

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Produk Coran Paduan Aluminium AC4B dengan 0, 0.067, 0.081, dan 0.115 wt. % Ti dan *Master Alloy* Al-5 %Ti-B

4.1.1 Analisa Komposisi Kimia Hasil Coran

Hasil pengujian komposisi kimia paduan AC4B sebelum dan sesudah penambahan 0.05, 0.08, dan 0.115 wt. % Ti dapat dilihat pada Tabel 4.1. Tabel tersebut memperlihatkan bahwa penambahan 0.05 wt. % Ti yang telah dilakukan sesuai dengan perhitungan *material balance* ternyata menghasilkan nilai yang lebih tinggi yaitu 0.067 wt. % Ti. Akan tetapi, penambahan 0.08 dan 0.1 wt. % Ti yang juga dilakukan sesuai dengan perhitungan *material balance* menghasilkan nilai yang cukup mendekati hasil yang diinginkan yaitu 0.081 dan 0.115 wt. % Ti. Perbedaan yang terjadi, terutama pada penambahan 0.05 wt. % Ti, dimungkinkan karena penimbangan dan pemasukan AlTiB yang kurang presisi. Oleh karena itu, pada bahasan selanjutnya, jumlah penambahan Ti yang akan digunakan merujuk pada 0.067 wt. % Ti, 0.081 wt. % Ti dan 0.115 wt. % Ti. Selain itu, pada hasil pengujian komposisi kimia tersebut juga menunjukkan bahwa unsur-unsur seperti Si, Cu, dan Fe sudah sesuai dengan rentang komposisi standar. Hal tersebut sangat penting untuk diperhatikan karena unsur-unsur tersebut merupakan unsur-unsur paduan yang mempunyai pengaruh yang cukup signifikan terhadap sifat-sifat mekanis serta karakteristik paduan AC4B seperti yang telah dibahas pada bab sebelumnya.

Tabel 4.1. Komposisi sampel uji paduan AC4B.

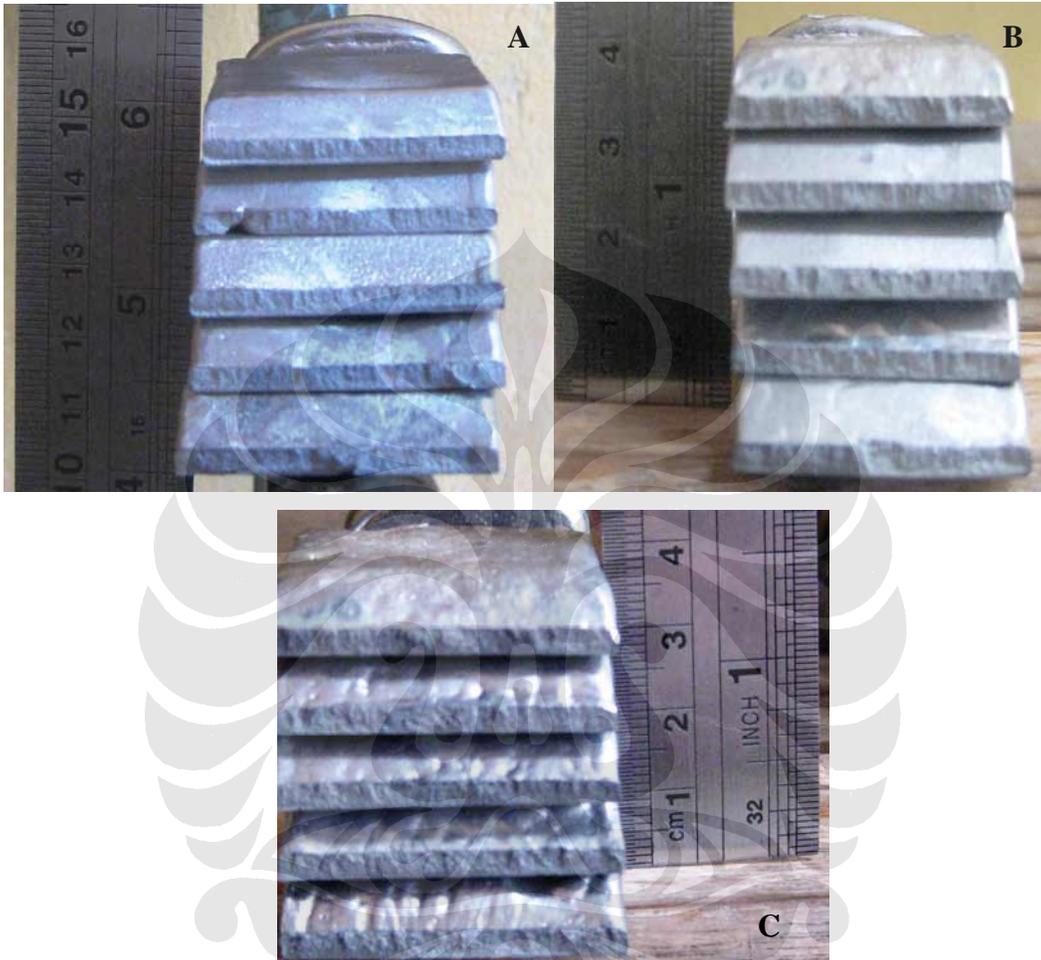
Unsur	AC4B + 0.067 wt. % Ti	AC4B + 0.081 wt. % Ti	AC4B + 0.115 wt. % Ti	Standar AA (%)	Standar JIS (%)	Standar AHM
Si	9.056	8.997	8.731	8-10	7-10	7-10
Cu	2.914	2.918	3.101	3-4 maks	2-4	2-4
Mg	0.272	0.254	0.232	0.05 – 0.5 maks	0.5 maks	0.5 maks
Zn	0.532	0.550	0.454	1 maks	1 maks	1 maks
Fe	0.432	0.460	0.513	1 maks	0.8 maks	1 maks
Mn	0.236	0.240	0.227	0.5 maks	0.5 maks	0.5 maks
Ni	0.079	0.096	0.089	0.5 maks	0.35 maks	0.35 maks
Ti	0.067	0.081	0.115	0.25 maks	0.2 maks	0.2 maks
Pb	0.068	0.059	0.070	-	0.2 maks	0.2 maks
Sn	0.027	0.021	0.037	-	0.1 maks	0.1 maks
Cr	0.015	0.016	0.020	-	0.2 maks	0.2 maks

Pada ketiga sampel tersebut dapat dilihat bahwa pada komposisi 0.067 wt. % Ti mempunyai kandungan Si yang paling tinggi. Sebaliknya, kandungan Cu dan Fe terbanyak dimiliki oleh komposisi 0.115 wt. % Ti. Perbedaan komposisi kimia ini akan dapat dijelaskan nantinya pada sub bahasan pengamatan struktur mikro. Jadi, secara garis besar dengan melihat Tabel 4.1 dan membandingkan data komposisi kimia untuk setiap penambahan wt. % Ti dengan standar yang berlaku, baik JIS maupun AA, dapat diambil kesimpulan bahwa seluruh unsur paduan AC4B yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai komposisi yang sesuai dengan rentang komposisi standar.

4.1.2 Karakteristik Paduan AC4B dan *Master Alloy* AlTiB

Gambar 4.1 menunjukkan keseluruhan penampang patahan dari sampel uji K-Mold pada paduan AC4B dengan penambahan 0.067, 0.081, dan 0.115 wt. % Ti. Perhitungan dan pengamatan yang dilakukan terhadap penampang patahan sampel K-

Mold meliputi perhitungan secara kuantitatif jumlah permukaan patahan yang mengandung inklusi dibagi dengan jumlah total permukaan patahan.



Gambar 4.1 Pengamatan foto makro terhadap sampel K-Mold pada komposisi (a) 0.067 wt. % Ti, (b) 0.081 wt. % Ti, dan (c) 0.115 wt. % Ti.

Dari hasil pengamatan, sebagai mana yang terlihat pada Gambar 4.1 bahwa secara umum, paduan AC4B yang digunakan tidak terlihat adanya inklusi. Hal ini menunjukkan bahwa bahan dasar paduan AC4B (*ingot* dan *return scrap*) serta proses *fluxing* dan GBF telah berjalan dengan cukup baik yang ditandai oleh tidak terlihatnya unsur pengotor yang sekiranya dapat mengganggu proses pengecoran.

Pengamatan dengan menggunakan SEM dan EDAX dilakukan pada *master alloy* AlTiB. Dari hasil pengamatan diketahui bahwa memang benar adanya *master alloy* AlTiB yang digunakan mengandung unsur titanium, aluminium, dan boron. Pengamatan dengan SEM memperlihatkan struktur fasa yang terdapat dalam *master alloy* AlTiB. Dari Gambar 4.2, didapatkan data yang memperlihatkan bahwa terdapat fasa-fasa yang terbentuk pada *master alloy* AlTiB. Fasa-fasa tersebut kemungkinan besar adalah matriks Al, fasa Al_3Ti dan fasa AlB_{12} .



Gambar 4.2. Pengamatan *master alloy* AlTiB menggunakan SEM.

Tabel 4.2. Komposisi mikro hasil analisa SEM / EDAX titik titik pada Gambar 4.2 *master alloy* AlTiB.

No	Komposisi (% berat)					Warna	Fasa yang mungkin terbentuk
	Si	Ar	B	Ti	Al		
1	-	-	78.37	6.72	Sisa	Putih	$TiAl_3$ dan atau AlB_{12}
2	-	-	81.17	0.10	Sisa	Abu-Abu	Matriks Al

Berdasarkan Gambar 4.2, terlihat bahwa fasa $TiAl_3$ atau mungkin fasa AlB_{12} berwarna terang. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa lapisan $TiAl_3$ dalam keadaan yang berlebih menyelimuti lapisan permukaan dari partikel AlB_{12} [27]. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Greer [27], juga mendapatkan partikel TiB_2 yang berwarna terang yang terdispersi merata pada matriks Al yang berwarna gelap. Hal ini disebabkan oleh sifat alami dari partikel $TiAl_3$ yang cepat larut dalam larutan aluminium. Jadi, jika melihat hasil dari SEM terhadap *master alloy* AlTiB yang digunakan telah sesuai dengan spesifikasi awal dari produsen *master alloy* AlTiB tersebut dan sesuai juga dengan literatur yang didapatkan.

4.1.3 Analisa Kandungan Porositas

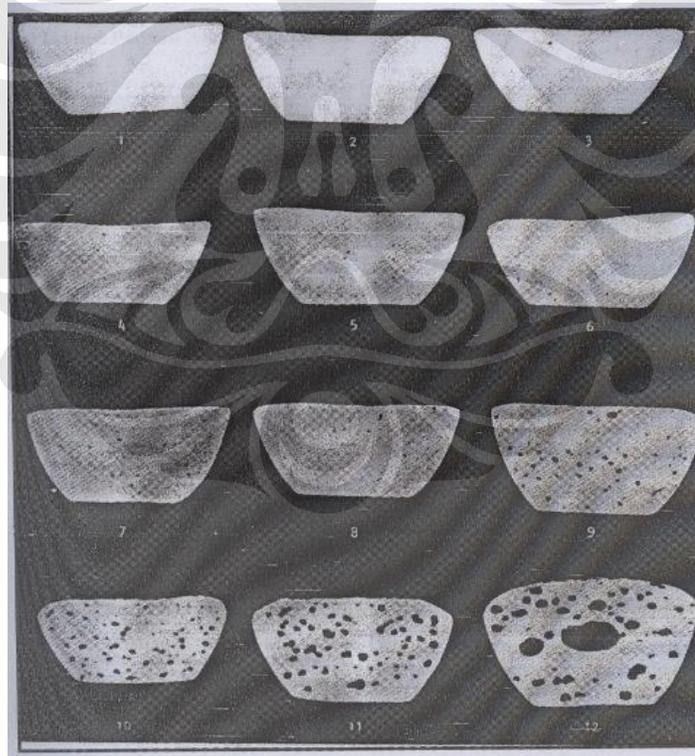
Porositas merupakan salah satu jenis cacat yang sering terjadi pada proses pengecoran. Peningkatan dalam hal kuantitas porositas pada suatu produk hasil pengecoran mengindikasikan penurunan sifat-sifat mekanis terhadap produk tersebut. Porositas umumnya terjadi dikarenakan adanya gas hidrogen yang berlebih dan mengendap pada aluminium cair [8]. Selain itu, diketahui juga bahwa semakin tinggi temperatur pada paduan Al, maka kelarutan hidrogen didalam paduan juga semakin meningkat dan menyebabkan hidrogen yang tidak larut terakumulasi dan membentuk porositas pada produk cor paduan aluminium tersebut.

Pada penelitian kali ini digunakan metode LPDC yang mempunyai *range* kecepatan pembekuan yang tinggi dimana sesuai teori bahwa salah satu cara untuk menghasilkan tingkat persentase porositas yang kecil adalah dengan melakukan pembekuan yang relatif lebih tinggi kecepatannya [1]. Selain itu, penggunaan gas-gas *inert* yang diinjeksikan kedalam aluminium cair seperti argon (Ar) dan atau nitrogen (N) juga dapat mengurangi persentase porositas karena gas-gas *inert* tersebut berfungsi untuk mengikat hidrogen yang ada dalam aluminium cair dan membawanya keluar. Metode ini dikenal dengan nama *Gas Bubbling Flootation* (GBF) [8][12]. Pada penelitian ini, gas yang digunakan adalah gas argon dengan waktu *stirring* ~ 8-10 menit. Kadangkala, penginjeksian gas *inert* kedalam aluminium cair dikombinasikan

dengan gerakan mengaduk (*stirring*) agar gas *inert* yang diinjeksikan dapat terdispersi merata.

Selain disebabkan oleh gas, porositas juga dapat disebabkan oleh *micro shrinkage* yang terjadi pada daerah *interdendritic*. Perbedaan antara porositas yang disebabkan oleh gas dengan *micro shrinkage* dapat dilihat dari bentuk morfologinya. Umumnya, *microporosity* yang disebabkan oleh gas berbentuk bulat (*round*) sedangkan *microporosity* yang disebabkan oleh *shrinkage* berbentuk tak beraturan [12].

Gambar 4.3 menampilkan hasil pengujian vakum pada seluruh sampel AC4B dengan kandungan Ti bervariasi yang diambil pada dua kondisi yaitu pada saat setelah dilakukannya proses GBF (*degassing*) dan pada *holding furnace*. Perbandingan skala tingkat porositas menggunakan standar ASM [12] seperti yang terlihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Standar Persentase Tingkat Porositas [8]

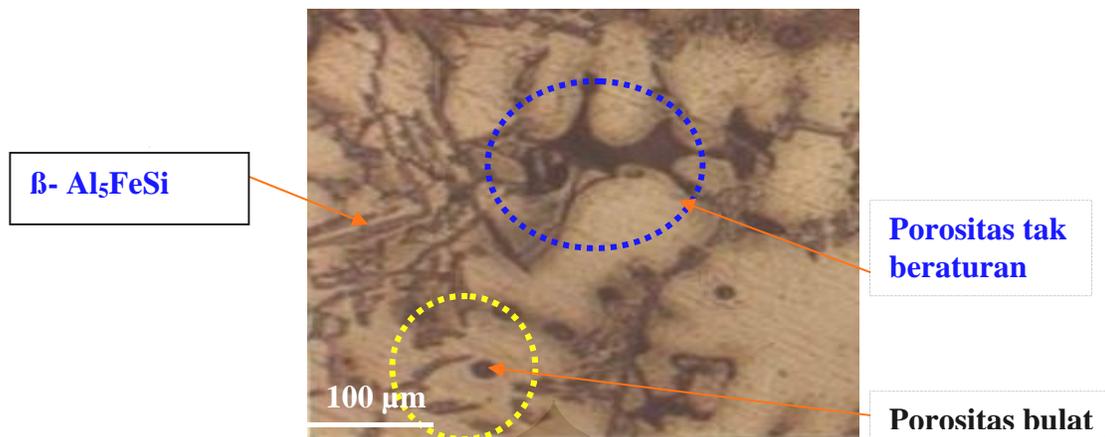
Lihat Gambar 4.3 Chapter 4-2



Pada komposisi 0.067 wt. % Ti dengan membandingkannya dengan sesuai standar ASM, maka didapati tingkat porositasnya adalah skala 4. Namun, ketika komposisi 0.081 wt. % Ti dan 0.115 wt. % Ti dilakukan perbandingan yang sama dengan standar ASM, maka didapati skala tingkat porositas yang terjadi adalah skala 5. Hal ini bertentangan dengan literatur yang menyatakan bahwa penambahan *grain refiner* akan mendistribusikan *microporosity* sehingga *microporosity* yang terbentuk lebih kecil bila dibandingkan dengan paduan aluminium tanpa *grain refiner* ^{[8][12]}.

Seharusnya, jika sesuai literatur maka tingkat porositas dari paduan AC4B akan semakin mengecil seiring dengan bertambahnya wt. % Ti yang terkandung didalamnya. Namun, jika dilihat dari data-data yang didapat selama penelitian maka terdapat kemungkinan atas ketidaksesuaian yang terjadi. Jika digunakan data temperatur GBF dan temperatur *holding furnace* yang terdapat pada lembar lampiran penelitian ini, maka hal ini wajar adanya. Dari data-data yang ada, diketahui bahwa temperatur GBF pada paduan AC4B 0.067, 0.081 dan 0.115 wt. % Ti secara berturut-turut adalah 725, 763, dan 762 °C. Sedangkan temperatur di *holding furnace* untuk komposisi dan urutan yang sama adalah 705, 701, dan 705 °C. Hal ini menandakan bahwa temperatur aluminium cair pada komposisi 0.081 dan 0.115 wt. % Ti lebih tinggi bila dibandingkan dengan komposisi 0.067 wt. % Ti. Sesuai kurva kelarutan hidrogen vs temperatur (Gambar 2.2) yang menyatakan bahwa semakin tinggi temperatur logam cair maka semakin banyak jumlah gas hidrogen yang terlarut dan mengendap membentuk porositas ^{[8][12]}.

Namun, masih terdapat beberapa kemungkinan lainnya yang dapat menjadi penyebab bertambahnya porositas seiring dengan meningkatnya kandungan Ti pada paduan aluminium. Jika kita lihat dari foto mikro ketiga komposisi Ti tersebut (Gambar 4.5), maka porositas yang terbentuk cenderung lebih banyak didominasi oleh bentuk *irregular* dibandingkan dengan bentuk *round*. Hal ini mengindikasikan bahwa mikroporositas yang terjadi lebih banyak disebabkan oleh *shrinkage porosity* daripada *gas porosity* ^[12].



Gambar 4.5 Foto struktur mikro paduan AC4B dengan kadar 0.081 wt. % Ti pada bagian tipis yang menunjukkan adanya porositas bulat dan tak beraturan.

Oleh karena itu, perlu kiranya untuk menelaah lebih lanjut mengenai penyebab-penyebab terbentuknya *shrinkage porosity*. Menurut Taylor, terdapatnya kadar Fe dalam paduan aluminium akan meningkatkan terbentuknya *shrinkage porosity* ^[20]. Hal ini dikarenakan bahwa partikel β - Al_5FeSi yang berbentuk seperti *plate* akan terbentuk lebih dahulu dibandingkan dengan pembentukan fasa eutektik Al-Si. Hal tersebut hanya terjadi jika kandungan Fe terdapat dalam paduan aluminium cukup tinggi. Taylor mengamati hal tersebut pada paduan Al - 5 % Si – 0.5 % Mg – 1 % Cu dan menarik kesimpulan bahwa pada kandungan Fe yang cukup rendah partikel β - Al_5FeSi terbentuk setelah pembentukan fasa eutektik Al-Si sedangkan pada kadar Fe yang cukup tinggi, partikel β - Al_5FeSi terbentuk sebelum fasa eutektik Al-Si. Fasa al-Si eutektik akan cenderung bernukleasi pada partikel β - Al_5FeSi yang berbentuk *platelet*. Fenomena ini akan menyebabkan turunnya nilai permeabilitas logam aluminium cair sehingga dapat memicu terbentuknya *shrinkage porosity* ^[21].

4.1.4. Pengaruh Penambahan Ti Terhadap Sifat Mekanis Paduan AC4B

Pengujian tarik yang dilakukan pada sampel dengan berbagai kandungan Ti dan sebagai perbandingan, digunakan komposisi 0 wt. % Ti yang telah dilakukan penelitian sebelumnya oleh Daniel ^[18]. Dari data pengujian diperoleh nilai elongasi dan nilai *Ultimate Tensile Stress* (UTS), seperti dapat dilihat pada Gambar 4.6,

menunjukkan bahwa seiring penambahan Ti menghasilkan nilai elongasi yang cenderung meningkat.



Gambar 4.6 . Perbandingan nilai elongasi sebelum dan sesudah penambahan 0.067, 0.081 dan 0.115 wt. % Ti.

Nilai tersebut mengalami penurunan sebesar 0.05 % menjadi 2.7 % pada komposisi 0.081 wt. % Ti. Namun, nilai persentase elongasi ini mengalami kenaikan kembali pada komposisi 0.115 wt. % Ti menjadi 3.5 %. Namun, pada penambahan 0.081 wt. % Ti terjadi sedikit penurunan elongasi. Hal ini diperkirakan karena kondisi pembuatan sampel uji tarik yang tidak terkontrol. Dari 4 sampel uji tarik yang digunakan, 1 sampel mengalami porositas pada bagian *gauge length*-nya sehingga tidak dimasukkan kedalam perhitungan pengolahan data. Hal tersebut mengindikasikan hal yang sama dapat terjadi pada sampel uji tarik yang berada pada satu *gating system* yang sama. Kurang terkontrolnya proses pengecoran tersebut dikarenakan oleh tidak seragamnya temperatur *pre-heating* cetakan uji tarik dan peralatan yang basah seperti alat pengaduk dan pengambil logam cair ^[12]. Porositas yang terbentuk dapat menyebabkan konsentrasi tegangan pada bagian tertentu yang mengakibatkan sampel uji tarik tidak homogen sehingga mengalami perpatahan tidak tepat pada *gauge length* ^[12].

Pengaruh penambahan Ti terhadap nilai UTS paduan AC4B dapat dilihat pada Gambar 4.7. Secara umum, penambahan Ti meningkatkan nilai UTS. Namun, penambahan 0.067 – 0.115 wt. % Ti tidak memberi variasi yang signifikan. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan dimana dengan dilakukannya penambahan *grain refiner* akan meningkatkan nilai UTS sebagai akibat dari kecilnya ukuran butir yang memicu keberadaan butir sehingga semakin banyak ^{[12][22][14]}. Butir-butir yang banyak mengindikasikan banyaknya pula batas butir yang ada sehingga memicu mekanisme penguatan yang disebabkan oleh batas butir (*grain boundary strengthening*) ^[14]. Pendeformasian yang terjadi pada suatu material yang diberi gaya dari luar dipicu oleh kehadiran dislokasi yang bergerak disepanjang *slip system*-nya disepanjang butir. Setiap butir memiliki arah dan orientasi yang berbeda sehingga berbeda pula arah dan orientasi *slip system* yang dimiliki oleh setiap butir. Hal ini mengakibatkan jika suatu gaya dari luar yang diberikan pada material memicu pergerakan dislokasi pada *slip system*-nya, maka ketika dislokasi tersebut telah berada pada ujung butir, dislokasi tersebut harus melewati batas butir untuk dapat berpindah karena perbedaan arah dan orientasi *slip system* antar butir. Ketidaksediaan energi yang cukup untuk melewati batas butir membuat dislokasi-dislokasi pergerakannya terhenti pada batas butir.

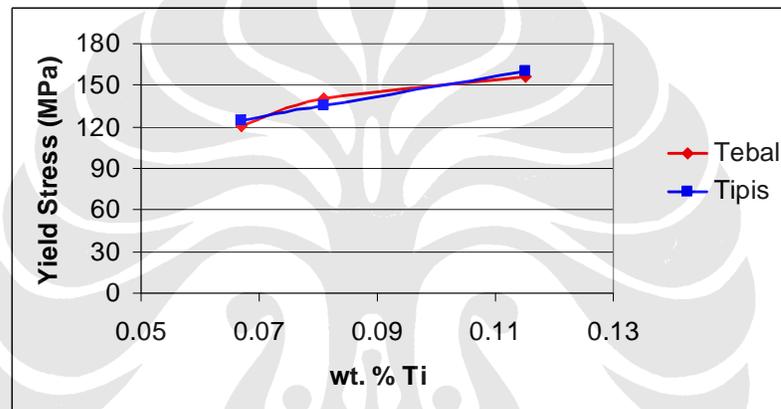


Gambar 4.7 Perbandingan nilai UTS sebelum dan sesudah penambahan 0.067, 0.081 dan 0.115 wt. % Ti.

Sesuai teori, terjadinya dislokasi yang tidak dapat bergerak ketika diberikan gaya luar akan meningkatkan sifat mekanis dari material tersebut, dalam hal ini adalah UTS. Selain itu, terdapat hubungan antara besar butir dengan nilai kekuatan tarik yang dilambangkan dengan persamaan Hall-Petch, yaitu :

$$\sigma_y = \sigma_0 + K_y d^{-1/2} \dots\dots\dots (4.1.)^{[14]}$$

dimana pada penelitian kali ini pun dipergunakan persamaan tersebut untuk mengetahui nilai σ_y dari dua sampel yang berbeda dimensinya. Perhitungan nilai σ_y dapat dilihat pada lembar lampiran. Hasil pengolahannya kemudian ditampilkan dalam bentuk diagram sesuai Gambar 4.8.

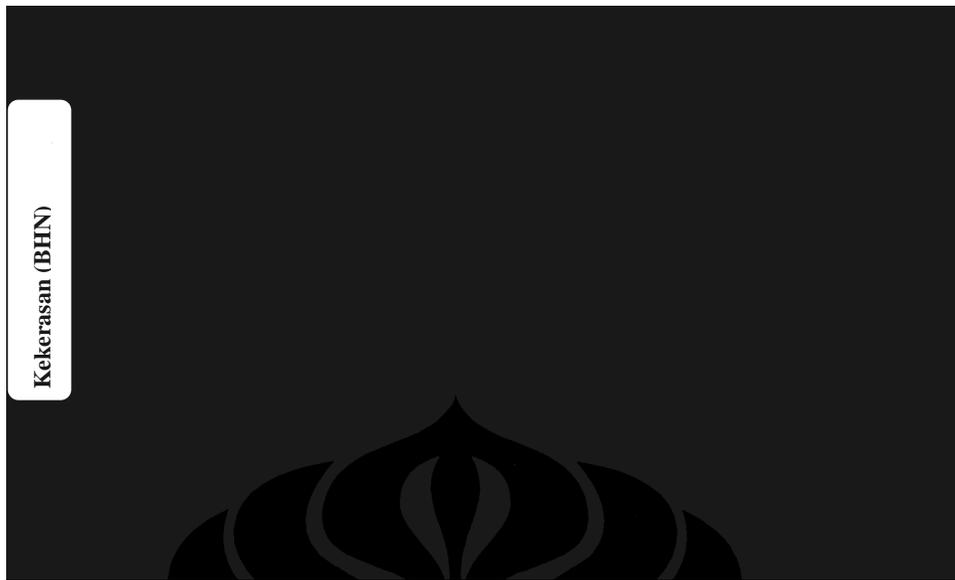


Gambar 4.8 Perbandingan *yield stress* pada sampel tebal dan tipis pada komposisi 0.067, 0.081 dan 0.115 wt. % Ti.

Selain UTS, nilai elongasi pun akan meningkat sesuai persamaan :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \dots\dots\dots (4.2)^{[14]}$$

Persamaan tersebut menjawab fenomena naiknya persentase elongasi pada penambahan Ti^[14].



Gambar 4.9 Perbandingan kekerasan pada sampel tebal dan tipis pada komposisi 0.067, 0.081 dan 0.115 wt. % Ti

Fenomena peningkatan nilai UTS akibat penambahan Ti juga dapat dikorelasikan dengan ukuran DAS yang dibahas pada sub bab 4.21. Selain meningkatkan nilai elongasi dan UTS, penambahan sejumlah wt. % Ti pada paduan AC4B juga meningkatkan nilai kekerasan paduan AC4B tersebut seperti tampak pada Gambar 4.8. Dari Gambar 4.8 tersebut, dapat dilihat bahwa nilai kekerasan dari paduan AC4B akan mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kadar Ti dalam paduan tersebut. Nilai kekerasan pada daerah tipis lebih tinggi daripada nilai kekerasan pada daerah tebal. Namun, perbedaan nilai tersebut tidak terlalu signifikan. Hal ini dikarenakan dimensi dari sampel tebal dan tipis yang juga tidak terlalu berbeda jauh. Pada perhitungan nilai kekerasan pada komposisi 0.067 wt. % Ti pada daerah tebal menghasilkan nilai 78.57 BHN atau 0.15 lebih besar dari nilai kekerasan pada komposisi yang sama untuk daerah tipis. Hal ini tidak sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa kecepatan pembekuan akan secara langsung mempengaruhi ukuran dari DAS sebagaimana yang diperlihatkan Tabel 4.3

Tabel 4.3 Perbandingan kecepatan pembekuan dengan DAS^[8]

Kecepatan Pembekuan (°C/s)	DAS (μm)
1	100-1000
10	50-500
100	30-70
1000	5-15

Seharusnya, sampel tipis akan memberikan nilai kekerasan yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan sampel tebal. Penyimpangan ini dimungkinkan oleh kesalahan pembacaan alat ukur pada mikroskop ukur yang digunakan. Jika ditinjau dari persentase peningkatan nilai kekerasan pada kedua daerah tersebut, maka persentase peningkatan nilai kekerasan pada daerah tipis seiring dengan bertambahnya wt. % Ti yang terdapat didalam paduan AC4B lebih tinggi dari daerah tebal. Hal ini mengindikasikan keefektifan dari penghalus butir terjadi pada daerah tipis. Fenomena ini terjadi dikarenakan luasnya area yang harus diisi oleh nuklean Al_3Ti pada daerah tebal. Jika kita mengambil penganalogian bahwa sejumlah nuklean Al_3Ti yang sama berada pada luas daerah yang berbeda, maka nuklean Al_3Ti akan lebih efektif berkerja pada daerah yang kurang luas dikarenakan pada daerah tersebut jarak antara nuklean lebih kecil sehingga membentuk butir yang lebih kecil daripada daerah yang lebih luas.

Selanjutnya, peningkatan nilai kekerasan seiring dengan penambahan kadar Ti pada paduan AC4B baik pada daerah tebal maupun daerah tipis telah sesuai dengan literatur yang mengatakan bahwa penambahan wt. % Ti akan meningkatkan sifat mekanis paduan termasuk di dalamnya nilai kekerasan karena nilai kekerasan akan berbanding lurus dengan nilai UTS. Mekanisme peningkatan nilai kekerasan dapat dianalogikan sama dengan mekanisme yang terjadi pada peningkatan nilai UTS.

4.2. Pengaruh Penambahan Ti Terhadap Struktur Mikro Paduan AC4B

4.2.1 Pengamatan Menggunakan Mikroskop Optik

Struktur mikro dari suatu paduan aluminium dipengaruhi oleh komposisi, kecepatan pembekuan, serta perlakuan panas yang diterima paduan tersebut. Pada penelitian kali ini yang menggunakan paduan Al-Si-Cu hipoeutektik, reaksi

pembekuan dimulai dari pembentukan jaringan dendritik α -Al diikuti oleh reaksi eutektik Al-Si dan diakhiri dengan pengendapan fasa kedua seperti Mg_2Si dan atau Al_2Cu ^[11]. Selain itu, juga terjadi pengendapan fasa intermetalik seperti Al_5FeSi yang terbentuk pada pembekuan dengan kecepatan lambat dan $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ yang terbentuk pada pembekuan dengan kecepatan cepat ^[11]. Oleh karena itu, seyogyanya paduan Al-Si hipoeutektik akan memiliki struktur mikro yang terdiri dari matriks α -Al, silikon primer atau kristal silikon yang tidak larut dalam fasa α -Al, fasa kedua seperti Mg_2Si dan atau Al_2Cu dan fasa intermetalik $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$.



Lihat Gambar 4.10 Chapter

4.2



Pada Gambar 4.10 memperlihatkan perbandingan mikrostruktur paduan Al-Si-Cu pada daerah tebal dan tipis dengan variasi komposisi Ti. Pengamatan mikrostruktur pada daerah tipis dan tebal memperlihatkan morfologi dari paduan Al hipoeutektik dimana terlihat jelas bentuk dendritik dari α -Al dan fasa kedua seperti Al_2Cu yang berbentuk agak sedikit besar dan bulat bila dibandingkan dengan fasa eutektik Al-Si dan fasa intermetalik $\text{Al}(\text{Fe},\text{Mn})\text{Si}$ yang berbentuk *flake* dan jarum. Penambahan Ti pada paduan Al-Si-Cu yang digunakan pada penelitian kali ini memperlihatkan perubahan morfologi dendritik α -Al lebih kecil namun berbentuk *round (cellular)*. Selain itu, penyebaran fasa intermetalik $\text{Al}(\text{Fe},\text{Mn})\text{Si}$ juga akan terdispersi merata. Fasa intermetalik tersebut seiring dengan meningkatnya Ti akan mengisi ruang-ruang interdendritik. Efek lainnya yaitu terjadinya morfologi α -Al menjadi bentuk *mixed cellular-equiaxial dendritic*. Hal ini juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Lozano dan Pena^[23].

Pengukuran nilai DAS yang dilakukan pada 7 titik antar lengan dendrit baik pada daerah tebal maupun daerah tipis memperlihatkan penurunan nilai (Lihat Lampiran 4). Hal ini bisa dilihat dari Gambar 4.12.



Gambar 4.11. Perbandingan nilai DAS pada sampel tebal dan tipis dengan penambahan sejumlah wt. % Ti.

Penurunan nilai DAS terlihat lebih efektif terjadi pada daerah tipis. Penjelarasannya sebagaimana yang telah dibahas pada sub bab sebelumnya. Hal ini juga sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa ukuran DAS dipengaruhi oleh waktu dan kecepatan pembekuan dalam hal ini, sampel tipis mengalami waktu pembekuan yang lebih cepat daripada daerah tebal. Nilai DAS yang lebih kecil mengindikasikan bahwa material tersebut mempunyai butir yang halus dan kecil sehingga secara langsung meningkatkan sifat mekanis dari paduan aluminium tersebut antara lain UTS, *ductility* dan elongasi, kekerasan serta mempersingkat waktu homogenisasi pada waktu dilakukan pengerjaan panas (*heat treatment*)^[24].

4.2.2 Pengamatan SEM dan EDS

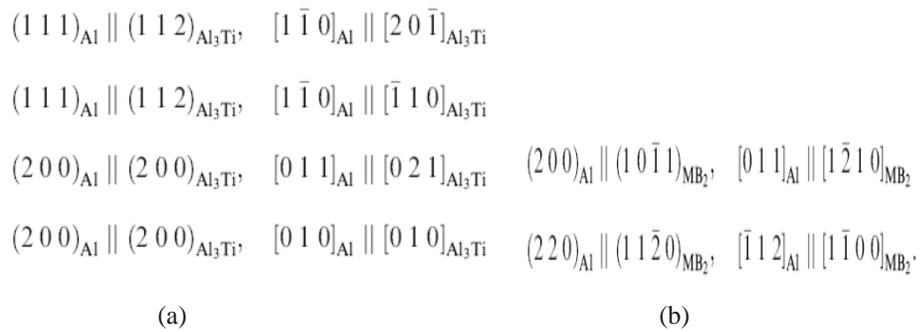
Pengamatan SEM dan EDS yang dilakukan menggunakan *Back Scattered Electron* (BSE) memperlihatkan hasil sesuai Gambar 4.12 sampai dengan Gambar 4.17 untuk setiap komposisi dari dua daerah yang berbeda. Pengamatan dengan menggunakan SEM dan EDS dilakukan untuk mengkonfirmasi ulang atas gambaran yang telah dilihat sebelumnya pada pengamatan dengan menggunakan mikroskop optik. Selain itu, jika penelitian yang dilakukan ini telah sesuai dengan teori, maka seharusnya nanti akan terlihat fasa Al_3Ti yang merupakan nuklean yang berperan sewaktu pembekuan terjadi^{[3][8][12]}.

Pada pengamatan SEM terhadap paduan AC4B pada semua sampel didapati 1 dari 6 sampel yang mempunyai kandungan Ti yang terdeteksi oleh menggunakan EDS. Hasil analisa EDAX pada Tabel 4.4 sampai dengan Tabel 4.8 mengindikasikan terbentuknya fasa kristal silikon, $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$, matriks kaya Al dan Al_2Cu dan Mg_2Si . Hal ini sesuai dengan literatur^{[8][14]} yang menyatakan bahwa pada paduan hipoeutektik, terdapat tiga tahap pembentukan fasa, yaitu pembentukan jaringan dendritik $\alpha-Al$, 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 %^[12]. Oleh karena itu,

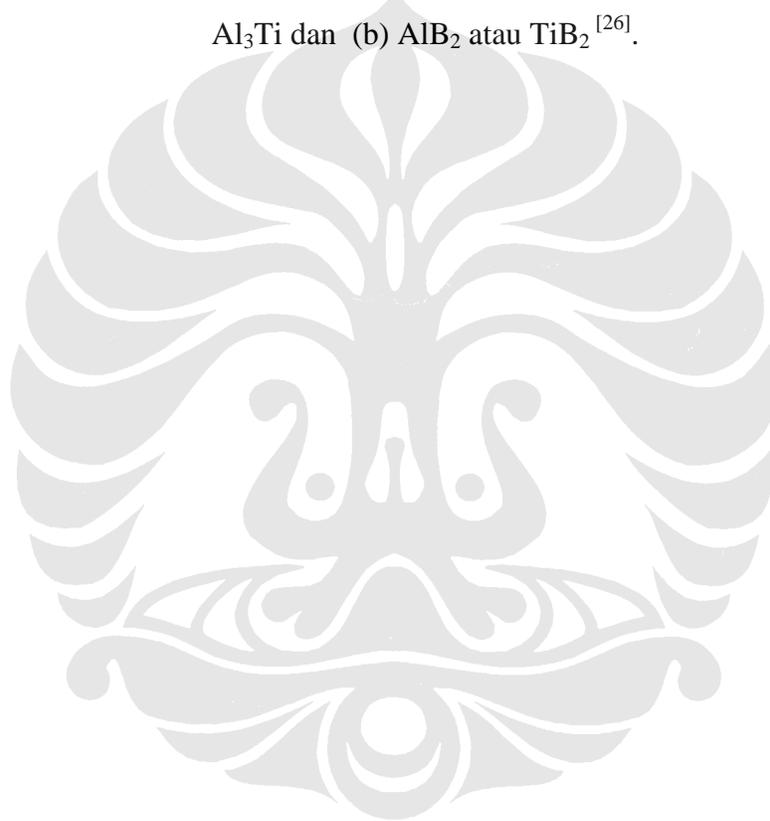
sisanya membentuk silikon bebas dalam bentuk kristal silikon sedangkan fasa Al_2Cu umumnya memiliki bentuk yang bulat atau *irregular*^[8]

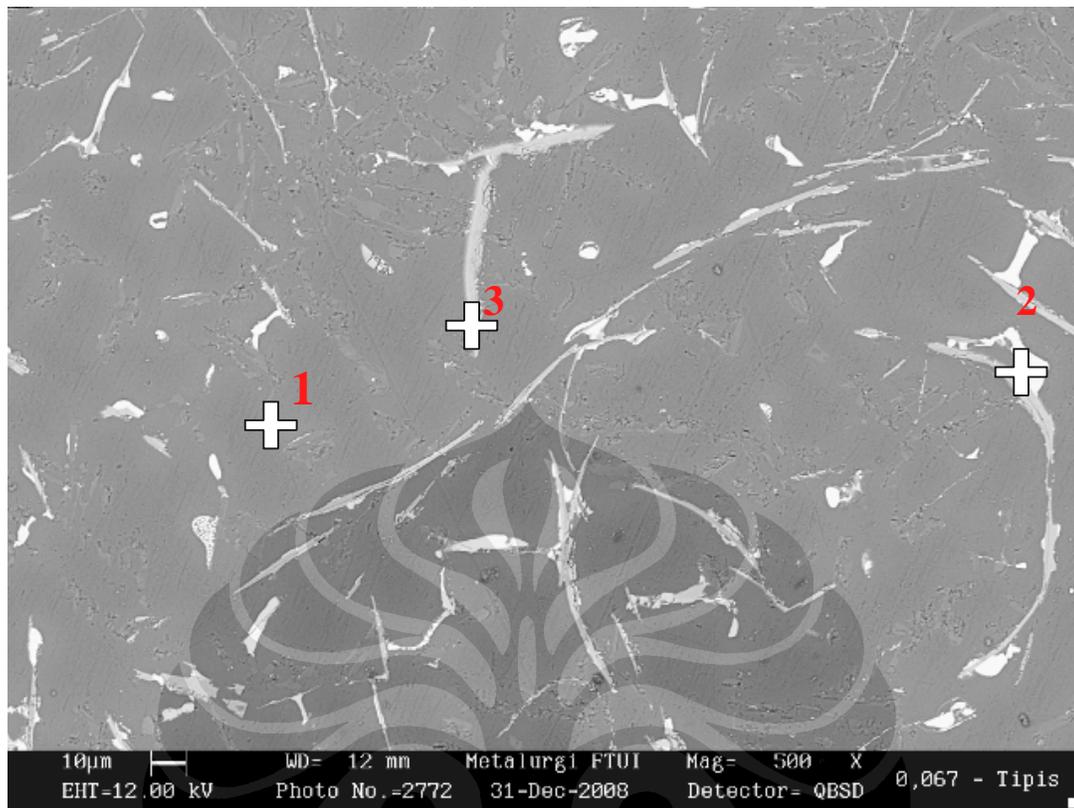
Dari pengamatan yang telah dilakukan, didapat hasil bahwa fasa Al_3Ti terdapat hampir diseluruh sampel, baik daerah tebal maupun tipis. Fasa tersebut ditemukan saling berhimpitan dengan fasa AlSi , Al_2Cu dan kadang kala fasa intermetalik $\text{Al}(\text{Fe},\text{Mn})\text{Si}$. Hal ini sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa fasa Al_3Ti akan menjadi nuklean dan awal pertumbuhan bagi fasa-fasa lainnya seperti fasa eutektik AlSi ^{[3][12]}. Limmaneevichitr^[25] menemukan fasa Al_3Ti yang menempel pada fasa silikon eutektik. Dari pengamatan SEM juga ditemukan fakta bahwa morfologi dari fasa intermetalik $\text{Al}(\text{Fe},\text{Mn})\text{Si}$ akan berubah dari bentuk panjang tipis seperti *flake* menjadi bentuk *Chinese Script*. Kecepatan pembekuan yang tinggi akan menyebabkan pertumbuhan struktur jarum Al_5FeSi menjadi tertahan dan memicu terbentuknya fasa $\text{Al}_3(\text{Fe},\text{Mn})\text{Si}_2$. Semakin tinggi kecepatan pembekuan maka akan mendorong perubahan struktur β $\text{Al}_3(\text{Fe},\text{Mn})\text{Si}_2$ yang berbentuk jarum menjadi α $\text{Al}_3(\text{Fe},\text{Mn})\text{Si}_2$ yang berbentuk *chinese script*^[25]. Hal ini mengindikasikan bahwa morfologi tersebut juga turut meningkatkan sifat mekanis dari paduan karena tidak terjadi pengkonsentrasian tegangan hanya pada satu titik.

Namun, pengamatan dengan SEM tidak menemukan adanya unsur boron (B). Seharusnya unsur tersebut terdeteksi oleh SEM karena *grain refiner* yang digunakan mengandung unsur boron walau hanya 1 %. Akan tetapi, menurut teori peritektik yang dikemukakan oleh Guzowski dan dilakukan penelitian kembali oleh Taylor^[26], hal ini memang benar adanya karena berdasarkan permodelan menggunakan *edge-to-edge matching model* sesuai *crystallographic*, fasa Al_3Ti akan lebih mudah terbentuk dan menjadi nuklean karena kesesuaian kisi-kisi kristal yang lebih banyak dengan kristal aluminium yakni terdapat 4 kesesuaian kisi kristal Al_3Ti dengan kisi kristal Al dibandingkan dengan kesesuaian kisi kristal TiB_2 atau AlB_2 dengan kisi kristal aluminium yang hanya 2.



Gambar 4.12 Kesesuaian antara kisi kristal aluminium dengan (a) kisi kristal Al_3Ti dan (b) AlB_2 atau TiB_2 ^[26].

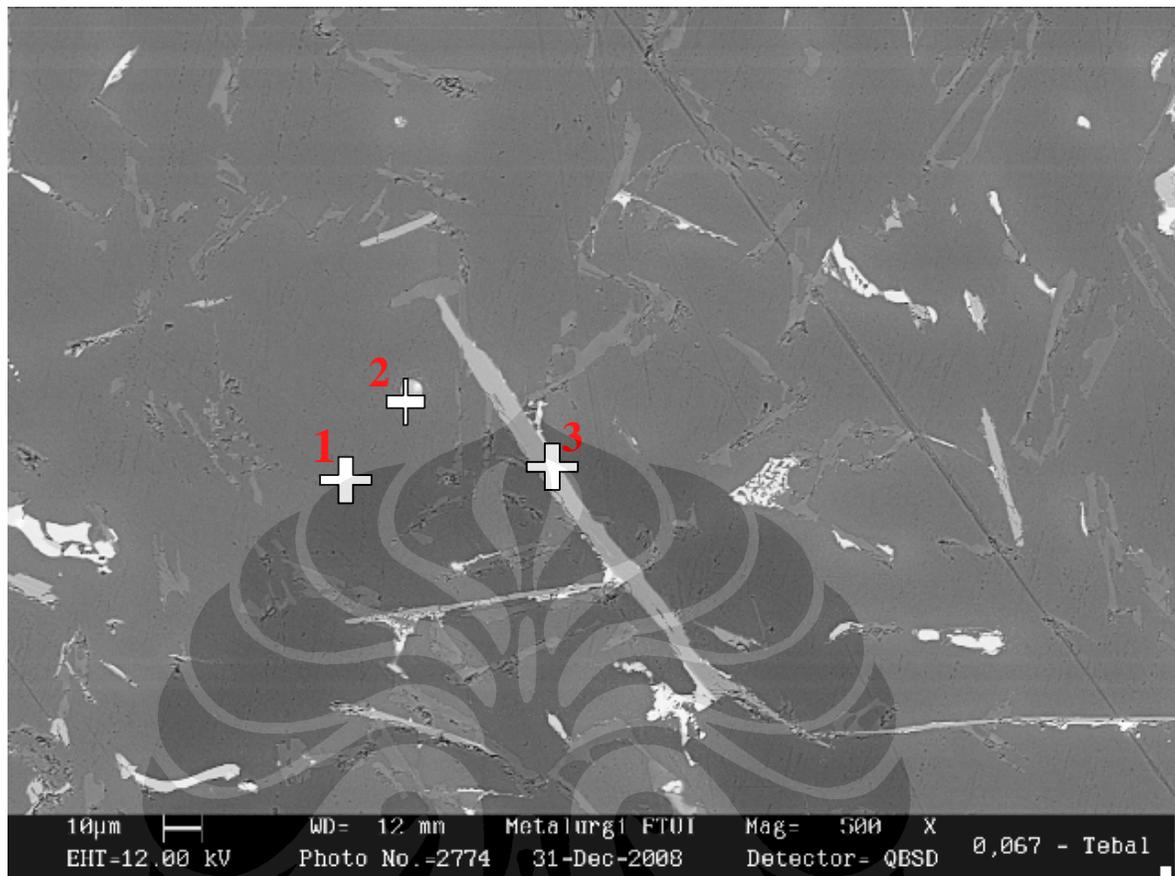




Gambar 4.13. Hasil pengujian SEM dengan penambahan 0.067 wt. % Ti, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX pada daerah tipis.

Tabel 4.4. Komposisi mikro hasil analisa SEM / EDAX titik titik pada Gambar 4.13 pada paduan AC4B dengan penambahan 0.067 wt. % Ti daerah tipis.

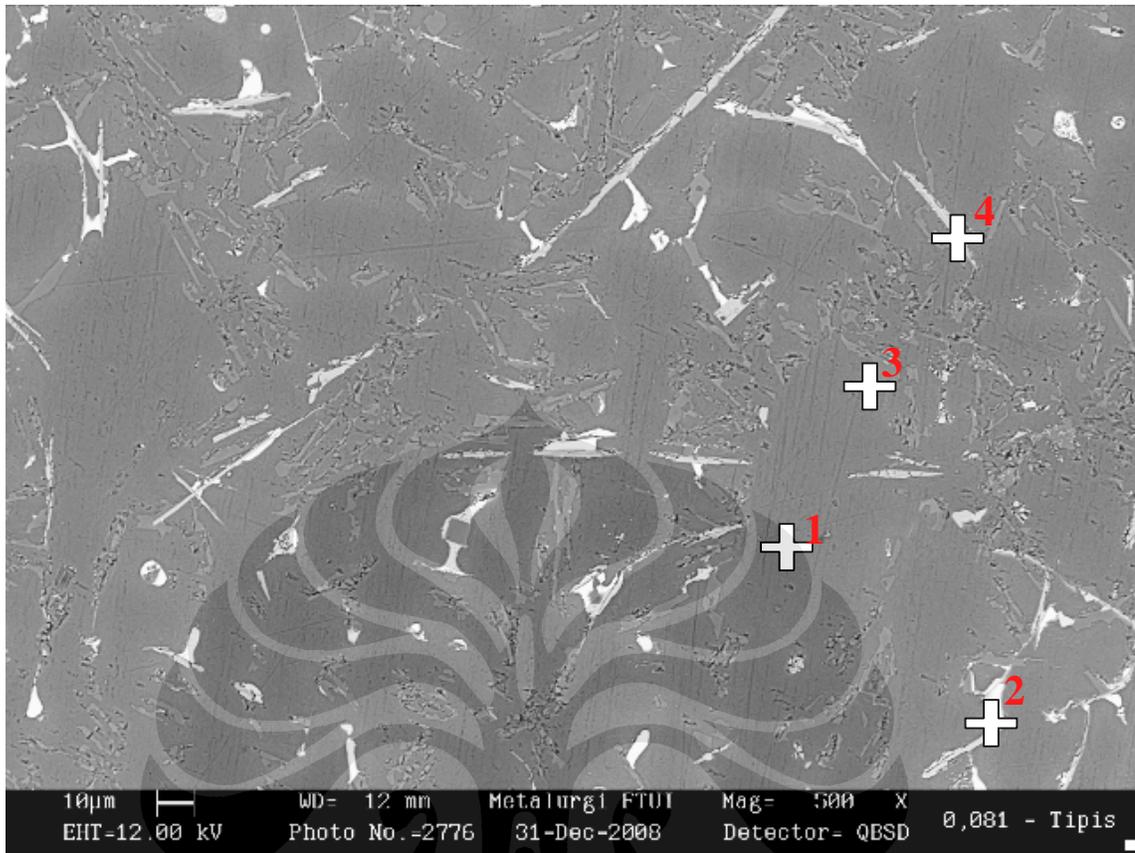
No	Komposisi (% berat)						Warna	Fasa yang mungkin terbentuk
	Si	Cu	Fe	Mn	Ti	Al		
1	2.06	-	-	-	-	Sisa	Abu – abu	Matriks Al
2	0.70	44.46	-	-	-	Sisa	Abu – abu muda	Al ₂ Cu
3	5.02	2.56	2.98	0.61	-	Sisa	Abu-abu muda	Intermetalik Al(Fe,Mn)Si



Gambar 4.14. Hasil pengujian SEM dengan penambahan 0.067 wt. % Ti, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX pada daerah tebal.

Tabel 4.5. Komposisi mikro hasil analisa SEM / EDAX titik titik pada Gambar 4.14 pada paduan AC4B dengan penambahan 0.067 wt. % Ti daerah tebal.

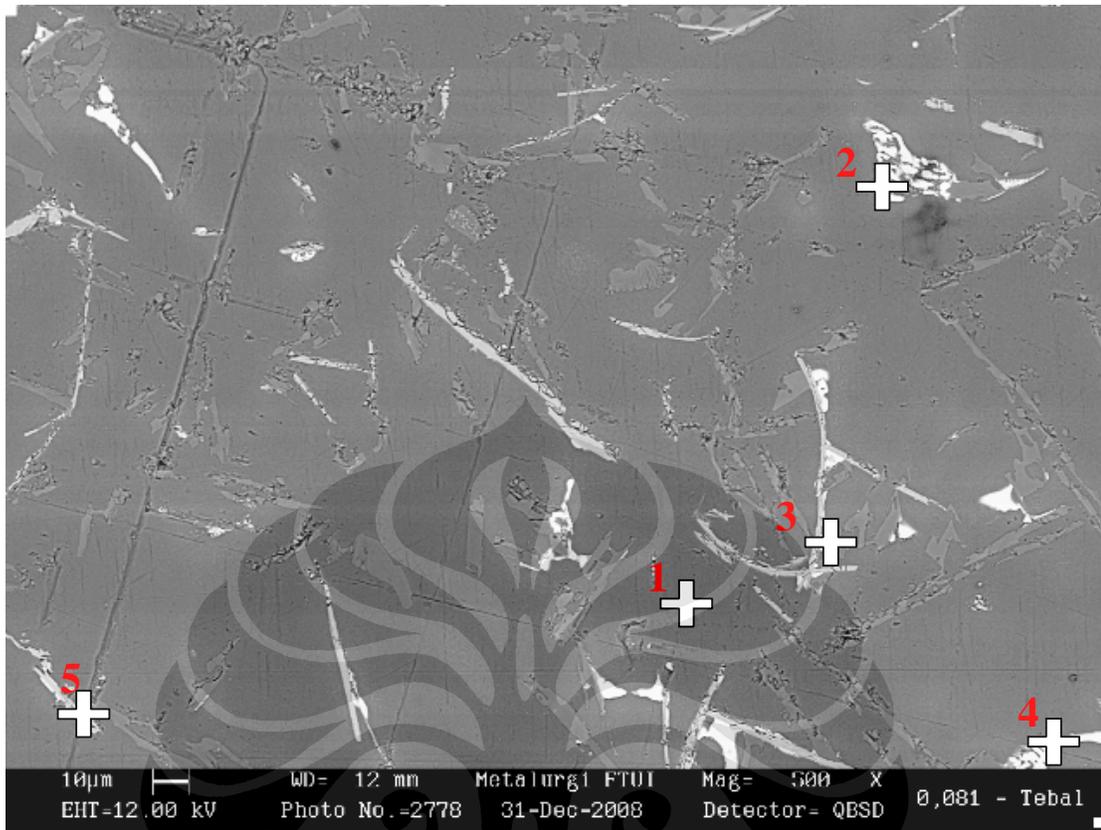
No	Komposisi (% berat)						Warna	Fasa yang mungkin terbentuk
	Si	Cu	Fe	Mn	Ti	Al		
1	1.78	2.02	-	-	-	Sisa	Abu – abu	Matriks Al
2	1.95	3.12	-	-	-	Sisa	Putih	Al ₂ Cu
3	11.72	-	14.72	3.86	-	Sisa	Abu-abu muda	Intermetalik Al ₁₅ (Fe,Mn) ₂ Si



Gambar 4.15. Hasil pengujian SEM dengan penambahan 0.081 wt. % Ti, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX pada daerah tipis.

Tabel 4.6. Komposisi mikro hasil analisa SEM / EDAX titik titik pada Gambar 4.15 pada paduan AC4B dengan penambahan 0.081 wt. % Ti daerah tipis.

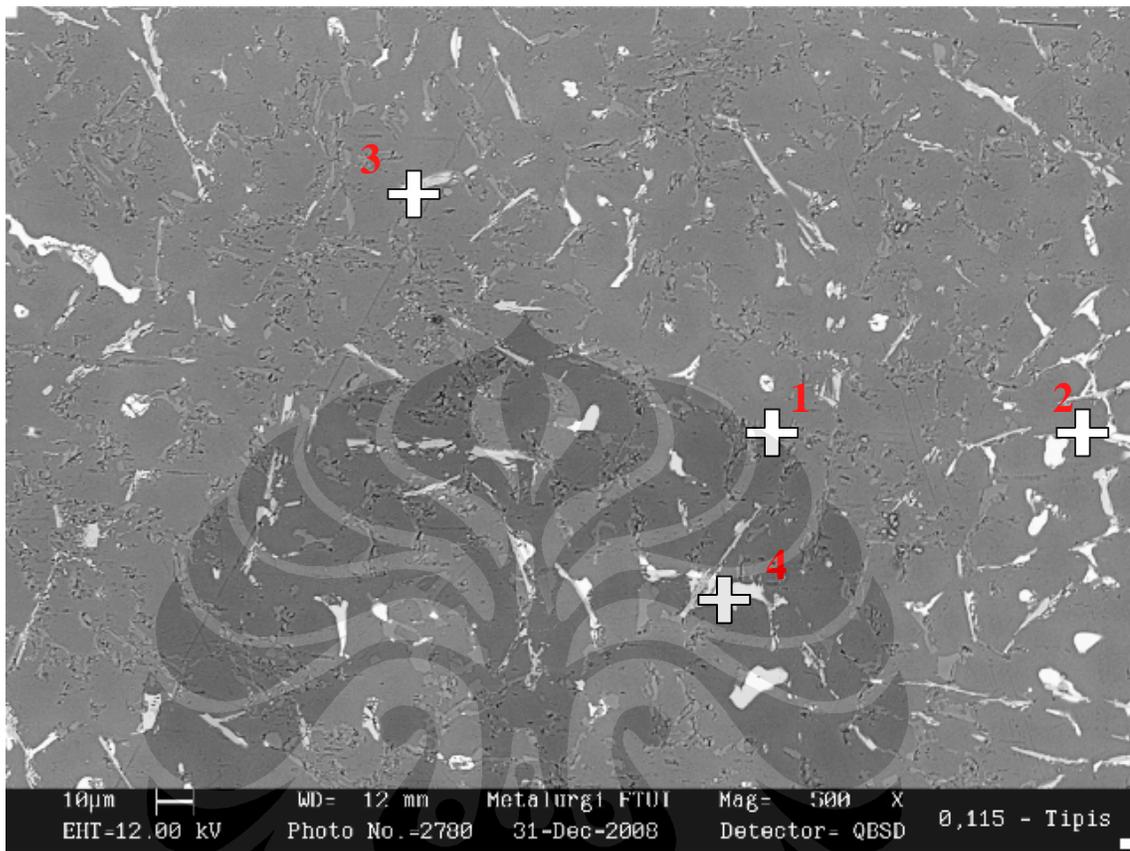
No	Komposisi (% berat)						Warna	Fasa yang mungkin terbentuk
	Si	Cu	Fe	Mn	Ti	Al		
1	1.81	-	-	-	-	Sisa	Abu – abu	Matriks Al
2	79.83	-	-	-	-	Sisa	Abu – abu terang	Silikon primer
3	0.95	3.20	-	-	-	Sisa	Abu-abu tua	Al ₂ Cu, AlSi
4	61.92	-	-	-	-	Sisa	Abu – abu muda	AlSi



Gambar 4.16. Hasil pengujian SEM dengan penambahan 0.081wt. % Ti, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX pada daerah tebal.

Tabel 4.7. Komposisi mikro hasil analisa SEM / EDAX titik titik pada Gambar 4.16 pada paduan AC4B dengan penambahan 0.081 wt. % Ti daerah tebal.

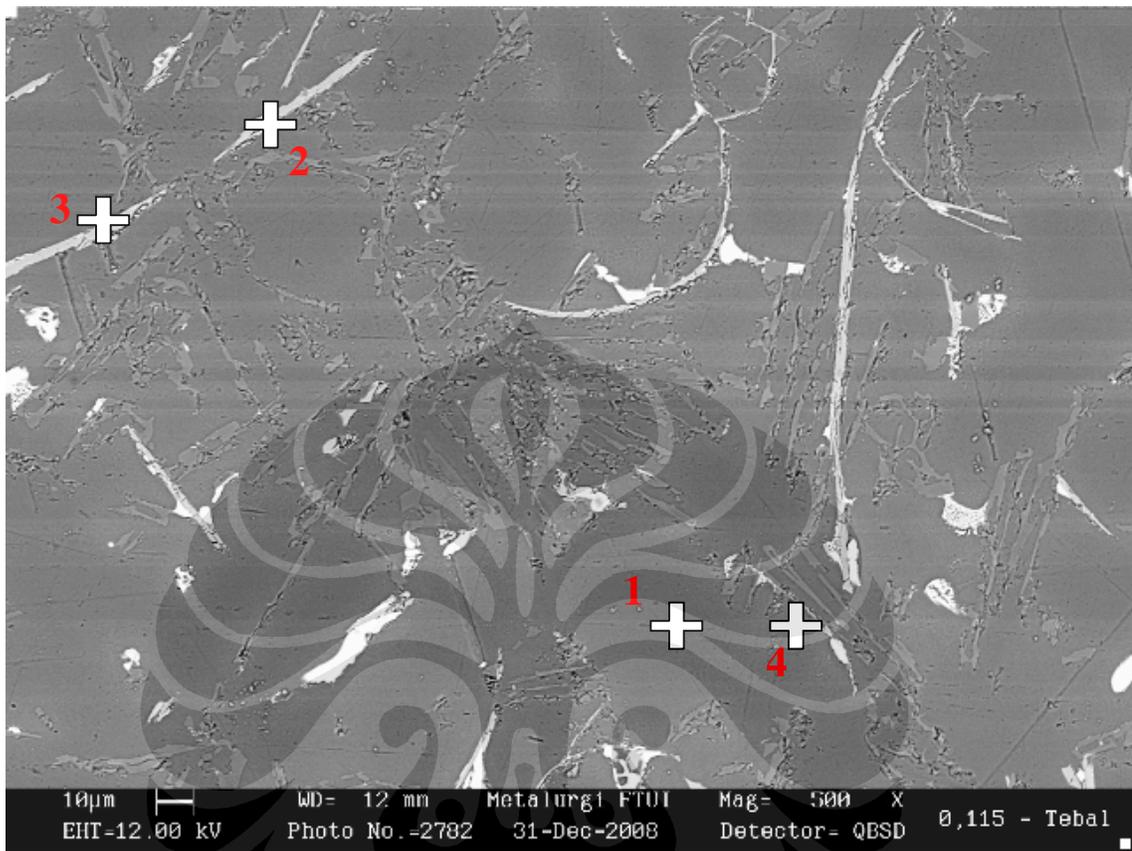
No	Komposisi (% berat)						Warna	Fasa yang mungkin terbentuk
	Si	Cu	Fe	Mn	Ti	Al		
1	1.84	-	-	-	-	Sisa	Abu – abu	Matriks Al
2	3.13	14.82	-	-	-	Sisa	Putih	Al ₂ Cu
3	78.12	-	-	-	-	Sisa	Abu-abu gelap/tua	Silikon Primer
4	5.76	11.62	-	-	-	Sisa	Putih	AlSi
5	13.41	8.23	7.79	-	0.43	Sisa	Abu-abu muda	TiAl ₃ , Intermetalik AlFeSi



Gambar 4.17. Hasil pengujian SEM dengan penambahan 0.115 wt. % Ti, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX pada daerah tipis.

Tabel 4.8. Komposisi mikro hasil analisa SEM / EDAX titik titik pada Gambar 4.17 pada paduan AC4B dengan penambahan 0.115 wt. % Ti daerah tipis.

No	Komposisi (% berat)						Warna	Fasa yang mungkin terbentuk
	Si	Cu	Fe	Mg	Ti	Al		
1	1.57	-	-	-	-	Sisa	Abu – abu	Matriks Al
2	2.04	29.05	0.56	0.82	-	Sisa	Putih	AlSi, Al ₂ Cu, Mg ₂ Si
3	16.28	-	12.56	-	-	Sisa	Abu-abu	Intermetalik AlFeSi
4	2.21	42.06	-	-	-	Sisa	Putih	Al ₂ Cu



Gambar 4.18. Hasil pengujian SEM dengan penambahan 0.115 wt. % Ti, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX pada daerah tebal.

Tabel 4.9. Komposisi mikro hasil analisa SEM / EDAX titik titik pada Gambar 4.18 pada paduan AC4B dengan penambahan 0.115 wt. % Ti daerah tebal.

No	Komposisi (% berat)						Warna	Fasa yang mungkin terbentuk
	Si	Cu	Fe	Mn	Ti	Al		
1	1.77	-	-	-	-	Sisa	Abu – abu	Matriks Al
2	2.41	5.75	-	-	-	Sisa	Putih	Al ₂ Cu
3	12.49	-	14.23	3.54	-	Sisa	Abu-abu muda	Intermetalik Al ₁₅ (Fe,Mn) ₂ Si
4	65.59	-	-	-	-	Sisa	Abu-abu gelap	Silikon Primer

4.3. Analisa Tingkat Kegagalan Pada Komponen *Cylinder Head* dengan Variasi Penambahan Titanium

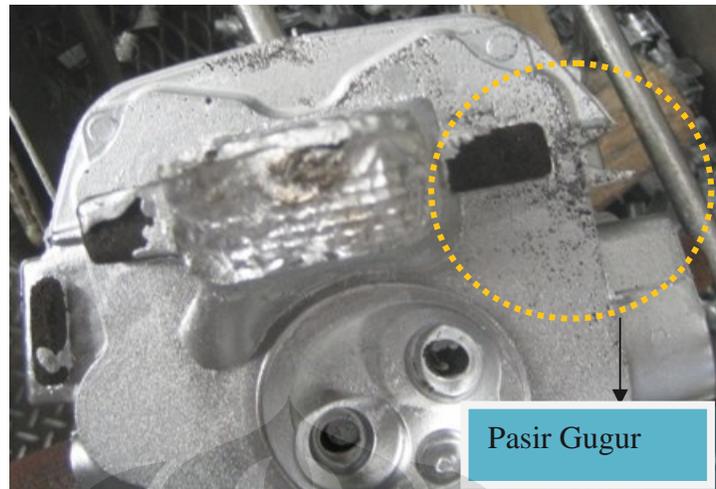
Komponen yang digunakan pada penelitian kali ini adalah *cylinder head* yang diproduksi oleh PT. Astra Honda Motor. Diketahui bahwa menurut data yang dimiliki oleh PT. Astra Honda Motor, komponen ini memiliki tingkat kegagalan yang cukup tinggi yang disebabkan oleh kebocoran. Kebocoran yang dimaksud merupakan jenis kegagalan yang disebut dengan porositas dalam bahasa ilmiahnya. Sebagaimana yang telah dibahas pada sub bab sebelumnya, jenis porositas itu sendiri terdiri dari porositas yang disebabkan oleh gas dan porositas yang disebabkan oleh terciptanya *shrinkage* pada daerah interdendritik dari aluminium tersebut.

Jenis porositas yang disebabkan oleh gas merupakan jenis porositas yang tercipta dikarenakan interaksi aluminium dengan gas hidrogen karena hidrogen merupakan satu-satunya gas yang dapat larut dalam aluminium^[8]. Porositas jenis ini dapat dihilangkan dengan melakukan metode *degassing* yaitu metode yang menggunakan prinsip pengeluaran gas hidrogen menggunakan suatu unsur ataupun senyawa, baik secara penggunaan *tablet degasser* ataupun menggunakan metode GBF dengan penginjeksian gas *inert* (Ar) seperti yang digunakan pada plant LPDC PT. Astra Honda Motor. Sedangkan jenis *shrinkage porosity* merupakan jenis porositas yang lebih disebabkan oleh sifat alami aluminium dimana aluminium sangat mudah untuk mengalami penyusutan (*shrinkage*) dengan tingkat penyusutan yang terjadi rata-rata 6 %^[12].

Pengujian kebocoran yang dilakukan di plant HPDC PT. Astra Honda motor menggunakan 60 *cylinder head* dari setiap penambahan wt. % Ti. Hal ini dikarenakan standar *Quality Control* (QC) yang dimiliki oleh PT. Astra Honda Motor mengharuskan setiap *cylinder head* yang diuji kebocoran minimal jumlahnya adalah 60 buah dan pengujian kebocoran yang dilakukan meliputi pengujian kebocoran dan kebocoran emisi.

Dari percobaan penambahan titanium pada paduan AC4B, pada penambahan 0.067 wt. % Ti tingkat kegagalannya adalah sebesar 4.76 % sedangkan pada penambahan 0.081 wt. % Ti tingkat kegagalannya naik menjadi 6.78 % . Hal ini

bertentangan dengan teori yang menyatakan bahwa seiring dengan bertambahnya wt. % Ti akan meminimalkan terjadi porositas yang terakumulasi membentuk suatu lubang (bocor). Seharusnya sejalan dengan penambahan wt. % Ti, maka akan memicu DAS yang lebih kecil sehingga daerah interdendritik akan menjadi lebih kecil dan mengecilkan kemungkinan terjadi *shrinkage porosity* ^[16]. Kemungkinan penyimpangan ini terjadi dikarenakan faktor-faktor luas seperti penggunaan *dies* dan hal-hal teknis lainnya. Perlu diketahui bahwa dalam penelitian kali ini, *dies* LPDC yang digunakan adalah dies no. 39 dan no. 40 yang menurut catatan PT. Astra Honda Motor merupakan dies yang memiliki tingkat kebocoran dan kebocoran emisi yang tinggi (per 28 Juli 2008) yaitu sebesar 1.5 % dan 2.49 %. Dalam praktiknya pun, terjadi beberapa kali kesalahan yang disebabkan oleh *dies* terutama *dies* seret (kurang *coating*) dan kebocoran pada saluran masuk menuju *dies*. Jika dilihat dari temperatur dies ataupun temperatur logam cair, kedua parameter tersebut masih termasuk dalam standar yang digunakan. Selain itu, terjadinya kenaikan pada kadar Fe yang terkandung pada paduan AC4B yang digunakan juga memicu terjadinya *shrinkage porosity*. Pengujian kebocoran yang dilakukan pada penambahan 0.115 wt. % sebenarnya dilakukan pada penambahan 0.114 wt. % Ti yang juga dilakukan. Penyebab tidak dilakukannya pengolahan data menggunakan data hasil penambahan 0.115 wt. % Ti dikarenakan pada pengujian kebocorannya menghasilkan tingkat kebocoran yang lebih banyak dibandingkan dengan penambahan sebelumnya. Sesuai dengan konsep statistik, data tersebut tidak bisa digunakan karena akan merusak distribusi normalnya. Oleh karena itu, untuk data pengujian kebocoran 0.115 wt. % Ti digunakan data pengujian kebocoran 0.114 wt. % Ti. Dari hasil pengolahan, didapatkan bahwa penambahan 0.114 wt. % Ti menurunkan tingkat kebocoran menjadi 0 %. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan penghalus butir 0.114 wt. % Ti efektif untuk mengurangi *shrinkage* pada *cylinder head* dan bahwa data yang diperoleh telah sesuai dengan teori yang didapatkan ^[16]. Selain itu, pada penelitian kali ini juga banyak terjadi kegagalan yang disebabkan oleh *misrun* dan kegagalan lainnya seperti pasir gugur.



Gambar 4.19. Kegagalan pada cylinder head yang disebabkan oleh pasir gugur.

