi pada penambahan (0.01 % Ti) *master alloy* Al-5Ti, Al-5Ti-1B dan 0.40 % (0.01 % B) *master alloy* Al-3B. Penelitian ini dioperasikan pada dapur induksi dengan temperatur operasi 800 °C.

Hal yang senada juga diungkapkan pada penelitian lain oleh Schaffer, Zindel, dan Dahle (tahun 2004)^[20] bahwa karena perbedaan densitas partikel *grain refiner* (4.5 gr/cm³) dan aluminium cair (2,3 gr/cm³) menyebabkan mengendapnya partikel *grain refiner* menuju dasar *furnace*, sehingga menimbulkan efek *fading*, dimana mulai menurunnya potensi dari *grain refiner* seiring dengan meningkatnya waktu.

Berdasarkan hasil penelitian diatas, maka kemungkinan munculnya efek *fading* yang terjadi pada penelitian ini dapat diasumsikan karena terjadinya *settling* (pengendapan) partikel *grain refiner* pada dasar *furnace* seiring bertambahnya waktu karena perbedaan densitas partikel *grain refiner* (partikel TiAl₃) dan aluminium cair, dimana densitas AlTi₃ lebih berat dari densitas aluminium cair. Pada penelitian ini tidak dilakukan efek *stirring* sebagaimana yang dilakukan Chakraborty,dkk karena kondisi dari proses LPDC sendiri yang tidak dilengkapi dengan alat pengaduk. Mungkin hal ini dapat menjadi acuan sementara untuk penelitian lanjutan yang sama bahwa untuk menghindari efek *fading*, perlu dilakukan pengadukan (*stirring*) pada aluminium cair secara berkala agar partikel-partikel *grain refiner* yang mengendap dapat kembali merata ke seluruh aluminium cair dan dapat bertindak sebagai nukleat^[6].

Terkait dengan perbandingan komposisi kimia paduan AC4B saat awal penambahan 0.019 wt.% Ti (mulai pengamatan proses *fading*, menit ke-0) dan akhir dari pengamatan proses *fading* (menit ke-120) yang telah dijelaskan sebelumnya pada sub.bab 4.1, bahwa proses pengambilan sampel dari aluminium cair di *holding furnace* pada saat akhir pengamatan proses *fading* (setelah menit ke-120) yang disertai dengan sedikit efek pengadukan, diduga mengakibatkan partikel *grain refiner* yang sebelumnya kemungkinan mengalami *fading* perlahan kembali merata ke seluruh cairan aluminium, sehingga komposisi kimia paduan AC4B yang digunakan saat awal penambahan 0.019 wt.% Ti dan di akhir

pengamatan proses *fading* tidak jauh berbeda. Mengenai terdeteksi atau tidaknya partikel $TiAl_3$, selanjutnya dibahas pada pengamatan SEM dan EDS.

4.3.2 Pengamatan SEM dan EDAX

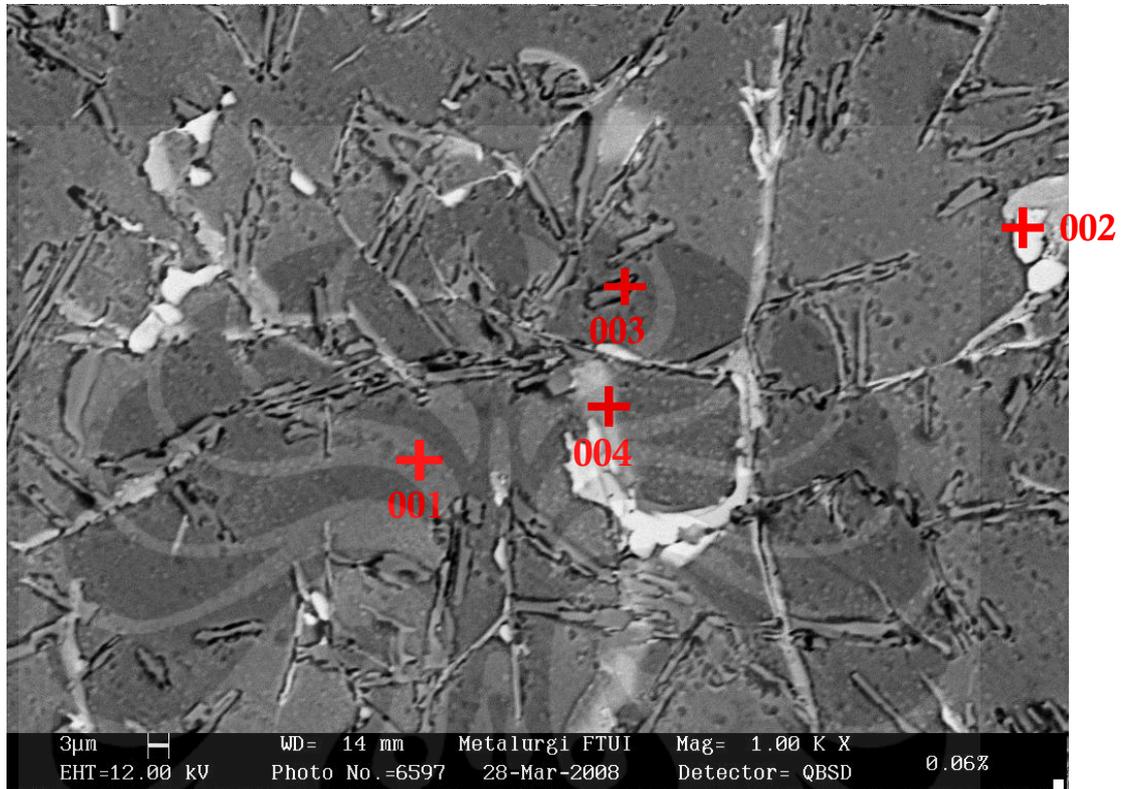
Pengamatan dengan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDAX (*Energy Dispersive X – Ray Analysis*) dilakukan pada sampel tipis dari *cylinder head* dengan penambahan *grain refiner* 0.019 wt.% Ti, untuk mengetahui fasa yang terbentuk termasuk fasa Al_3Ti beserta komposisinya setelah penambahan *grain refiner*.

Struktur mikro dari paduan aluminium dipengaruhi oleh komposisi, kecepatan pembekuan, serta perlakuan panas. Pada reaksi solidifikasi paduan Al-Si hipoeutektik terjadi urutan mekanisme pengendapan fasa, yang diawali dengan pembentukan jaringan dendritik α -aluminium, diikuti oleh reaksi eutektik Al-Si dan diakhiri dengan pengendapan fasa kedua eutektik seperti Mg_2Si dan Al_2Cu ^[9]. Sebagai tambahan dari reaksi utama diatas terjadi juga pengendapan fasa yang mengandung Mn dan Fe. Fasa yang paling sering muncul pada paduan Al-Si adalah fasa Al_3FeSi (terbentuk pada pembekuan lambat) dan $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ (terbentuk pada pembekuan cepat)^[9]. Dengan demikian komposisi Al-Si hipoeutektik (kadar Si dibawah 11.7%) memiliki struktur utama berupa fasa primer dendritik α -Aluminium, kristal silikon yang tidak larut dalam fasa α -Al dan juga fasa intermetalik berupa $Al(Fe,Mn)Si$ dan $CuAl_2$. Fasa intermetalik disini merupakan fasa kedua yang mengendap pada paduan aluminium, yang terbentuk sebagai akibat dari komposisi kimia yang melebihi batas kelarutannya.

Hasil SEM untuk penambahan 0.019 wt.% Ti ditampilkan oleh Gambar 4.12. Pada gambar tersebut, hasil pengamatan dengan SEM dapat dibedakan dari bentuk (morfologi), warna, serta komposisi kimia fasa-fasa yang ada :

- Fasa nomor 1, merupakan fasa matriks yang dominan diantara fasa yang lainnya.
- Fasa nomor 2, fasa ini berwarna putih dan berbentuk seperti balok (blocky).
- Fasa nomor 3, memiliki bentuk jarum-jarum kecil dan juga ada yang berbentuk serpihan serta berwarna abu-abu gelap dan tersebar di dalam matriks.

- Fasa nomor 4 memiliki bentuk jarum-jarum besar yang berwarna abu-abu dan fasa ini hanya berada pada sebagian matriks.



Gambar 4.12 Hasil pengamatan SEM *as-cast* aluminium AC4B dengan penambahan 0.019 wt.% Ti , perbesaran 1000x dengan etsa HF 0.5 %

Untuk mengetahui komposisi kimia dari keempat fasa yang berbeda tersebut, maka dilakukan pengujian EDAX. Hasil pengujian EDAX ini ditampilkan pada Tabel 4.4. Dilakukan perbandingan dengan literatur untuk mengetahui jenis fasa yang ada dengan memperhatikan komposisi mayoritas pembentuk fasa tersebut^[9].

Tabel 4.4 Komposisi mikro hasil analisa SEM / EDAX pada paduan AC4B dengan penambahan 0.019 wt. % Ti.

Fasa	% Berat Unsur					Indikasi Fasa
	Cu	Si	Fe	Mn	Al	
1	-	1.1	-	-	98.9	Matriks
2	58.75	1.51	-	-	39.73	Al ₂ Cu
3	-	85.83	-		14.17	Si - eutektik
4	-	7.64	13.33	3.28	75.75	β - Al(Fe,Mn)Si

Berdasarkan perbandingan literatur diketahui bahwa fasa nomor 1 merupakan fasa α -aluminium (matriks) yang merupakan fasa dominan pada aluminium AC4B, pada fasa ini terlihat pada komposisi yang dihasilkan yaitu hingga 99 %.

Fasa nomor 2 diindikasikan sebagai CuAl_2 namun berdasarkan komposisinya persen berat Cu (58.75 wt.%) ternyata lebih besar dibandingkan persen berat Al (39.73 wt %). Untuk fasa nomor 3 diindikasikan fasa ini sebagai fasa silikon eutektik, terbentuknya fasa ini disebabkan karena adanya unsur silikon yang berlebih, untuk kelarutan silikon dalam aluminium cukup rendah yaitu sekitar 1.65 wt % sehingga sisa dari silikon yang tidak larut sebagian ada yang membentuk partikel bebas yang berbentuk jarum-jarum dan serpihan silikon dan sebagian lagi bersenyawa dengan unsur-unsur pengotor membentuk fasa intermetalik. Pengaruh bentuk jarum menimbulkan kekuatan dan kekerasan yang lebih besar dari pada bentuk serpihan^[9].

Sedangkan untuk fasa nomor 4 yang berbentuk jarum-jarum besar diindikasikan sebagai fasa β -Al(Fe,Mn)Si. Terbentuknya fasa ini karena adanya unsur Fe dan Mn yang berlebih, unsur Fe dan Mn pada aluminium memiliki kelarutan yang rendah yaitu 0.052 wt % untuk Fe dan 1.82 wt % untuk Mn, sehingga Fe dan Mn tidak larut pada aluminium..Unsur yang tidak terlarut ini akan membentuk fasa intermetalik. Struktur jarum AlFeSi memberikan sifat yang merusak sifat mekanis karena sangat getas dan mengurangi ketahanan korosi. Penambahan *grain refiner* yang mengandung 0.019 wt % Ti menghasilkan fasa intermetalik yang lebih kompleks. Hal ini terlihat dengan adanya fasa intermetalik yang lebih jelas. Pada suatu penelitian^[21] dijelaskan bahwa pengaruh Ti memicu pembentukan intermetalik karena Ti tersebut menjadi inti dari intermetalik tersebut.

Secara keseluruhan dari hasil pengamatan SEM dan EDAX, diperoleh tidak terdeteksinya partikel *grain refiner* TiAl_3 yang bertindak sebagai nuklean. Dari hasil SEM, tidak terlihat adanya fasa TiAl_3 . Kandungan unsur Ti juga tidak dapat terdeteksi oleh EDAX. Seharusnya kandungan titanium terdeteksi pada EDAX dengan fasa Al_3Ti . Hal ini kemungkinan dikarenakan alat EDAX sulit untuk mendeteksi kandungan titanium pada kadar yang sedikit.

Shahrooz Nafisi^[22] menemukan partikel Al_3Ti pada penambahan 0.13 wt. % Ti dan 0.021 wt. % B dengan menggunakan SEM / EDAX. Nafisi menemukan bahwa partikel Al_3Ti tersebut kaya akan Ti, Si, Al, dan unsur B sehingga dikemukakan bahwa α -aluminium ternukleasi oleh campuran dari unsur Al, Ti, dan Si. Namun berdasarkan analisa dari sub.bab sebelumnya, dimana nilai DAS cenderung meningkat kembali sehingga berdampak pada penurunan sifat mekanis setelah 30 menit karena berkurangnya keefektifan *grain refiner*, maka efek *fading* diasumsikan terjadi pada penambahan *grain refiner* 0.019 wt.% Ti ke dalam paduan AC4B.

4.4 Analisa Tingkat Kegagalan pada Komponen *Cylinder Head* Penambahan Grain Refiner 0.019 wt.% Ti pada Proses *Low Pressure Die Casting*.

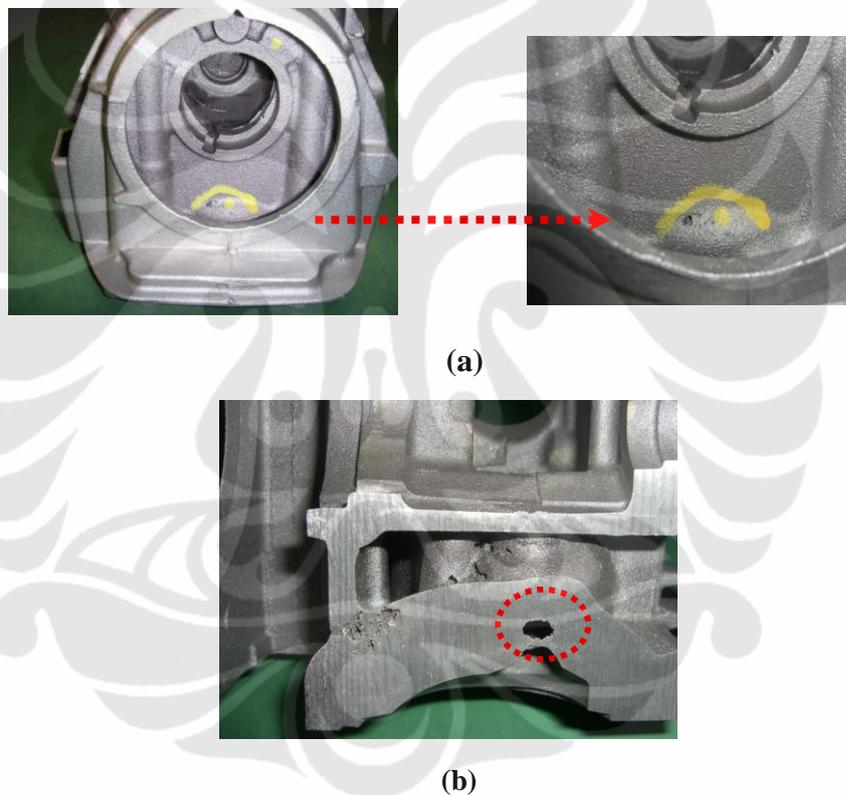
Sebagai hasil yang diperoleh pada penelitian ini, bahwa dengan penambahan *grain refiner* titanium, akan meningkatkan sifat mekanis dan menurunkan nilai DAS dari paduan AC4B, dapat menjadi salah satu alternatif dalam mengurangi kegagalan produk AC4B hasil LPDC. Namun, jika diaplikasikan pada proses LPDC di PT.X, masih belum cukup efektif mengingat pengaruh *fading* yang terjadi, dimana potensi dari *grain refiner* semakin menurun dengan semakin bertambahnya waktu, sehingga kekuatan mekanis semakin menurun. Lebih jelasnya, pada tabel 4.5 dapat dilihat hasil *check sheet* dari *cylinder head* hasil proses LPDC setelah penambahan 0.019 wt.% Ti di masing-masing variabel waktu *fading* (data *check sheet* terdapat pada Lampiran 6).

Tabel 4.5 Hasil *check sheet* dari *cylinder head* hasil proses LPDC setelah penambahan 0.019 wt.% Ti pada masing-masing variabel waktu *fading*

Waktu (menit)	Jumlah Reject dan Bocor	Temperatur <i>Molten</i> saat proses LPDC (°C)
0 – 30	1 Reject , 3 Bocor	< 700
30 – 60	1 Reject	700 - 702
60 – 90	2 Reject, 1 Bocor	702 – 705
90 – 120	1 Reject, 1 Bocor	707

Keterangan : *Reject* merupakan kegagalan dari hasil LPDC (biasanya berupa cacat *shrinkage*) yang selanjutnya dipisahkan kembali sebagai *scrap* untuk dilebur kembali. Cacat LPDC ini dapat dilihat secara visual. *Part* yang lolos dari cacat LPDC ini selanjutnya dilakukan pengujian kebocoran (untuk mengetahui ada atau tidaknya cacat yang tidak dapat dilihat secara visual pada LPDC). Cacat bocor merupakan *part* yang mengalami kegagalan pada saat uji bocor, yang selanjutnya juga dipisahkan sebagai *scrap*.

Gambar berikut menunjukkan *shrinkage* pada *cylinder head*, yang merupakan hal yang fatal karena menyebabkan kebocoran.



Gambar 4.13. Cacat *shrinkage* pada *cylinder head* (a); *shrinkage* pada bagian dalam *cylinder head* setelah dipotong (b)

Dari tabel 4.5 dapat dilihat bahwa dari 0 hingga 30 menit setelah penambahan 0.019 wt.% Ti, diperoleh 1 *part* yang *direject* berupa *shrinkage* dan 3 *part* yang tidak lolos uji bocor. Pada kondisi ini, kemungkinan *grain refiner* belum bereaksi sepenuhnya dan temperatur *molten* masih dibawah 700 °C (belum optimal). Temperatur *molten* yang diinginkan untuk aplikasi *grain refiner* Coveral GR-2815 adalah ≥ 700 °C (dapat dilihat pada Lampiran 7). Kemudian pada *range*

30-60 menit, saat temperatur *molten* juga telah optimal (≥ 700 °C), diperoleh tidak ada *part* mengalami kebocoran dan 1 *part* yang *direject*. Namun *part* yang *direject* pada *range* waktu ini adalah saat memasuki menit ke-60, lebih jelasnya dapat dilihat pada Lampiran 6. Selanjutnya pada *range* 60-90 menit, diperoleh 2 *part* yang *direject* dan 1 *part* yang mengalami kebocoran. Setelah menit ke-90 hingga menit ke-120 diperoleh 1 *part* yang masing-masing *direject* dan mengalami kebocoran saat uji bocor.

Dapat disimpulkan bahwa setelah 30 hingga 60 menit, kekuatan mekanis hasil produk LPDC mulai mengalami penurunan (walaupun tidak terlalu signifikan). Keefektifan *grain refiner* yang terjadi disekitar menit ke-30 perlahan mulai turun (kemungkinan terjadi *fading*). Hal ini yang menyebabkan tidak efektifnya penambahan *grain refiner* untuk diaplikasikan pada proses LPDC di PT.X. Efek pengadukan (*stringing*) yang direkomendasikan untuk menghilangkan kemungkinan efek *fading* tersebut tidak dapat dilakukan mengingat kondisi dari mesin LPDC sendiri yang tidak dilengkapi dengan pengaduk. Jika suatu proses LPDC memiliki spesifikasi sebagai berikut :

- Kapasitas maksimum : ± 450 kg
- Jumlah melt minimum : ± 175 kg
- Konsumsi melt per *inject* : ± 3.5 kg (2 pcs *cylinder head*)
- Waktu per-*inject* : ± 280 s

Maka dapat dilakukan perhitungan waktu pengecoran total :

$$\frac{450 \text{ kg} - 175 \text{ kg}}{3.5 \text{ kg}} \times \frac{280 \text{ s}}{60} = 366 \text{ menit} = 6.1 \text{ jam}$$

Untuk menghasilkan 157 pcs *cylinder head* (setiap *tapping*) membutuhkan waktu ± 6 jam. Dibandingkan dengan waktu *fading* dari *grain refiner* yang singkat (30 menit), maka hanya sedikit dari produk *cylinder head* yang dihasilkan memiliki karakteristik *grain refiner* yang maksimal.