

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. PENGARUH PENAMBAHAN TITANIUM TERHADAP KARAKTERISTIK PADUAN ALUMINIUM AC4B

4.1.1. Analisa Komposisi Kimia Hasil Pengecoran

Hasil pengujian komposisi paduan AC4B sebelum dan sesudah penambahan penghalus butir pada kadar 0.0505 wt. % Ti dan 0.072 wt. % Ti dapat dilihat pada Tabel 4.1. Hasil Pengujian komposisi dibandingkan dengan standar internal di PT. X. [restricted information]. Data hasil pengujian spektrometri dapat dilihat pada lampiran 1.

Tabel 4.1. Komposisi sampel uji paduan AC4B.

Unsur paduan	Komposisi AC4B tanpa penambahan Ti	Komposisi AC4B penambahan 0.036wt. % Ti	Komposisi AC4B penambahan 0.045 wt. % Ti	Komposisi AC4B berdasarkan standar PT. X
Si	9.412	9.40	9.38	7 – 10
Cu	2.837	2.80	2.88	2 – 4
Mg	0.222	0.172	0.181	0.5 maks
Zn	0.712	0.319	0.261	1 maks
Fe	0.658	0.786	0.762	1 maks
Mn	0.242	0.308	0.310	0.5 maks
Ni	0.049	0.0547	0.05058	0.35 maks
Ti	0.029	0.0795	0.101	0.2 maks
Pb	0.124	0.0834	0.0787	0.2 maks
Sn	0.043	0.028	0.031	0.1 maks
Cr	0.021	0.027	0.02	0.1 maks
Al	<i>Remains</i>	<i>Remains</i>	<i>Remains</i>	<i>Remains</i>

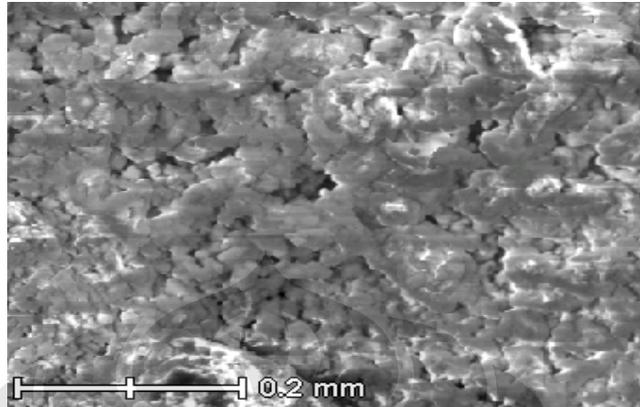
Kandungan unsur Si pada paduan AC4B tanpa penghalus butir titanium adalah 9.412 wt. % hanya sedikit berbeda dengan kandungan pada penambahan penghalus butir 0.036 wt. % Ti yaitu 9.40 wt. % dan pada penambahan 0.045 wt. % Ti yaitu 9.38 wt. %. Perbedaan ini tidak memiliki pengaruh yang signifikan pada penelitian ini karena jumlah tersebut masih masuk dalam standar yang ditentukan oleh PT. X. Secara keseluruhan, kandungan unsur dari paduan AC4B masih masuk dalam standar yang dipergunakan oleh PT. X. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa *ingot* aluminium terlebur dengan baik tanpa adanya inklusi dari luar.

Kandungan titanium pada paduan tanpa penghalus butir yaitu 0.029 wt. %, dengan penambahan penghalus butir 0.036 wt. % Ti adalah 0.0795 wt. %, dan dengan penambahan penghalus butir 0.045 wt. % Ti adalah 0.101 wt. %. Hal ini mengindikasikan bahwa ternyata penambahan titanium pada target penambahan 0.036 wt. % Ti yaitu sebesar 0.0505 wt. % Ti. Pada penambahan dengan target 0.045 wt. % Ti ternyata penambahan titaniumnya sebesar 0.072 wt. % Ti. Hal ini berarti penambahan titanium lebih besar dari perkiraan semula, yaitu 0.036 wt. % Ti dan 0.045 wt. % Ti. Hal ini kemungkinan diakibatkan oleh penambahan penghalus butir titanium yang lebih besar dari perhitungan pada *material balance*. Jumlah aluminium cair yang akan dicor baru diketahui setelah penimbangan sesaat sebelum proses *degassing* dimulai, sehingga jumlah penghalus butir yang dibutuhkan tidak bisa diperkirakan dengan akurat.

Bertambahnya kandungan titanium dalam paduan aluminium seperti ditunjukkan oleh Tabel 4.1 mengindikasikan berhasilnya proses penambahan penghalus butir titanium untuk penambahan 0.036 wt. % Ti dan 0.045 wt. % Ti. Untuk mengkonfirmasi kandungan titanium dalam penghalus butir, maka dilakukan analisa struktur yang dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan SEM yang dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Pada Gambar 4.1 dapat dilihat mikrostruktur dari penghalus butir yang 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 penghalus butir titanium.



Gambar 4.1. Mikrostruktur dari penghalus butir dengan perbesaran 800 kali.

Tabel 4.2. Komposisi kimia penghalus butir berdasarkan analisa SEM X – Ray mapping.

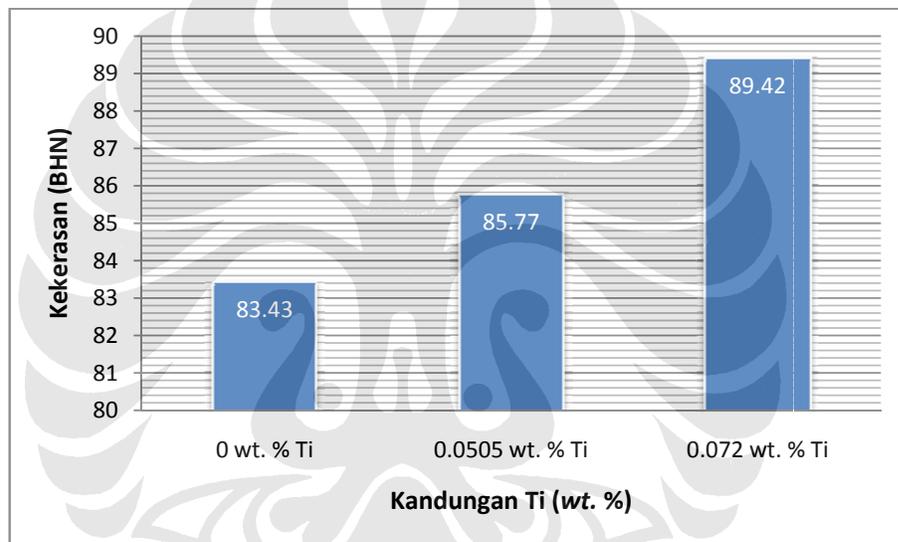
Unsur	Komposisi kimia (wt. %)
F	34,15
Na	0,55
Cl	1,34
K	32,84
Ti	14,95

Berdasarkan analisa dari SEM X – Ray mapping ternyata kandungan titanium dalam penghalus butir tidak sesuai dengan asumsi pada perhitungan material balance yaitu sebesar 30 wt. %. Kandungan titanium pada penghalus butir terdeteksi 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 penghalus butir. Hal ini disebabkan penghalus butir berbentuk serbuk sehingga kemungkinan kandungan titanium tidak tersebar secara merata pada serbuk penghalus butir. Dengan demikian, jumlah penambahan penghalus butir titanium yang akan dibahas selanjutnya akan mengacu pada

penambahan kandungan titanium pada pengujian komposisi kimia (Tabel 4.1) yaitu 0.0505 wt. % Ti dan 0.072 wt. % Ti.

4.1.2. Pengaruh Titanium Terhadap Kekerasan Makro Paduan AC4B

Nilai kekerasan dari sampel tanpa dan dengan penambahan titanium dapat dilihat pada Gambar 4.2. Data mentah dari pengujian kekerasan dapat dilihat pada Lampiran 2. Sampel yang diujikan adalah sampel tebal dan sampel tipis dan kemudian dibandingkan penambahan kekerasannya untuk setiap penambahan titanium.

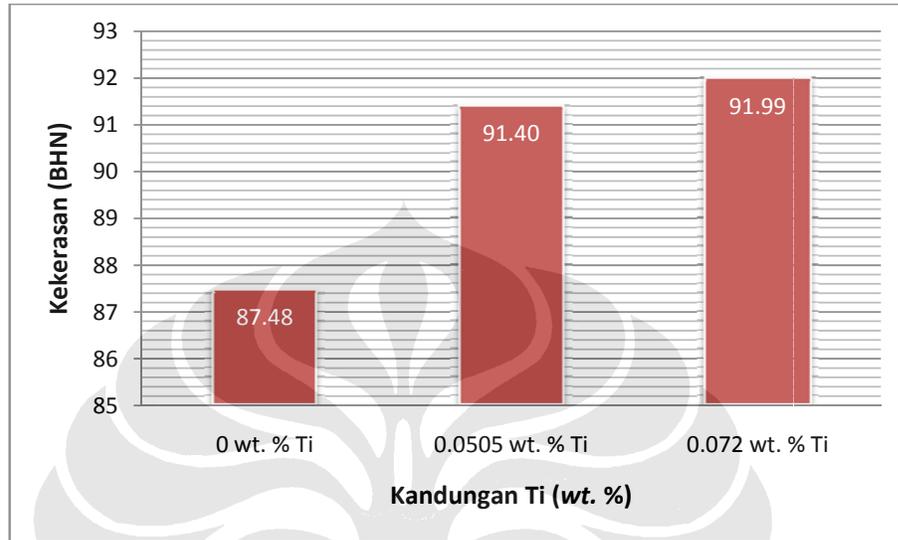


Gambar 4.2. Perbandingan kekerasan pada sampel tebal sebelum dan sesudah penambahan 0.0505 wt. % Ti dan 0.072 wt. % Ti.

Gambar 4.2 memperlihatkan bahwa kekerasan sampel tebal tanpa penghalus butir titanium adalah 83.43 BHN, kekerasan dengan penambahan 0.0505 wt. % Ti adalah 85.77 BHN, sedangkan pada penambahan 0.072 wt. % Ti kekerasannya adalah 89.42 BHN. Hal ini berarti dengan penambahan titanium sebesar 0.0505 wt. % Ti akan meningkatkan kekerasan sebesar 2.34 BHN, atau sebesar 2.8 %, dan penambahan 0.072 wt. % Ti peningkatan kekerasan yang terjadi sebesar 5.99 BHN, atau sebesar 7.17 %

Hal ini sesuai dengan literatur bahwa penambahan unsur titanium sebagai penghalus butir akan meningkatkan kekerasan^[3], yang kemungkinan disebabkan

oleh mengecilnya nilai DAS (*Dendrite Arm Spacing*). Hal ini diperkuat oleh penelitian R. Torres^[18] yang mengemukakan hubungan antara pengecilan nilai DAS dengan peningkatan nilai kekerasan.



Gambar 4.3. Perbandingan kekerasan pada sampel tipis sebelum dan sesudah penambahan 0.0505 wt. % Ti dan 0.072 wt. % Ti.

Pada Gambar 4.3 diperlihatkan bahwa kekerasan sampel tipis tanpa penghalus butir titanium adalah 87.48 BHN, kekerasan dengan penambahan 0.0505 wt. % Ti adalah 91.40 BHN, sedangkan pada penambahan 0.072 wt. % Ti kekerasannya adalah 91.99 BHN. Hal ini berarti peningkatan kekerasan untuk penambahan 0.0505 wt. % Ti adalah sebesar 3.92 BHN, atau sebesar 4.4 %, sedangkan untuk penambahan 0.072 wt. % Ti terjadi peningkatan sebesar 4.51 BHN, atau sebesar 5.1 %.

Nilai kekerasan pada sampel tebal (Gambar 4.2) lebih kecil dari nilai kekerasan pada sampel tipis (Gambar 4.3), hal ini dikarenakan laju pembekuan pada sampel tipis lebih tinggi dari laju pembekuan pada sampel tebal, sehingga kekerasannya lebih tinggi. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa semakin cepat laju pembekuan maka ukuran DAS akan semakin kecil^{[6][9]}. Semakin kecil nilai DAS maka kekerasan akan makin tinggi^[18].

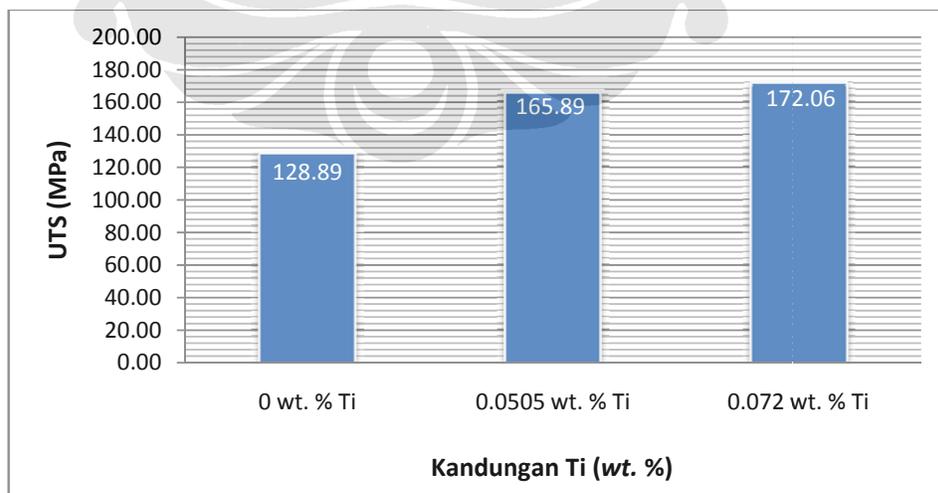
Dari Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa pada penambahan 0.072 wt. % Ti pada sampel tipis penambahan kekerasan dari penambahan

sebelumnya, yaitu 0.0505 wt. % Ti sangat kecil, yaitu 0.59 BHN, sedangkan pada sampel tebal penambahan kekerasannya sebesar 3.65 BHN.

Hal ini menunjukkan penambahan nilai kekerasan pada sampel tipis setelah penambahan penghalus butir titanium secara umum lebih kecil dibandingkan dengan sampel tebal. Hal ini kemungkinan dikarenakan pada sampel tipis laju pembekuannya tinggi, sehingga penambahan penghalus butir titanium sebagai pengatur laju pembekuan kurang efektif. Dari Gambar 4.1 dan 4.2 dapat dilihat bahwa variabel penambahan penghalus butir titanium yang digunakan tidak signifikan merubah nilai kekerasan. Hal ini akan dikonfirmasi pada pengamatan mikrostruktur pada sub bab 4.2.1. Apabila nilai kekerasan dalam BHN dikonversikan ke dalam nilai HRB (tabel konversi BHN ke HRB dapat dilihat pada lampiran 2), maka nilai kekerasan dari penambahan penghalus butir berkisar diatas 40 HRB (40 HRB ~ 80 BHN). Nilai kekerasan ini sudah masuk dalam standar yang ditentukan oleh PT. X, yaitu minimum 40 HRB.

4.1.3. Pengaruh Titanium Terhadap Kekuatan Tarik Paduan AC4B

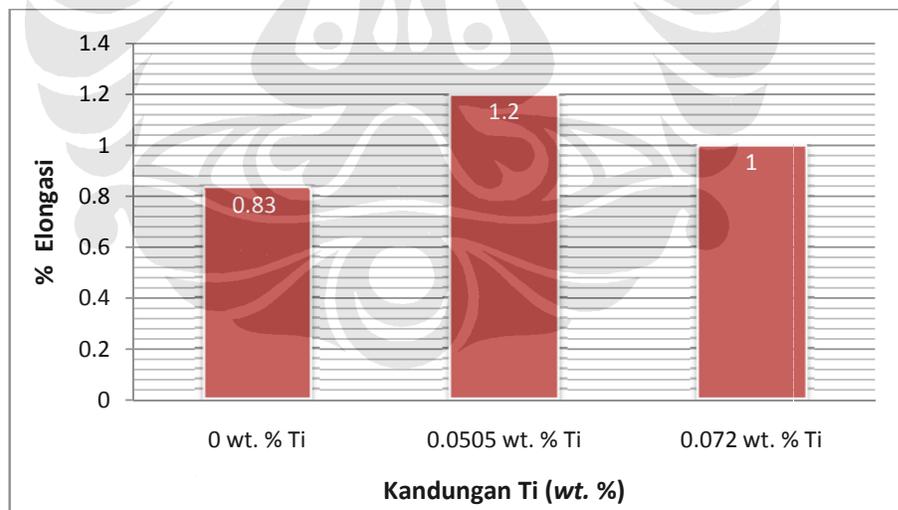
Gambar 4.4 memperlihatkan mengenai nilai UTS (*Ultimate Tensile Strength*) dari paduan aluminium AC4B tanpa penambahan penghalus butir aluminium dan dengan penambahan 0.0505 wt. % Ti dan 0.072 wt. % Ti. Data mentah hasil pengujian tarik dapat dilihat pada lampiran 3.



Gambar 4.4. Perbandingan nilai UTS sebelum dan sesudah penambahan 0.0505 wt. % Ti dan 0.072 wt. % Ti.

Seperti diperlihatkan pada Gambar 4.4, nilai UTS pada paduan AC4B tanpa penambahan penghalus butir titanium adalah 128.89 MPa, pada penambahan 0.0505 wt. % Ti nilai UTSnya adalah 165.89 MPa, dan pada penambahan 0.072 wt. % Ti nilai UTSnya adalah 172.06 MPa. Dari data pengujian tarik tersebut terlihat bahwa dengan penambahan 0.0505 wt. % Ti akan meningkatkan nilai UTS sebesar 28.7 %, atau peningkatan sebesar 37 MPa. Penambahan 0.072 wt. % Ti akan meningkatkan nilai UTS sebesar 33.4 % , atau peningkatan sebesar 43.17 MPa. Dibandingkan dengan penambahan 0.0505 wt. % Ti, penambahan 0.072 wt. % Ti akan menambah nilai UTS sebesar 6.7 %, atau terjadi kenaikan sebesar 6.17 MPa dari penambahan sebelumnya.

Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa penghalusan butir akan meningkatkan kekuatan tarik^{[14][19]}. Hal ini kemungkinan dikarenakan penghalus butir titanium akan mereduksi ukuran butir dari α - aluminium primer sehingga membentuk struktur butir yang *equiaxed*. Struktur *equiaxed* ini mempunyai beberapa keunggulan, diantaranya menghasilkan kekuatan tarik yang tinggi^[19].



Gambar 4.5. Perbandingan nilai elongasi sebelum dan sesudah penambahan 0.0505 wt. % Ti dan 0.072 wt. % Ti.

Gambar 4.5 memperlihatkan nilai elongasi dari sampel tanpa penambahan titanium dan dengan penambahan 0.0505 wt. % Ti dan 0.072 wt. % Ti. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa dengan penambahan 0.0505 wt. % Ti akan

meningkatkan elongasi sebesar 44%. Penambahan titanium sebesar 0.072 wt. % akan meningkatkan elongasi sebesar 20.4 %. Penambahan elongasi pada penambahan 0.072 wt. % Ti ternyata lebih kecil daripada pada penambahan 0.0505 wt. % Ti. Hal ini tidak sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa nilai elongasi akan meningkat dengan penambahan penghalus butir^[14]. Kemungkinan hal ini disebabkan oleh kurang terkontrolnya proses pengecoran pada pembuatan sampel uji tarik, dikarenakan cetakan *ingot* yang digunakan tidak dilakukan *preheating* terlebih dahulu, dan kecepatan penuangan yang tidak sama antara sampel yang satu dengan sampel yang lain. Hal ini juga dapat disebabkan oleh adanya konsentrasi tegangan pada bagian tertentu yang mengakibatkan sampel uji tarik tidak homogen sehingga mengalami perpatahan tidak tepat pada *gauge length*^[20].

Pengamatan makro dari patahan sampel uji tarik dapat dilihat pada gambar 4.6. Dari patahan tersebut terlihat bahwa material bersifat getas, ditunjukkan dengan patahan yang berwarna terang dan kasar, dan tidak terjadi *necking* yang merupakan indikasi terjadinya perpatahan getas.

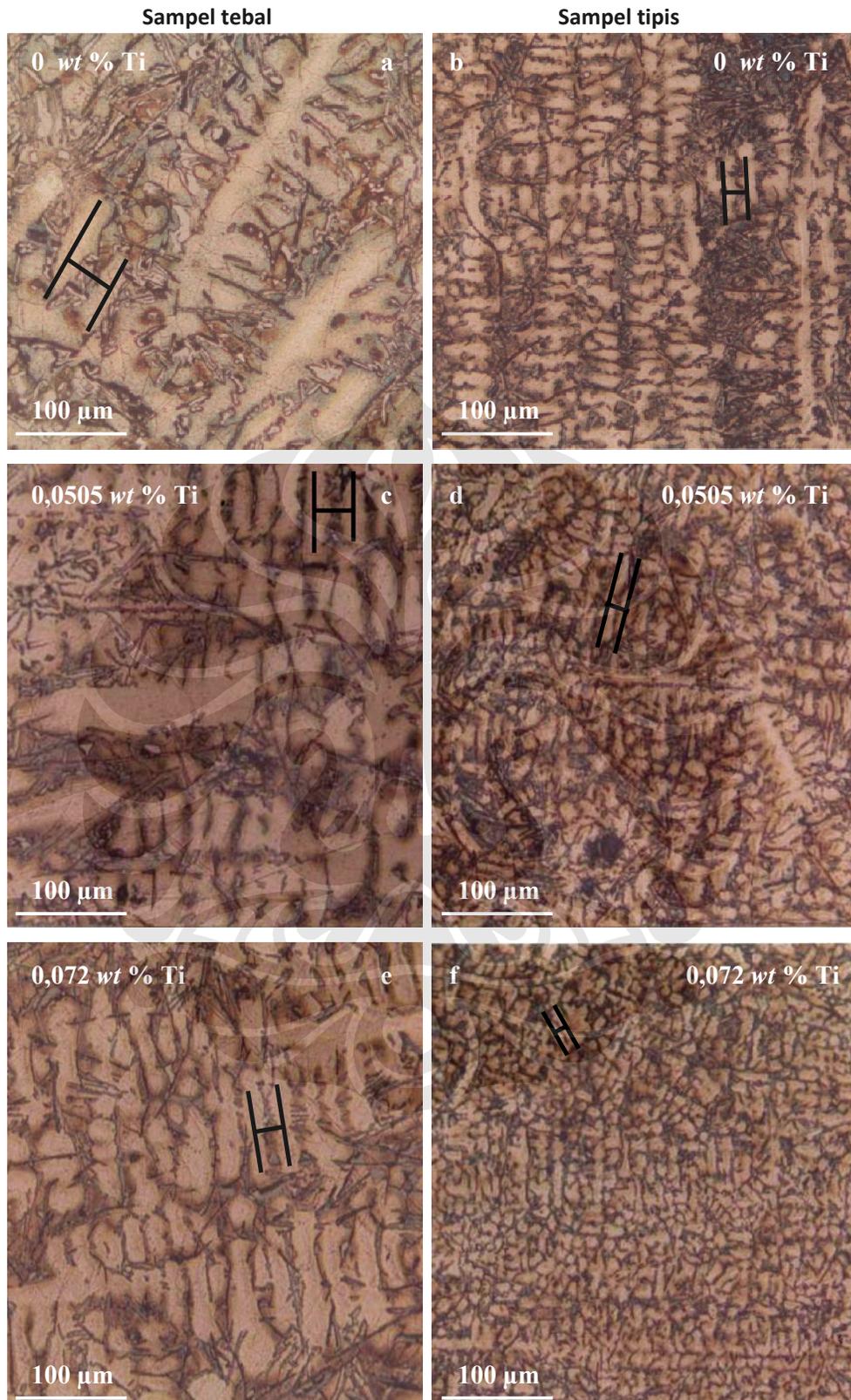


Gambar 4.6. Foto makrostruktur dari sampel patahan uji tarik.

4.2. PENGAMATAN MIKROSTRUKTUR

4.2.1. Pengamatan Dengan Menggunakan Mikroskop Optik

Pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik dilakukan untuk mengetahui karakteristik fasa, struktur dendrit dengan kaitannya dengan sifat mekanis. Pada Gambar 4.7 diperlihatkan foto mikrostruktur dari sampel tebal dan sampel tipis tanpa penambahan titanium (Gambar 4.7 a-b), dengan penambahan 0.0505 wt. % Ti (Gambar 4.7 c-d), dan dengan penambahan 0.072 wt. % Ti (Gambar 4.7 e-f). Dari gambar tersebut terlihat bahwa mikrostruktur tanpa dan dengan penambahan penghalus butir mempunyai struktur yang sama yaitu dendritik.



Gambar 4.7. Foto mikrostruktur paduan AC4B pada sampel tebal dan sampel tipis dengan penambahan (a-b) 0 wt. % Ti; (c-d) 0.0505 wt. % Ti; dan (e-f) 0.072 wt. % Ti. Etsa Tucker.

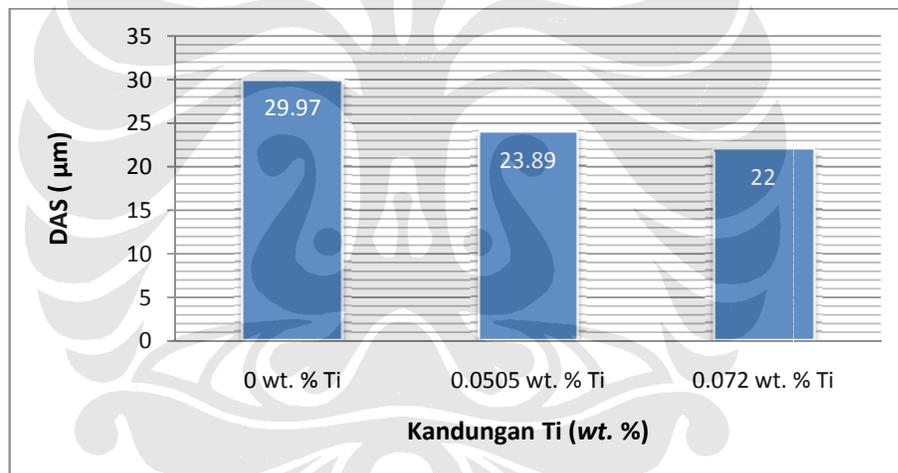
Pada saat paduan aluminium silikon hipoeutektik (kandungan silikon dibawah 12 %) mulai membeku, terdapat beberapa macam fasa yang mengendap, diawali dengan reaksi eutektik Al – Si dan diikuti dengan fasa yang mengandung Mn dan Fe, dan diakhiri dengan pengendapan fasa kedua eutektik seperti Mg_2Si dan Al_2Cu . Umumnya fasa yang mengandung Mn dan Fe adalah fasa Al_5FeSi yang terbentuk oleh pembekuan lambat, dan $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ yang terbentuk oleh pembekuan cepat^[11]. Unsur Mn dan Fe mempunyai kecenderungan untuk saling berikatan dan saling bersubstitusi satu sama lain. Mn dan Fe memiliki nomor atom yang tidak jauh berbeda (Mn: 25; Fe: 26) dan nilai keelektronegatifan yang tidak berbeda jauh sehingga dapat membentuk ikatan yang kuat. Fasa $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ dan fasa Al_2Cu merupakan fasa intermetalik, yaitu fasa kedua yang mengendap pada paduan aluminium, yang terbentuk akibat dari komposisi kimia yang melebihi batas kelarutannya. Fasa intermetalik ini akan terbentuk mengelilingi fasa aluminium primer, seperti diperlihatkan pada Gambar 4.7. Fasa aluminium primer (dendrit) dikelilingi oleh jaringan fasa intermetalik dan partikel kristal silikon.

Pada Gambar 4.7 terdapat rangkaian jaringan fasa yang berbentuk jarum yang terbentuk diantara fasa dendrit. Fasa yang berbentuk jarum ini kemungkinan besar adalah Al_5FeSi dan kristal $AlSi$. Selain itu, juga terdapat fasa berbentuk *chinese script* yang kemungkinan besar adalah $\alpha - Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ ^[9] (Gambar 4.7c) dan fasa $AlSi$ yang berbentuk serpihan. Fasa $AlSi$ yang berbentuk jarum ini menimbulkan kekuatan dan kekerasan yang lebih besar dari fasa $AlSi$ yang berbentuk serpihan^[21]. Struktur jarum $AlFeSi$ memberikan sifat yang merusak sifat mekanis karena sangat getas dan mengurangi ketahanan korosi^[22], dan menyebabkan *shrinkage cavities*^[9].

Penambahan penghalus butir titanium akan mengubah struktur dendrit menjadi lebih rapat, dan mengubah struktur dendrit kolumnar menjadi dendrit *equiaxed*^[23]. Hal ini terlihat jelas pada Gambar 4.7 pada sampel tipis dengan penambahan 0.072 wt. % Ti struktur dendrit menjadi sangat kecil dan rapat dibandingkan dengan struktur dendrit tanpa penambahan aluminium. Menurut penelitian Lozano^[24], penambahan titanium akan menyebabkan peningkatan fraksi volume dan reduksi ukuran dari fasa α – aluminium dan serpihan $AlSi$ (*cubeoids*).

Hal ini sejalan dengan penelitian lain yang menyatakan bahwa penambahan penghalus butir akan meningkatkan ukuran dendrit dan meningkatkan luas area kontak antara dendrit sehingga mengurangi ruang interdendritik^[25]. Hal ini yang kemungkinan mengakibatkan fasa intermetalik yang mengisi ruang interdendritik tersebar secara merata di seluruh material.

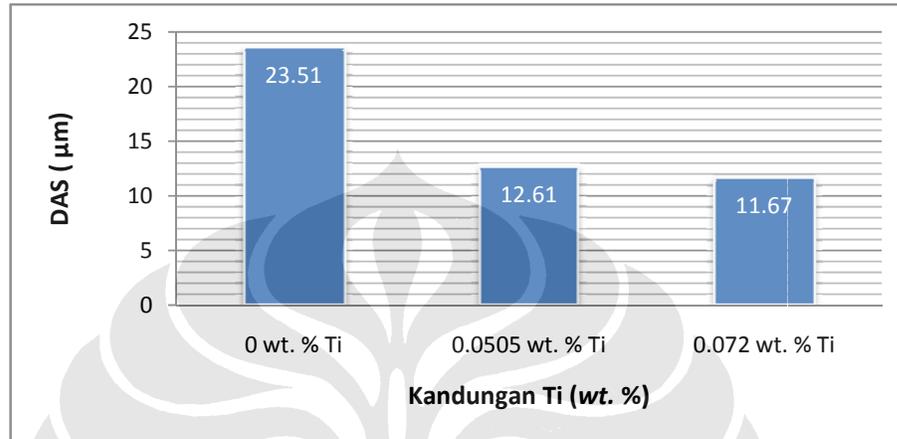
Pengukuran nilai DAS dilakukan untuk mengukur perubahan nilai DAS dengan kaitannya dengan penambahan penghalus butir titanium. Pengukuran nilai DAS dilakukan dengan mengukur panjang jarak antar dendrit pada bagian yang representatif secara manual dengan menggunakan penggaris baik pada sampel tebal maupun pada sampel tipis sebanyak 10 kali dalam 1 foto mikrostruktur. Hasil pengukuran nilai DAS dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9. Data mentah hasil pengukuran DAS dapat dilihat pada lampiran 4.



Gambar 4.8. Perbandingan nilai DAS pada bagian sampel tebal sebelum dan sesudah penambahan 0.0505 wt. % Ti dan 0.072 wt. % Ti.

Dari Gambar 4.8 tampak bahwa pada sampel tebal, penambahan penghalus butir titanium akan mengurangi nilai DAS, yang berarti jarak antar dendrit makin sempit. Hal ini menjelaskan mengenai peningkatan nilai kekerasan yang terjadi pada subbab 4.2.1. Nilai DAS pada material AC4B tanpa penambahan penghalus butir aluminium adalah 29.97 µm, dengan penambahan 0.0505 wt. % Ti nilai DASnya adalah 23.89 µm, dengan penambahan 0.072 wt. % Ti nilai DASnya adalah 22 µm. Penambahan 0.0505 wt. % Ti akan menurunkan nilai DAS sebesar

20.2 %, sedangkan penambahan 0.072 wt. % Ti akan menurunkan nilai DAS sebesar 26.5 %. Nilai DAS dipengaruhi oleh kecepatan proses pembekuan pada proses pengecoran, dan nilainya mempengaruhi sifat mekanis suatu paduan logam^[14].

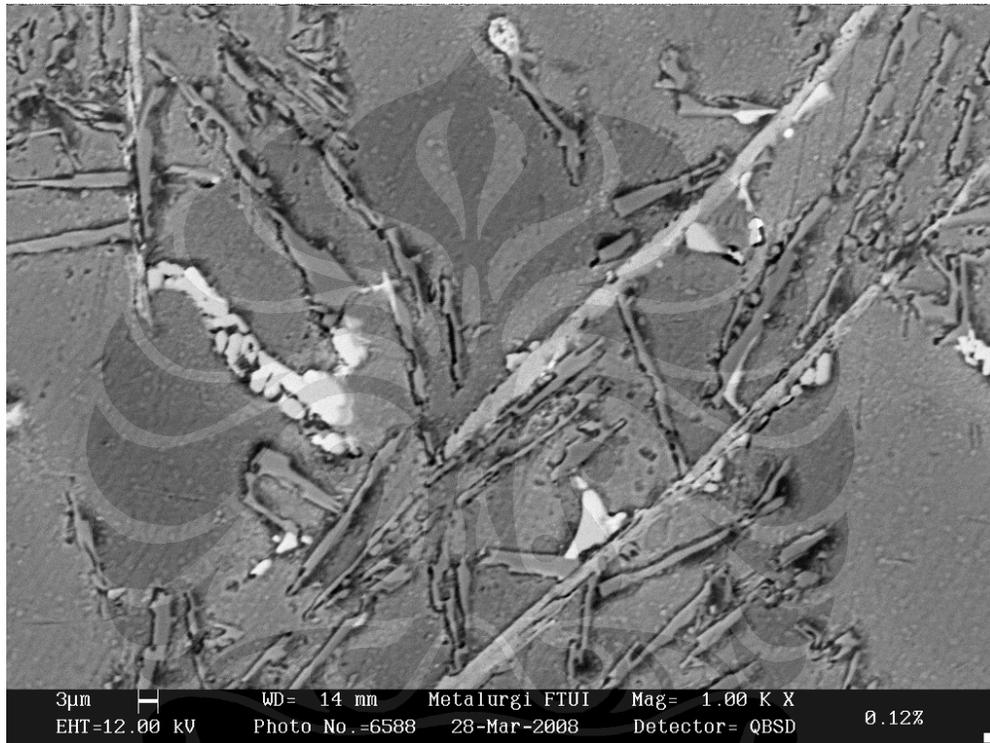


Gambar 4.9. Perbandingan nilai DAS pada sampel tipis sebelum dan sesudah penambahan 0.0505 wt. % Ti dan 0.072 wt. % Ti.

Gambar 4.9 memperlihatkan nilai DAS pada sampel tipis sebelum dan sesudah penambahan penghalus butir titanium. Sebelum ditambahkan titanium, nilai DASnya adalah sebesar 23.51 µm, dengan penambahan 0.0505 wt. % Ti nilai DASnya sebesar 12.61 µm, dengan penambahan 0.072 wt. % Ti nilai DASnya adalah sebesar 11.67 µm. Penambahan 0.0505 wt. % Ti akan menurunkan nilai DAS sebesar 46.3 %, dan penambahan 0.072 wt. % Ti akan menurunkan nilai DAS sebesar 50.3 %. Perubahan ini terlihat jelas pada foto mikrostruktur pada Gambar 4.7, dimana struktur dendrit setelah penambahan titanium menjadi sangat rapat. Pada penambahan 0.0505 wt. % Ti dengan 0.072 wt. % Ti, tampak bahwa penambahan 0.072 wt. % Ti pada sampel tebal akan mengurangi nilai DAS sebesar 6.3 % dari penambahan 0.0505 wt. % Ti. Pada sampel tipis penambahan 0.072 wt. % Ti akan mengurangi nilai DAS sebesar 4 % dibandingkan pada penambahan 0.0505 wt. % Ti. pada sampel tipis, nilai DASnya lebih kecil daripada pada sampel tebal, hal ini dikarenakan pada sampel tipis kecepatan pembekuannya lebih tinggi daripada pada sampel tebal, yang mengakibatkan struktur dendrit yang lebih rapat.

4.2.2. Pengamatan Dengan Menggunakan SEM / EDAX

Pengujian menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dan EDAX (*Energy Dispersive X – Ray Analysis*) digunakan untuk mengetahui fasa yang terbentuk dan mengamati fasa Al_3Ti yang terbentuk setelah penambahan penghalus butir titanium. Hasil pengujian SEM menggunakan *Back Scattered Electron* (BSE) ditunjukkan oleh Gambar 4.10 dan 4.11.



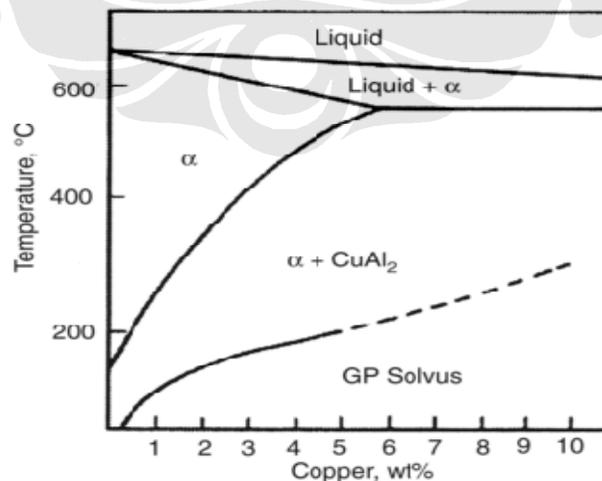
Gambar 4.10. Hasil pengujian SEM dengan penambahan 0.0505 wt. % Ti, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX.

Tabel 4.3. Komposisi mikro hasil analisa SEM / EDAX titik titik pada Gambar 4.10 pada paduan AC4B dengan penambahan 0.0505 wt. % Ti.

No	Komposisi (% berat)						Warna	Fasa yang mungkin terbentuk
	Si	Cu	Fe	Mn	Ti	Al		
1	15.15	-	23.64	4.45	0	Sisa	Abu – abu muda	$Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$
2	92.23	-	-	-	0	Sisa	Abu – abu gelap	AlSi kristal
3	-	66.87	-	-	0	Sisa	Putih	Al_2Cu
4	1.52	-	-	-	0	Sisa	Abu – abu	Matriks Al

Dari Gambar 4.10 terlihat bahwa struktur interdendritik yang ada memiliki perbedaan warna dan morfologi yang mengindikasikan perbedaan fasa. Untuk mengetahui komposisi fasa dari morfologi yang berbeda, dilakukan pengujian EDAX. Gambar 4.10 memperlihatkan titik pengujian EDAX dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.2. Hasil analisa EDAX pada Tabel 4.2 mengindikasikan terbentuknya fasa kristal silikon, $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$, matriks kaya Al dan Al_2Cu . Hal ini sesuai dengan literatur^[11] yang menyatakan bahwa pada paduan hipoeutektik, , terdapat tiga tahap pembentukan fasa, yaitu pembentukan jaringan dendritik α -Al, reaksi eutektik Al – Si dan pengendapan fasa eutektik kedua seperti CuAl_2 . Kristal silikon terbentuk karena batas kelarutan silikon dalam aluminium dalam keadaan larutan padat (*solid solution*) sebesar 1.65 %^[9]. Oleh karena itu, sisanya membentuk silikon bebas dalam bentuk kristal silikon. Pada titik nomor 1, fasa yang berwarna abu abu muda merupakan $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$ yang berbentuk jarum. Fasa ini menyebabkan sifat yang getas^[22].

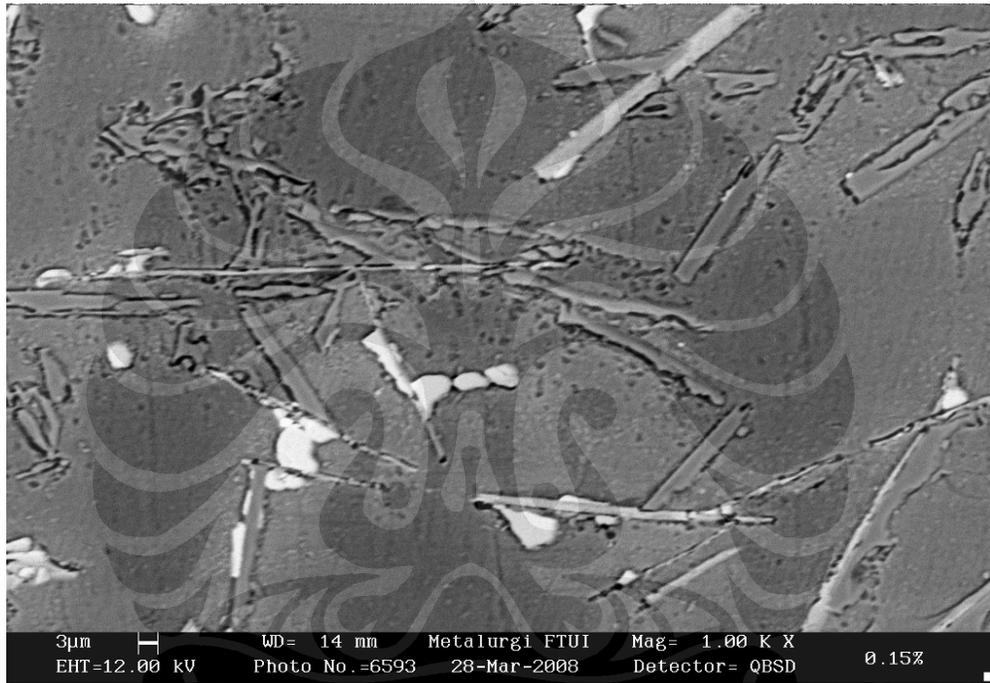
Fasa yang berwarna abu abu gelap pada titik nomor 2 merupakan kristal AlSi dengan bentuk jarum (*acicular*). Selain bentuk jarum, pada Gambar 4.10 juga terdapat kristal AlSi yang berbentuk serpihan. Fasa yang juga banyak terdapat pada Gambar 4.10 adalah fasa yang berwarna putih yang pada titik nomor 3 diidentifikasi sebagai fasa Al_2Cu . Fasa Al_2Cu umumnya memiliki bentuk yang bulat atau *irregular*^[9], dan menurut Manash Dash^[25] fasa Al_2Cu sering menempel pada jarum $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$, seperti terlihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.11. Diagram fasa Al-Cu^[25]. Garis merah merupakan kandungan Cu pada penambahan 0.0505 wt. % Ti yaitu sebanyak 2.8 %.

Pada diagram fasa Al – Cu, paduan Al₂Cu terbentuk pada daerah dua fasa α + β seperti terlihat pada Gambar 4.11. Pada Gambar 4.11, paduan Al₂Cu akan terbentuk di bawah temperatur *solvus* pada 400 °C, hal ini menjelaskan mengenai fasa Al₂Cu yang terbentuk terakhir pada saat pembekuan.

Untuk membandingkan pengaruh penambahan penghalus butir titanium terhadap pembentukan fasa pada aluminium, dilakukan pula pengujian SEM / EDAX pada penambahan 0.072 wt. % Ti. Hasil pengamatan dengan SEM dapat dilihat pada Gambar 4.12 dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.3.



Gambar 4.12. Hasil pengujian SEM dengan penambahan 0.072 wt. % Ti, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX.

Tabel 4.4. Komposisi mikro hasil analisa SEM / EDAX titik titik pada Gambar 4.10 pada paduan AC4B dengan penambahan 0.072 wt. % Ti.

No	Komposisi (% berat)						Warna	Fasa yang mungkin terbentuk
	Si	Cu	Fe	Mn	Ti	Al		
1	11.96	-	24.73	5.46	0	Sisa	Abu – abu muda	Al ₁₅ (Fe,Mn) ₃ Si ₂
2	96.43	-	-	-	0	Sisa	Abu – abu gelap	AlSi kristal
3	0.51	66.51	-	-	0	Sisa	Putih	Al ₂ Cu
4	1.52	-	-	-	0	Sisa	Abu – abu	Matriks Al

Hasil analisa EDAX pada Tabel 4.3 mengindikasikan bahwa pada penambahan 0.072 wt. % Ti fasa yang terbentuk adalah kristal silikon, $\text{Al}_3(\text{Fe,Mn})\text{Si}_2$, Al_2Cu dan matriks kaya aluminium. Tidak tampak adanya perbedaan morfologi dibandingkan dengan penambahan 0.0505 wt. % Ti.

Fasa nomor 1 pada Gambar 4.12 merupakan $\text{Al}_3(\text{Fe,Mn})\text{Si}_2$ yang berbentuk seperti jarum yang merupakan fasa β . Kecepatan pembekuan yang tinggi akan menyebabkan pertumbuhan struktur jarum Al_3FeSi menjadi tertahan dan mendorong terbentuknya fasa $\text{Al}_3(\text{Fe,Mn})\text{Si}_2$. Semakin tinggi kecepatan pembekuan maka akan mendorong perubahan struktur β $\text{Al}_3(\text{Fe,Mn})\text{Si}_2$ yang berbentuk jarum menjadi α $\text{Al}_3(\text{Fe,Mn})\text{Si}_2$ yang berbentuk *chinese script*^[9]. Fasa α dari $\text{Al}_3(\text{Fe,Mn})\text{Si}_2$ yang berbentuk seperti *chinese script* tidak terlihat pada gambar ini, hal ini bisa disebabkan daerah foto yang diambil kurang representatif. Pada foto mikrostruktur (Gambar 4.7) terdapat struktur *chinese script*, yang mengindikasikan struktur *chinese script* terbentuk, hanya saja kurang teramati dengan baik pada pengamatan dengan SEM. Fasa AlSi , pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.12 diberi nomor 2, terlihat tersebar secara merata. Hal ini sejalan dengan penelitian Lozano^[24] yang mengemukakan bahwa fraksi volume AlSi akan meningkat seiring dengan penambahan titanium. Peningkatan fraksi volume AlSi akan menghasilkan fasa AlSi yang tersebar lebih merata.

Pada matriks aluminium, yang pada Gambar 4.10 dan 4.12 diberi nomor 4, pada EDAX hanya teridentifikasi kandungan aluminium dan sedikit silikon. Hal ini kemungkinan dikarenakan keterbatasan dari alat EDAX sehingga tidak dapat mendeteksi kandungan unsur terlarut lainnya selain silikon, seperti Mg, Fe, Mn, Cu, dan unsur Ti.

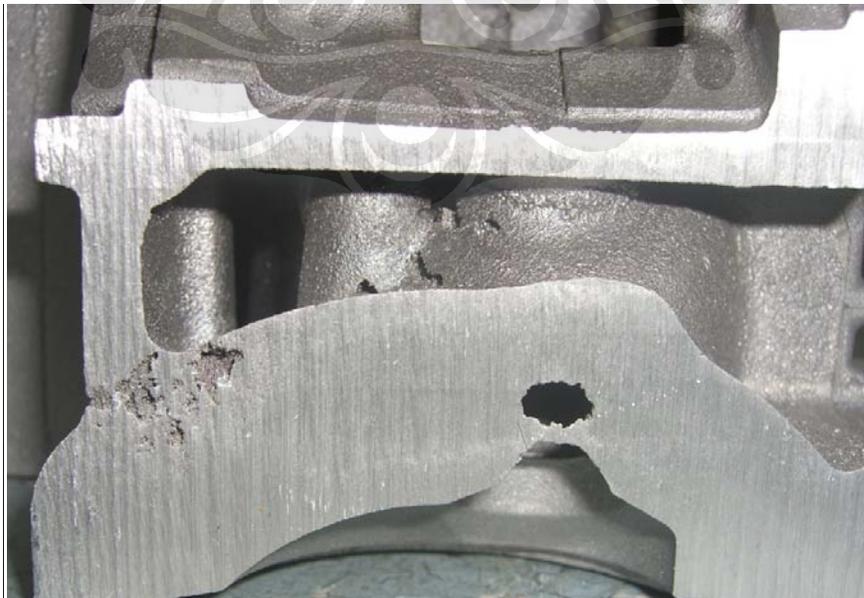
Kandungan unsur Ti tidak dapat terdeteksi oleh EDAX baik pada penambahan 0.0505 wt. % Ti dan 0.072 wt. % Ti. Seharusnya kandungan titanium terdeteksi pada EDAX dengan fasa Al_3Ti . Hal ini kemungkinan dikarenakan alat EDAX sulit untuk mendeteksi kandungan titanium pada kadar yang sedikit^[19]. Shahrooz Nafisi^[23] 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. Limmaneevichitr^[16] menemukan fasa Al_3Ti yang menempel pada fasa silikon eutektik. Hal ini berarti, apabila terdapat fasa Al_3Ti , terdapat kemungkinan fasa tersebut akan berada dekat atau menempel pada fasa silikon eutektik.

4.3. ANALISA TINGKAT KEGAGALAN PADA KOMPONEN *CYLINDER HEAD* DENGAN VARIASI PENAMBAHAN TITANIUM

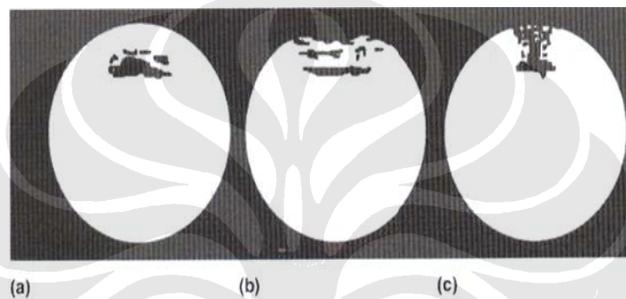
Komponen *cylinder head* yang diproduksi saat ini memiliki masalah kebocoran yang cukup serius, dengan tingkat kegagalan sebesar 8 % dari total produksi[*restricted information*]. Dari percobaan penambahan titanium pada paduan AC4B, pada penambahan 0.0505 wt. % Ti tingkat kegagalannya adalah sebesar 2 buah dari total 24 *cylinder head* yang diuji, atau sebesar 8.33 %, sedangkan pada penambahan 0.072 wt. % tingkat kegagalannya adalah 0 buah dari 23 buah *cylinder head* yang diuji, atau sebesar 0 %. Data lengkap hasil produksi dapat dilihat pada lampiran 5.

Pada penambahan 0.0505 wt. % Ti, ternyata tingkat kegagalannya tidak berkurang dibandingkan dengan tanpa penambahan titanium. *Cylinder head* yang mengalami kegagalan merupakan *cylinder head* yang diproduksi pada jam kedua dan jam keempat. Hal ini mengindikasikan efektifitas penghalus butir titanium sudah berkurang pada jam kedua. Kegagalan pada penambahan 0.0505 wt. % Ti diakibatkan karena adanya *shrinkage porosity*.



Gambar 4.13. Cacat *shrinkage porosity* pada *cylinder head*, ditandai dengan lingkaran merah.

Gambar 4.13 menunjukkan *shrinkage porosity* pada bagian tebal pada *cylinder head*, yang merupakan hal yang fatal karena menyebabkan kebocoran. *Shrinkage* muncul saat pembekuan sebagai akibat dari perbedaan volume antara fasa padat dan fasa cair. Pada saat logam mulai membeku, terjadi penyusutan volume yang mengakibatkan terbentuknya pori, diilustrasikan pada Gambar 4.14(a). Pori ini umumnya sulit terlihat oleh mata telanjang, perlu dilakukan pengujian kebocoran terlebih dahulu untuk mengetahui bagian mana yang cacat.



Gambar 4.14. Ilustrasi pembentukan *shrinkage* dalam pengecoran aluminium. (a) pembentukan pori, (b) *shrinkage* meningkatkan ukuran pori, (c) *shrinkage* semakin bertambah sehingga pori membentuk “wormhole”^[6].

Shrinkage yang semakin bertambah akan meningkatkan jumlah dan ukuran lubang (Gambar 4.14b) sehingga pada akhirnya akan membentuk satu kesatuan lubang yang menjorok ke dalam material (Gambar 4.14c). Dalam paduan Al – Si – Cu, pembekuan yang cepat akan menyebabkan terdistribusinya pori secara merata dalam batas butir, sedangkan pendinginan yang lambat akan menyebabkan *shrinkage* yang terdistribusi pada daerah interdendritik^{[6][12]}.

Terjadinya *shrinkage* pada penambahan penghalus butir dengan kadar 0.0505 wt. % Ti yang menyebabkan terjadinya kebocoran mengindikasikan bahwa penghalusan butir tidak berjalan dengan efektif. *Cylinder head* yang mengalami *shrinkage* merupakan *part* yang dicor pada jam kedua dan jam keempat. Tidak ada *part* yang mengalami kebocoran pada jam ke nol dan jam pertama, sehingga kemungkinan *shrinkage* tersebut disebabkan berkurangnya efektifitas penghalus butir seiring dengan bertambahnya waktu, atau disebut dengan *fading*.

Parameter pengecoran seperti temperatur *dies* dan temperatur logam cair pada variabel penambahan 0.0505 wt. % Ti masih masuk dalam standar yang ditentukan, hal ini berarti proses pengecoran berlangsung dengan baik. Cacat lain selain kebocoran yang ditemukan adalah cacat akibat *misrun* dan overdimensi. Cacat akibat *misrun* ini dikarenakan *dies* tidak menutup dengan rapat sehingga logam cair meluap keluar dari *dies*, menghasilkan *cylinder head* yang tidak utuh. Cacat akibat *misrun* dan overdimensi ini cukup banyak terjadi, menyebabkan *cylinder head* yang lolos inspeksi untuk dilakukan pengujian kebocoran hanya 24 buah pada 0.0505 wt. % Ti dan 23 buah pada 0.072 wt. % Ti dari keseluruhan 74 buah *cylinder head* yang diproduksi penambahan 0.0505 wt. % Ti dan 100 buah untuk penambahan 0.072 wt. % Ti. Oleh karena itu direkomendasikan untuk melakukan inspeksi rutin pada kondisi *dies* yang akan digunakan.

Pada penambahan penghalus butir dengan kadar 0.072 wt. % Ti, tidak ditemukan adanya indikasi terjadinya kebocoran pada semua *cylinder head* yang diuji. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan penghalus butir 0.072 wt. % Ti efektif untuk mengurangi *shrinkage* pada *cylinder head*.

Seperti yang telah dibahas pada subbab 4.2, penambahan titanium akan meningkatkan sifat mekanis dan menurunkan nilai DAS dari paduan AC4B, akan tetapi peningkatan sifat mekanis yang terjadi dianggap tidak signifikan. Selain itu paduan AC4B menjadi getas dikarenakan tersebarnya fasa intermetalik secara merata.

Penghalus butir titanium yang digunakan adalah penghalus butir fluks yang diklaim mengandung titanium dan boron. Setelah dilakukan pengujian, ternyata unsur yang terdeteksi adalah unsur titanium dan unsur garam, sedangkan unsur boron tidak terdeteksi. Hal ini membatasi penelitian mengenai pengaruh unsur boron terhadap penghalusan butir. Oleh karena itu direkomendasikan untuk memperketat standar inspeksi material sehingga material penghalus butir yang akan digunakan sesuai dengan spesifikasi yang diberikan. Dengan penghalus butir titanium yang sesuai dengan spesifikasi, maka diharapkan efektifitas penghalus butir titanium akan memadai untuk diaplikasikan ke dalam dunia industri otomotif.