

BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 ANALISA KOMPOSISI PADUAN ALUMINIUM AC4B *AS-CAST*

Hasil analisa komposisi paduan aluminium AC4B *as-cast* yang diberi penghalus butir Al-5Ti-1B ditampilkan pada Tabel 4.1. Pada tabel tersebut diperlihatkan bahwa untuk mendapatkan paduan aluminium AC4B dengan 0.08 wt. % Ti, diperoleh komposisi aktual Ti sebesar 0.081 wt. %. Meskipun terjadi penyimpangan 0.001 wt. %, hasil ini sudah sesuai dengan target yang ingin dicapai. Sehingga, untuk lebih mempertajam hasil dan analisa, pembahasan komposisi Ti yang digunakan dalam penelitian ini akan mengacu pada nilai Ti sebesar 0.081 wt. %.

Tabel 4.1 Komposisi aktual paduan aluminium AC4B pada *holding furnace* sebelum proses LPDC untuk mendapatkan paduan aluminium AC4B dengan komposisi 0,08 wt. % Ti dan 0,1 wt. % Ti.

Unsur	Komposisi aktual paduan aluminium AC4B + 0.08 wt. % Ti	Komposisi aktual paduan aluminium AC4B + 0.1 wt. % Ti	Komposisi standar
Si	9.00 wt. %	8.73 wt. %	7 – 10 wt. %
Cu	2.92 wt. %	3.10 wt. %	2 – 4 wt. %
Mg	0.25 wt. %	0.23 wt. %	0.50 wt. % maks
Zn	0.56 wt. %	0.45 wt. %	1.00 wt. % maks
Fe	0.46 wt. %	0.51 wt. %	1.00 wt. % maks
Mn	0.24 wt. %	0.23 wt. %	0.50 wt. % maks
Ni	0.10 wt. %	0.09 wt. %	0.35 wt. % maks
Ti	0.081 wt. %	0.115 wt. %	0.20 wt. % maks
Pb	0.06 wt. %	0.07 wt. %	0.20 wt. % maks
Sn	0.02 wt. %	0.04 wt. %	0.10 wt. % maks
Cr	0.02 wt. %	0.02 wt. %	0.20 wt. % maks
Al	Sisa	Sisa	Sisa

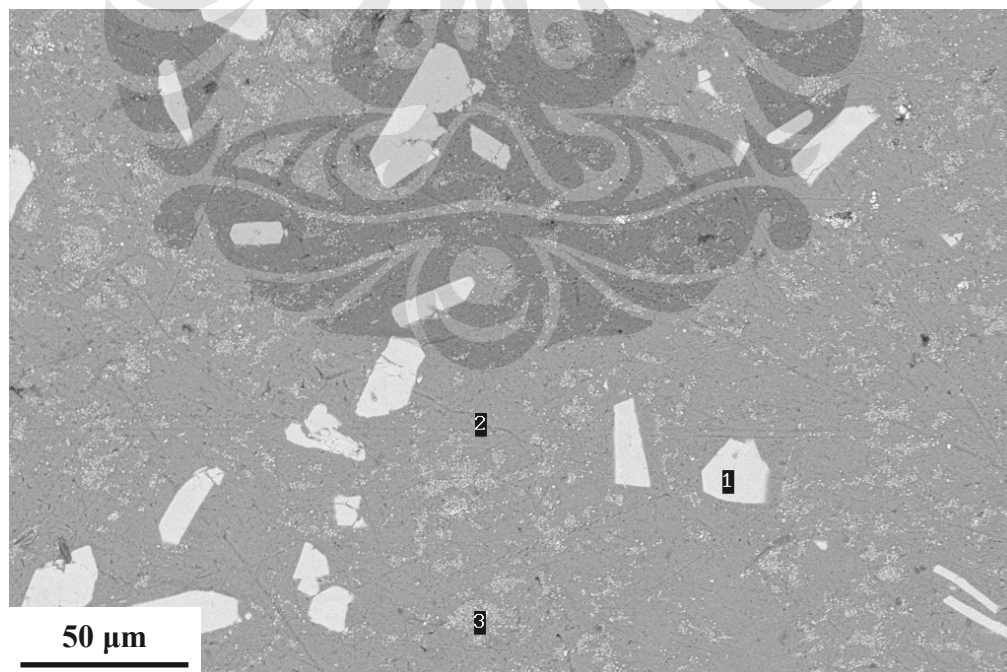
Pada paduan aluminium AC4B yang ditambahkan 0.1 wt. % Ti, diperoleh komposisi aktual sebesar 0.115 wt. % Ti. Hasil ini memperlihatkan adanya 0.015 wt. % Ti yang melebihi komposisi target yang ingin dicapai. Adanya kandungan titanium yang melebihi target yang ingin dicapai dapat disebabkan karena tingginya kandungan titanium yang ada pada bahan baku paduan aluminium AC4B. Sebab, komposisi standar titanium yang terdapat pada bahan baku paduan aluminium AC4B (seperti terlihat pada Tabel 4.1) adalah 0.2

wt. % Ti. Selanjutnya, untuk lebih mempertajam hasil dan analisa, maka pembahasan komposisi Ti yang digunakan dalam penelitian ini akan mengacu pada nilai Ti sebesar 0.115 wt. %.

Untuk unsur-unsur paduan lain selain Ti, seperti terlihat pada Tabel 4.1, hasilnya sudah sesuai dengan komposisi standar. Komposisi standar yang ingin dicapai untuk paduan-paduan lain selain Ti pada penelitian ini disesuaikan dengan standar yang ditetapkan oleh PT. AHM. Dengan komposisi tersebut, maka dapat dikatakan bahwa penelitian ini telah memenuhi standar komposisi paduan aluminium AC4B yang benar.

4.2 PENGAMATAN SEM DAN EDAX PENGHALUS BUTIR Al-5Ti-1B

Struktur mikro penghalus butir Al-5Ti-1B yang dilakukan dengan perbesaran $500\times$ ditunjukkan pada Gambar 4.1. Pada gambar tersebut terlihat adanya fasa berbentuk balok dan berwarna putih. Selain itu terdapat pula matriks berwarna abu-abu serta titik-titik putih pada matriks. Kandungan unsur-unsur pada tiap titik yang ditembak dengan EDAX ditabulasikan pada Tabel 4.2.

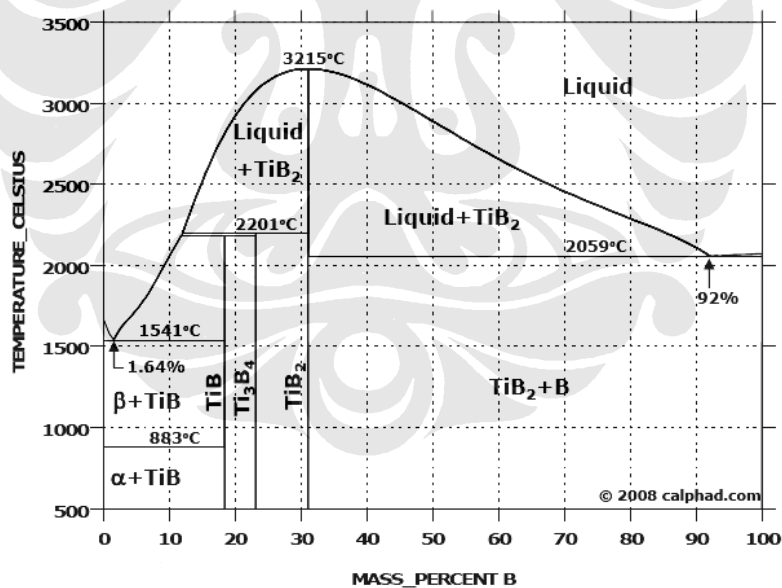


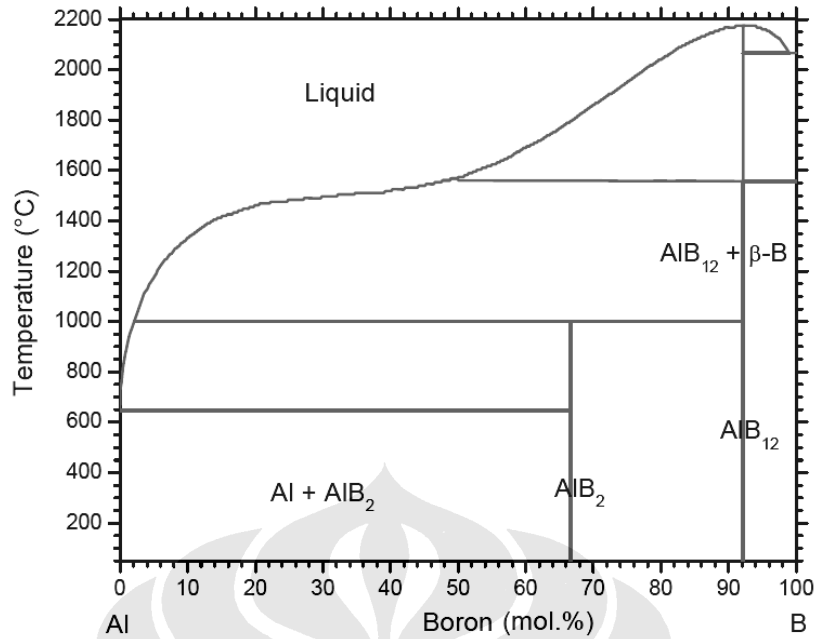
Gambar 4.1 Struktur mikro penghalus butir Al-5Ti-1B hasil pengamatan SEM

Tabel 4.2 Kandungan unsur pada titik-titik pada penghalus butir Al-5Ti-1B hasil pengujian EDAX

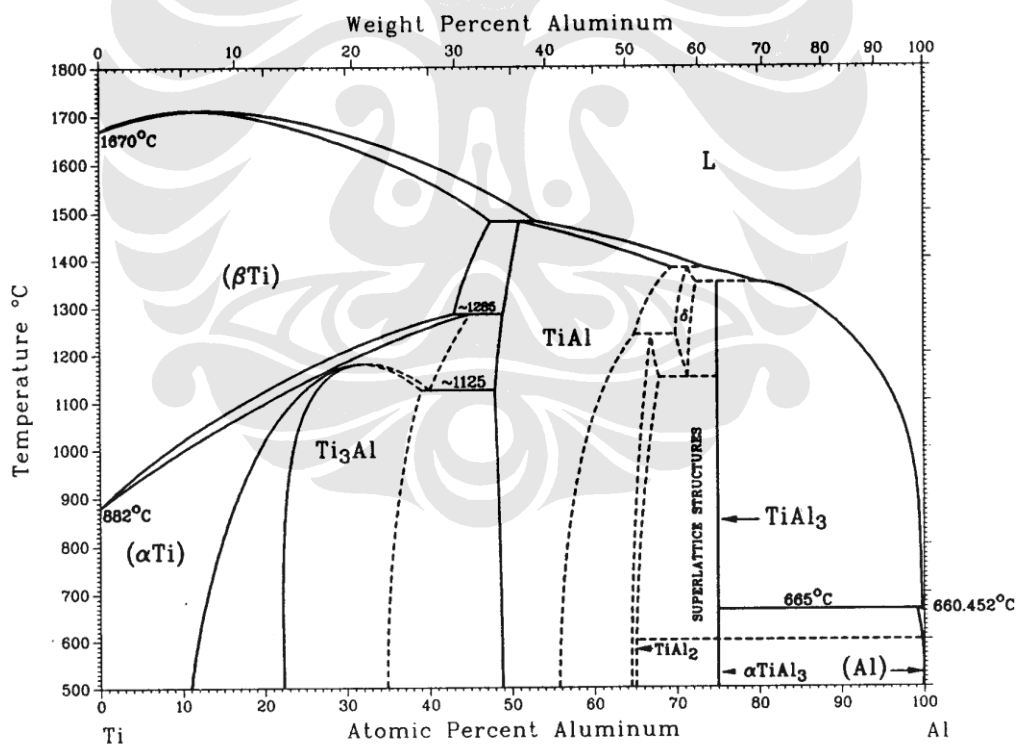
No. Titik	Unsur (wt. %)			Warna	Fasa
	Al	Ti	B		
1	25.62	20.47	53.91	putih	TiB ₂
2	36.43	0.34	63.23	abu-abu	AlB ₂
3	33.24	9.66	57.10	putih	Al B ₂ dan TiB ₂

Analisa komposisi mikro yang dilakukan pada penghalus butir Al-5Ti-1B dalam penelitian ini memperlihatkan hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2. Pada tabel tersebut terlihat bahwa pada titik 1 kandungan boron mencapai 53.91 wt. %, pada titik 2 sebesar 63.23 wt. %, dan pada titik 3 sebesar 57.10 wt. %. Hasil ini memperlihatkan bahwa kandungan boron yang terdapat pada penghalus butir Al-5Ti-1B yang digunakan jumlahnya cukup besar pada semua fasa. Untuk dapat mengetahui fasa pada titik 1, titik 2, dan titik 3, maka pembahasan perlu mengacu pada diagram fasa hasil kombinasi dari unsur Al, Ti dan B.

**Gambar 4.2** Diagram fasa Ti-B^[33]



Gambar 4.3 Diagram fasa Al-B^[34]

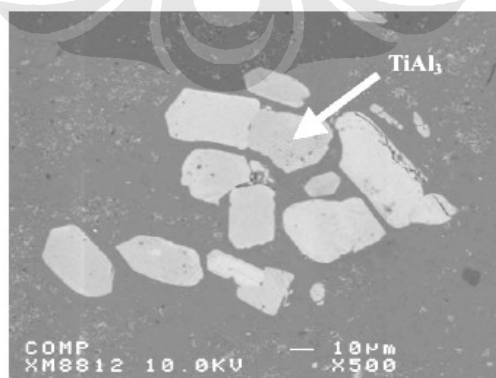


Gambar 4.4 Diagram fasa Al-Ti^[35]

Diagram fasa Ti-B, Al-B dan Al-Ti diperlihatkan pada Gambar 4.2, Gambar 4.3 dan Gambar 4.4. Pada ketiga diagram fasa tersebut ditunjukkan fasa-

fasa yang mungkin ada pada penghalus butir Al-5Ti-1B. Fasa-fasa yang mungkin ada pada suhu ruang pada paduan Al-Ti-B adalah Ti, TiB, Ti₃B₄, TiB₂, B, Al, AlB₂, AlB₁₂, TiAl, Ti₃Al, TiAl₂ dan TiAl₃. Penelitian yang dilakukan oleh Moldovan dan Popescue, menyebutkan bahwa fasa dominan dari penghalus butir Al-5Ti-1B adalah TiB₂ dan TiAl₃. Penelitian tersebut juga menyebutkan bahwa fasa TiAl₃ pada penghalus butir Al-5Ti-1B memiliki komposisi 62.37 wt.% Al, 37.8 wt.% Ti, dan 0,05 wt.% Si. Sedangkan fasa TiB₂ pada penghalus butir Al-5Ti-1B memiliki komposisi 28.93 wt.% Al, 7.46 wt.% Ti dan 63.61 wt.% B^[30].

Persentase atom pada titik 1 adalah 14.92 at. % Al, 6.27 at. % Ti dan 78.37 at. % B. Nilai ini memiliki perbandingan Ti : B sebesar 1 : 12. Perbandingan atom yang mendekati perbandingan atom tersebut adalah fasa TiB₂ sehingga dapat dikatakan bahwa titik 1 pada Gambar 4.2 merupakan fasa TiB₂. Persentase atom pada titik 2 adalah 18.74 at. % Al, 0.1 at. % Ti dan 81.17 at. % B. Nilai ini memiliki perbandingan Al : B sebesar 1 : 4. Perbandingan atom yang mendekati perbandingan atom tersebut adalah fasa AlB₂ sehingga dapat dikatakan bahwa titik 2 pada Gambar 4.2 merupakan fasa AlB₂. Persentase atom pada titik 3 adalah 18.35 at. % Al, 3.0 at. % Ti dan 78.65 at. % B. Nilai ini memiliki perbandingan Ti : B sebesar 1 : 26 dan perbandingan Al : B sebesar 1 : 4. Perbandingan atom yang mendekati perbandingan atom tersebut adalah fasa TiB₂ dan AlB₂ sehingga dapat dikatakan bahwa titik 3 pada Gambar 4.2 merupakan fasa kombinasi TiB₂ dan AlB₂.

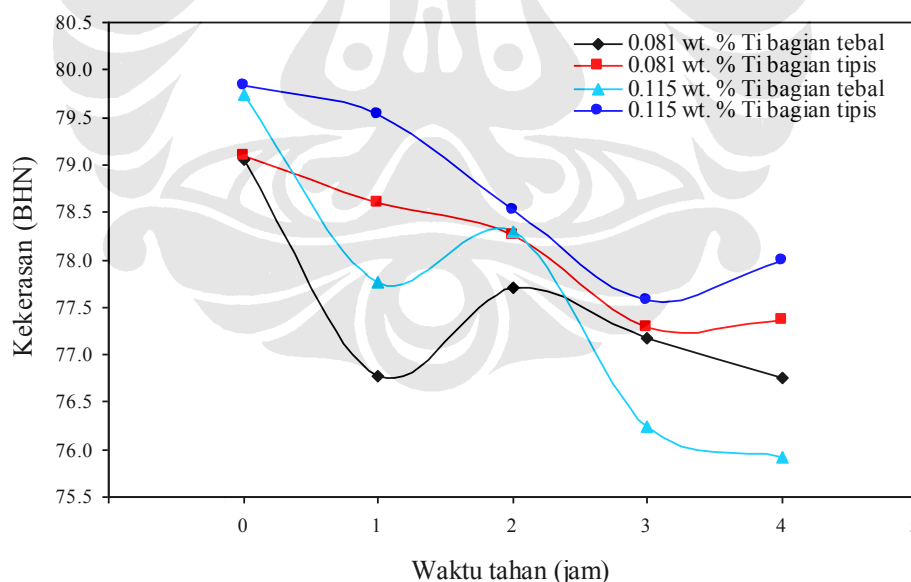


Gambar 4.5 Fasa TiAl₃ yang terdapat pada penghalus butir Al-5Ti-1B hasil pengamatan SEM^[36]

Fasa yang terbentuk pada penghalus butir yang digunakan dalam penelitian ini, tidak sesuai benar dengan fasa yang terbentuk pada penghalus butir yang sama pada penelitian sebelumnya. Penelitian yang dilakukan oleh Moldovan dan Popescue, menyebutkan bahwa fasa dominan dari penghalus butir Al-5Ti-1B adalah TiB_2 dan $TiAl_3$ ^[30]. Fasa TiB_2 memang ditemukan pada penelitian ini, namun fasa $TiAl_3$ tidak ditemukan keberadaannya. Namun, hal ini tidak berarti bahwa pada penghalus butir Al-5Ti-1B yang digunakan pada penelitian ini tidak memiliki fasa $TiAl_3$. Luasnya area yang diamati membuat pencarian fasa tersebut menjadi sulit. Jika memang ada fasa $TiAl_3$, maka morfologi dari fasa $TiAl_3$ pada penghalus butir Al-5Ti-1B menurut penelitian Nafisi dan Ghomashchi adalah seperti nampak pada Gambar 4.5^[36].

4.3 PERUBAHAN KARAKTERISTIK PADUAN ALUMINIUM AC4B SELAMA PROSES LPDC PADA PENAMBAHAN 0.081 wt. % Ti dan 0.115 wt. % Ti

4.3.1 Perubahan Kekerasan Paduan Aluminium AC4B Selama Proses LPDC

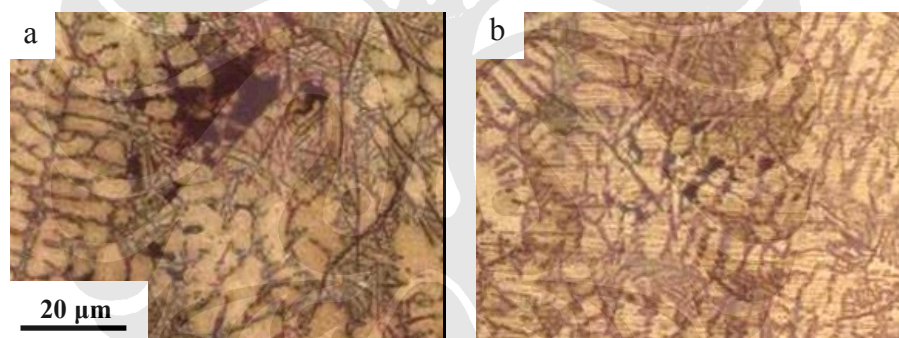


Gambar 4.6 Pengaruh penambahan penghalus butir Al-5Ti-1B dan posisi sampel terhadap fenomena *fading* dan kekerasan paduan aluminium AC4B hasil LPDC.

Perubahan kekerasan paduan aluminium AC4B dengan penambahan 0.081 dan 0.115 wt. % Ti selama periode 0 hingga 4 jam dapat terlihat pada Gambar 4.6. Pada gambar tersebut terlihat bahwa paduan aluminium AC4B

dengan 0.081 *wt. %* Ti memiliki kekerasan tertinggi pada bagian tipis, sedangkan bagian tebalnya memiliki kekerasan yang lebih rendah. Selain itu, semakin lama waktu tahan, maka kekerasan paduan aluminium AC4B dengan 0.081 *wt. %* Ti mengalami kecenderungan untuk menurun. Kecenderungan terjadi pada bagian tebal maupun tipis. Selama periode waktu tahan 0 hingga 4 jam, paduan aluminium AC4B dengan 0.081 *wt. %* Ti mengalami penurunan nilai kekerasan sebesar 2.3 BHN untuk bagian tebal, sedangkan bagian tipis mengalami penurunan sebesar 1.7 BHN.

Untuk paduan aluminium AC4B dengan 0.115 *wt. %* Ti, bagian tipisnya juga memiliki kekerasan yang lebih tinggi daripada bagian tebal. Selain itu, paduan aluminium AC4B dengan 0.115 *wt. %* Ti juga mengalami kecenderungan penurunan selama waktu tahan 0 hingga 4 jam. Nilai kekerasannya menurun 3.8 BHN pada bagian tebal dan 1.9 BHN untuk bagian tipis.



Gambar 4.7 Porositas pada paduan aluminium AC4B hasil LPDC dengan penambahan (a) 0.081 *wt. %* Ti dan (b) 0.115 *wt. %* Ti jam ke 1 setelah 1 jam pada bagian tebal.

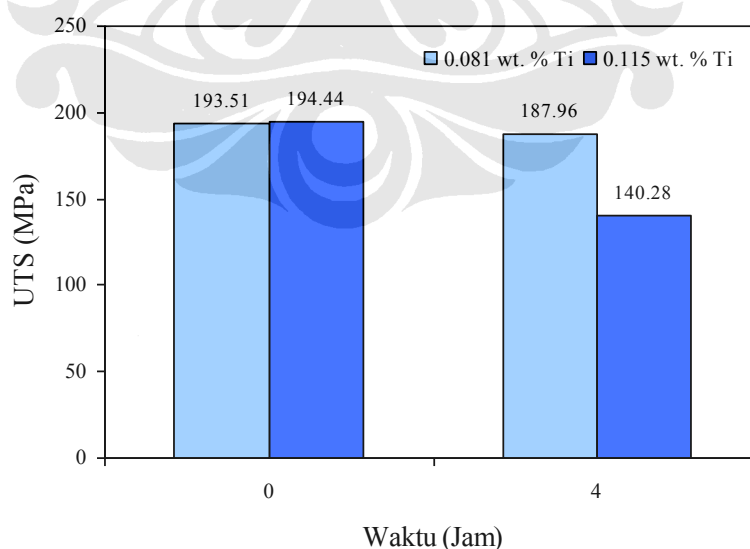
Pada Gambar 4.6 terdapat beberapa penyimpangan data pada nilai kekerasan. Penyimpangan yang terjadi diantaranya penurunan kekerasan paduan aluminium AC4B dengan 0.081 *wt. %* Ti yang drastis pada bagian tebal. Penurunan kekerasan terjadi pada jam ke 1. Faktor yang menyebabkan kekerasan menurun dengan drastis adalah karena keberadaan porositas. Keberadaan porositas pada jam ke 1 paduan aluminium AC4B dengan 0.081 *wt. %* Ti bagian tebal yang terlihat pada gambar 4.7a. Sedangkan Gambar 4.7b menunjukkan porositas yang terdapat pada paduan aluminium AC4B dengan 0.115 *wt. %* Ti bagian tebal. Tingkat porositas yang tinggi dapat menurunkan sifat mekanis dari produk cor^[37]. Penurunan kekerasan yang drastis juga diperlihatkan pada paduan

aluminium AC4B dengan 0.115 wt. % Ti pada bagian tebal. Penurunan ini juga terjadi pada jam ke 1.

Berdasarkan kecenderungan menurunnya nilai kekerasan paduan aluminium AC4B, maka ada indikasi terjadinya *fading* pada penghalus butir. *Fading* mulai terjadi antara jam ke 0 dan jam ke 1. *Fading* pada bagian tebal lebih signifikan dibandingkan dengan bagian tipis. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan kekerasan yang lebih besar pada bagian tebal.

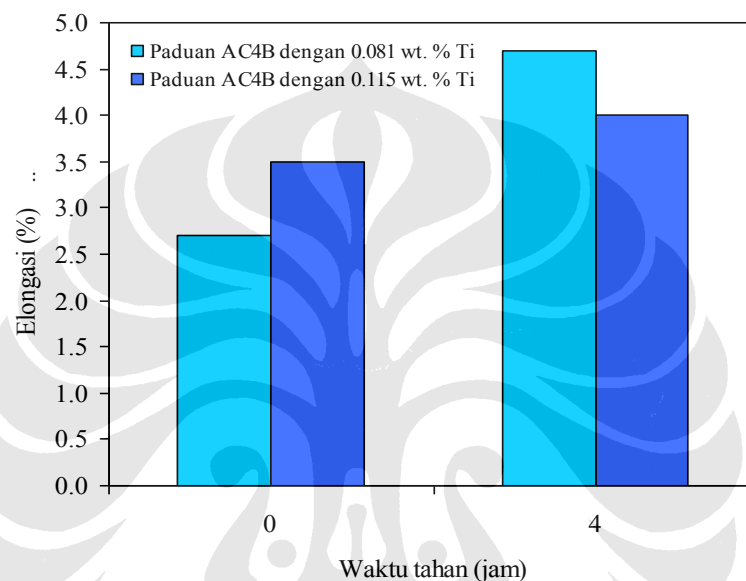
4.3.2 Perubahan Kekuatan Tarik Paduan Aluminium AC4B Selama Proses LPDC

Perubahan kekuatan tarik paduan aluminium AC4B dengan 0.081 wt. % Ti dan 0.115 wt. % Ti selama periode waktu tahan 0 dan 4 jam diperlihatkan melalui Gambar 4.8. Pada gambar tersebut terlihat bahwa semakin lama waktu tahan, maka kekuatan tarik akan menurun baik pada paduan aluminium AC4B dengan 0.081 wt. % Ti maupun 0.115 wt. % Ti. Pada paduan aluminium AC4B dengan 0.081 wt. % Ti dari jam ke 0 hingga jam ke 4, kekuatan tarik mengalami penurunan sebesar 5.6 MPa. Sedangkan untuk paduan aluminium AC4B dengan 0.115 wt. % Ti dari jam ke 0 hingga jam ke 4, kekuatan tarik mengalami penurunan sebesar 54.1 MPa.



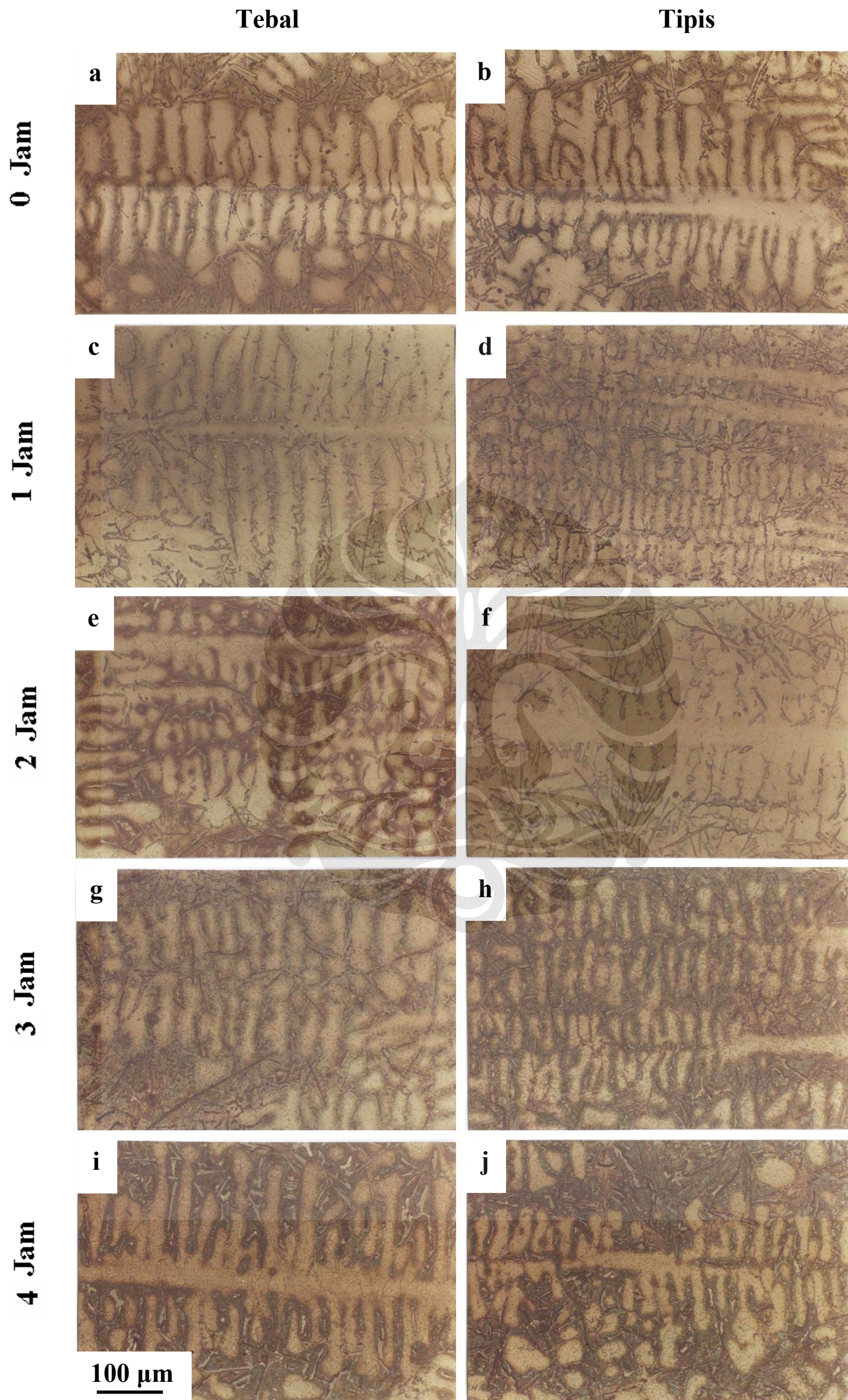
Gambar 4.8 Perubahan kekuatan tarik paduan aluminium AC4B hasil LPDC setelah 0 dan 4 jam. Paduan aluminium AC4B tersebut ditambahkan penghalus butir Al-5Ti-1B dengan rasio 0.081 dan 0.115 wt. % Ti.

Penurunan nilai kekuatan tarik pada penelitian ini memiliki korelasi dengan kekerasan. Kekerasan dan kekuatan tarik merupakan suatu parameter dari ketahanan logam terhadap deformasi plastik, sehingga secara umum nilai keduanya adalah proporsional^[1]. Kekuatan tarik paduan aluminium AC4B dengan 0.081 dan 0.115 wt. % Ti mengalami penurunan setelah jam ke 4, begitu pula kekerasannya yang cenderung turun hingga jam ke 4 baik pada sampel tebal maupun tipis.

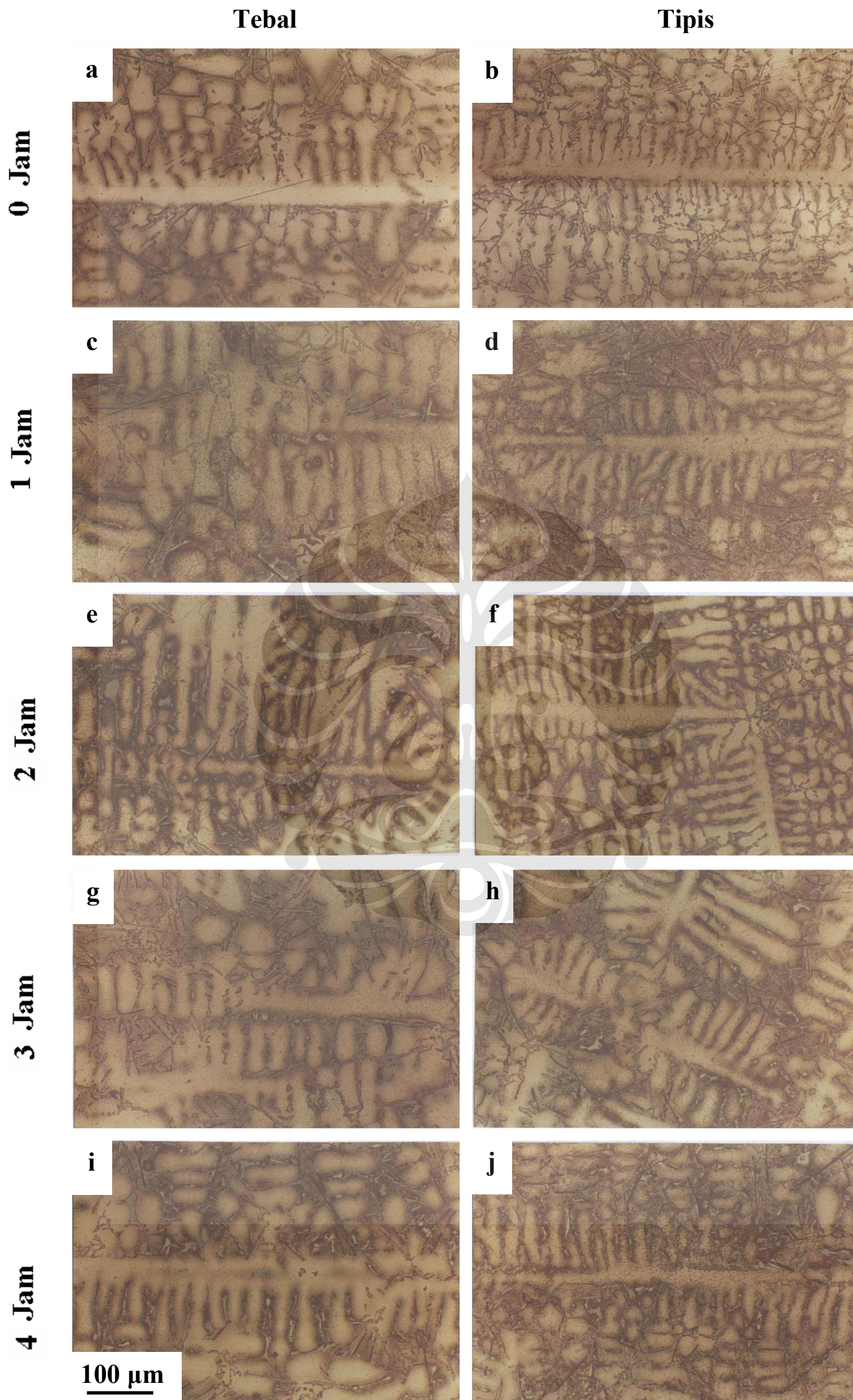


Gambar 4.9 Perubahan keuletan paduan aluminium AC4B hasil LPDC setelah 0 dan 4 jam. Paduan aluminium AC4B tersebut ditambahkan penghalus butir Al-5Ti-1B dengan 0.081 dan 0.115 wt. % Ti.

Pada Gambar 4.9 terlihat bahwa semakin lama waktu tahan, maka % elongasi akan semakin meningkat baik pada paduan aluminium AC4B dengan 0.081 wt. % Ti maupun 0.115 wt. % Ti. Untuk komposisi 0.081 % Ti, % elongasi meningkat sebesar 2 %. Begitu pun untuk 0.115 wt. % Ti yang mengalami peningkatan sebesar 0.5 %. Elongasi adalah indikasi dari tingkat keuletan suatu logam, dimana semakin besar nilai % elongasi maka material tersebut akan semakin ulet^[1]. Oleh karena itu, semakin lama waktu tahan maka paduan aluminium AC4B yang ditambahkan penghalus butir Al-5Ti-B akan menurun kekuatannya sedangkan keuletannya akan meningkat. Penurunan kekuatan dan meningkatnya elongasi setelah 4 jam dapat menjadi indikasi terjadinya *fading*.



Gambar 4.10 Perubahan struktur mikro paduan aluminium AC4B hasil LPDC dengan komposisi 0.081 wt. % Ti dengan waktu tahanan (a-b) 0 jam; (c-d) 1 jam; (e-f) 2 jam; (g-h) 3 jam dan (i-j) 4 jam, masing-masing pada posisi sampel tebal dan tipis.



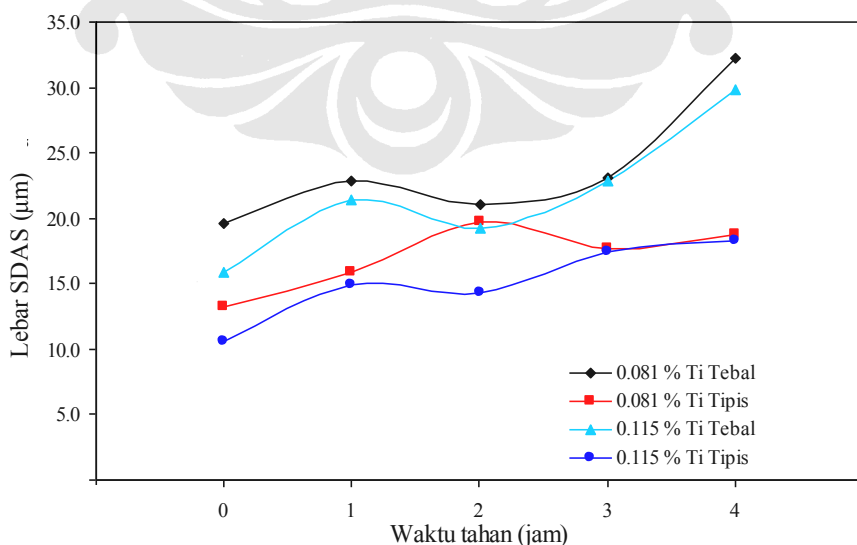
Gambar 4.11 Perubahan struktur mikro paduan aluminium AC4B hasil LPDC dengan komposisi 0.115 wt. % Ti dengan waktu tahan (a-b) 0 jam; (c-d) 1 jam; (e-f) 2 jam; (g-h) 3 jam dan (i-j) 4 jam, masing-masing pada posisi sampel tebal dan tipis.

4.3.3 Perubahan Struktur Mikro paduan Aluminium AC4B Selama Proses LPDC

Perubahan struktur mikro paduan aluminium AC4B dengan 0.081 wt. % Ti selama 0 hingga 4 jam diperlihatkan pada Gambar 4.10. Sedangkan perubahan struktur mikro yang terjadi paduan aluminium AC4B dengan 0.115 wt. % Ti selama LPDC diperlihatkan pada Gambar 4.11. Pada gambar tersebut terlihat morfologi dari struktur dendrit yang sesungguhnya adalah aluminium primer. Di sekeliling dendrit aluminium terlihat struktur jarum-jarum panjang gelap yang merupakan fasa silikon dalam bentuk eutektik.

Ukuran dendrit paduan aluminium AC4B dengan 0.081 wt. % Ti yang terjadi pada bagian tebal lebih besar daripada bagian tipis. Kecenderungan tersebut terlihat dari jam ke 0 hingga jam ke 4. Hal yang sama juga terlihat pada paduan aluminium AC4B dengan 0.115 wt. % Ti. Bagian tebal memiliki ukuran dendrit yang lebih besar mulai dari jam ke 0 hingga jam ke 4.

Perubahan lebar SDAS pada paduan aluminium AC4B ditunjukkan melalui Gambar 4.12. Pada gambar tersebut terlihat bahwa semakin lama waktu tahan, maka lebar SDAS paduan aluminium AC4B dengan 0.081 wt. % Ti mengalami kecenderungan yang naik. Kecenderungan naik terlihat pada bagian tebal dan tipis. Kenaikan lebar SDAS paduan aluminium AC4B setelah 4 jam adalah sebesar 12.7 μm pada bagian tipis, sedangkan bagian tebal sebesar 5.4 μm .



Gambar 4.12 Pengaruh penambahan Ti dan posisi sampel terhadap fenomena *fading* dan ukuran SDAS paduan aluminium AC4B hasil LPDC.

Perubahan struktur mikro pada paduan aluminium AC4B dengan 0.115 wt. % Ti juga menunjukkan hal yang sama. Lebar SDAS mengalami peningkatan seiring bertambahnya waktu tahan. Peningkatan lebar SDAS pada paduan ini terjadi pada bagian tebal maupun bagian tipis. Selama 4 jam, bagian tebal mengalami peningkatan lebar SDAS sebesar 14 μm , sedangkan bagian tipisnya 7.7 μm .

Berdasarkan kecenderungan yang terjadi, dapat terlihat adanya penyimpangan-penyimpangan. Penyimpangan yang terjadi diantaranya adalah menurunnya grafik paduan aluminium AC4B dengan 0.081 wt. % Ti dan 0.115 % Ti di bagian tebal. Penurunan grafik terjadi di jam ke 2. Penyimpangan ini memiliki korelasi dengan penyimpangan yang terjadi pada perubahan kekerasan pada pembahasan sebelumnya. Perubahan kekerasan mengalami penyimpangan dimana kekerasan justru semakin meningkat pada jam ke 2. Yang menjadi penyebabnya penyimpangan ini adalah porositas.

Hasil pengujian ini memiliki korelasi dengan perubahan kekerasan yang terjadi pada paduan aluminium AC4B. Dengan meningkatnya waktu tahan maka kekerasan paduan aluminium AC4B akan menurun sedangkan lebar SDAS semakin meningkat. Hasil ini mengindikasikan terjadinya *fading*. *Fading* mulai terjadi antara jam ke 0 dan dan jam ke 1. Waktu *fading* tersebut sesuai dengan hasil pengujian kekerasan yang mengindikasikan hal serupa. Selain itu korelasi juga terdapat pada perbedaan lebar SDAS pada bagian tebal dan tipis paduan aluminium AC4B. SDAS bagian tebal lebih besar daripada bagian tipis. Hal tersebut sejalan dengan kekerasan paduan aluminium AC4B yang menunjukkan bahwa bagian tebal paduan lebih lunak daripada bagian yang tipis. Peningkatan lebar SDAS sebagai indikasi *fading* paling besar terlihat pada bagian tebal.

4.4 PENGAMATAN STRUKTUR MIKRO DENGAN SEM DAN EDAX

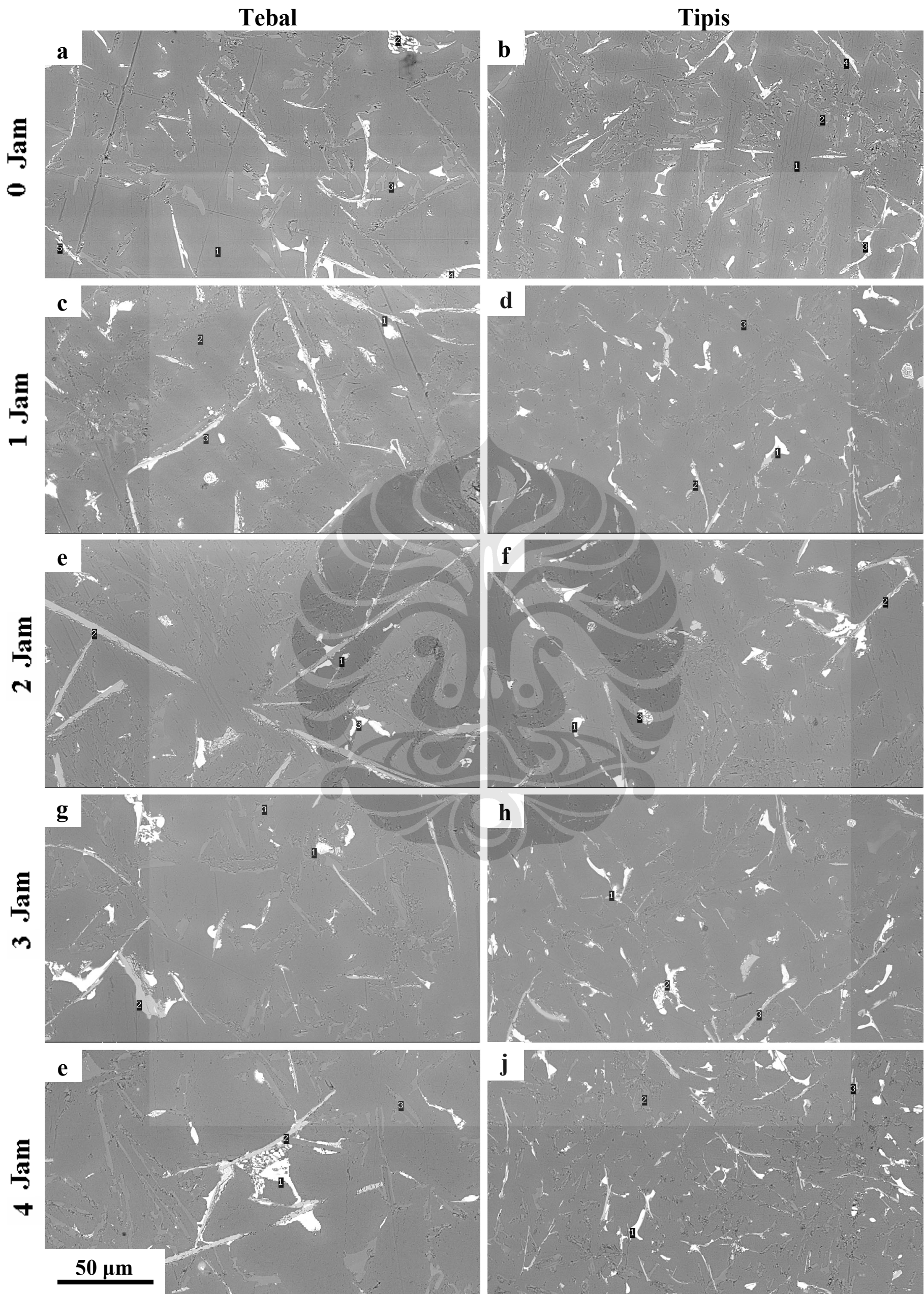
4.4.1 Perubahan Struktur Mikro Paduan Aluminium AC4B Selama Proses LPDC

Perubahan ukuran dan distribusi fasa pada paduan aluminium AC4B dengan 0.081 wt. % Ti dapat dianalisa melalui Gambar 4.13. Hasil analisa komposisi mikro menggunakan EDAX pada setiap titik di Gambar 4.13 ditabulasi

pada Tabel 4.3. Fasa intermetalik Al_2Cu pada bagian tebal paduan aluminium AC4B dengan 0.081 wt. % Ti terlihat lebih besar daripada bagian tipisnya. Distribusi Al_2Cu pada bagian tebal pun lebih rendah atau kurang merata dibandingkan dengan bagian tipis. Disisi lain, kombinasi fasa Al-Si pada bagian tebal juga terlihat berbeda dengan bagian yang tipis. Ukuran fasa Al-Si pada bagian tebal terlihat lebih besar dan panjang.

Selama proses LPDC dari jam ke 0 hingga jam ke 4, distribusi fasa Al_2Cu pada bagian tebal tidak terlihat adanya perubahan yang signifikan. Namun, secara umum, masih dapat terlihat bahwa distribusi fasa Al_2Cu pada bagian tebal mengalami penurunan dari jam ke 0 hingga jam ke 4. Pada bagian tipis, kecenderungan yang terjadi juga sama. Distribusi fasa Al_2Cu terlihat semakin menurun seiring waktu tahan, namun pada jam ke 3 dan jam ke 4 distribusinya justru semakin meningkat. Untuk fasa Al-Si yang terdapat pada bagian tebal, dari jam ke 0 hingga jam ke 4 terlihat kecenderungan perubahan yang tidak konsisten. Distribusi fasa Al-Si meningkat pada jam ke 1, sedangkan pada jam ke 2 dan 3 distribusinya tidak terlalu berubah. Distribusi fasa Al-Si kembali menurun pada jam ke 4. Pada bagian tipis, fasa Al-Si mengalami penurunan distribusi pada jam ke 1, namun distribusinya tidak terlalu berubah pada jam ke 2 dan jam ke 3. Sedangkan pada jam ke 4, distribusi fasa Al-Si justru meningkat kembali.

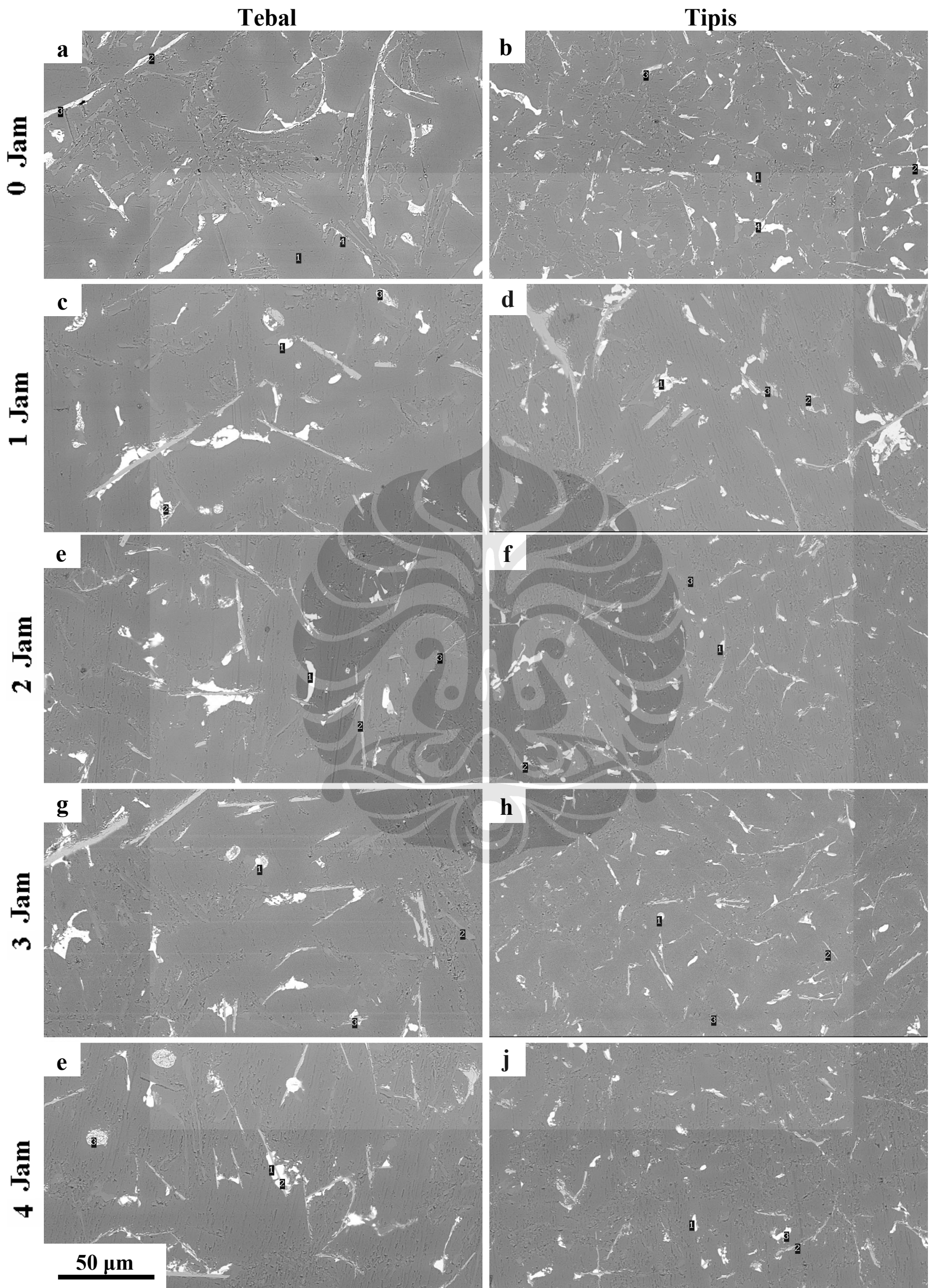
Perubahan ukuran dan distribusi fasa pada paduan aluminium AC4B dengan 0.115 wt. % Ti dapat dianalisa melalui Gambar 4.14. Hasil analisa komposisi mikro menggunakan EDAX pada setiap titik di Gambar 4.14 ditabulasi pada Tabel 4.4. Pada bagian tebal, ukuran fasa intermetalik Al_2Cu terlihat lebih besar daripada bagian yang tipis. Distribusinya pun lebih tinggi atau semakin merata pada bagian yang tipis. Fasa Al-Si juga memiliki kecenderungan yang sama. Pada bagian tipis, fasa Al-Si memiliki ukuran yang lebih kecil daripada bagian yang tebal.



Gambar 4.13 Perubahan struktur mikro (SEM) paduan aluminium AC4B hasil LPDC dengan komposisi 0.081 wt. % Ti dengan waktu tahan (a-b) 0 jam; (c-d) 1 jam; (e-f) 2 jam; (g-h) 3 jam dan (i-j) 4 jam, masing-masing pada posisi sampel tebal dan tipis. Hasil analisa mikro pada setiap titiknya ditabulasi pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil analisa mikro paduan aluminium AC4B dengan 0.081 wt. % Ti pada titik-titik pengamatan sesuai Gambar 4.13

Jam ke	No Foto	Sampel	No. Titik	Unsur (wt. %)				Warna	Fasa
				Al	Si	Cu	Ti		
0	a	tebal	1	94.48	1.90	-	-	abu-abu	Al
			2	64.88	2.74	29.36	-	putih	Al ₂ Cu
			3	19.49	82.34	-	-	abu-abu	Al-Si
			4	64.13	5.27	24.05	-	putih	Al ₂ Cu
			5	57.66	11.65	16.18	0.64	putih	Al ₂ Cu
1	b	tipis	1	94.88	1.88	-	-	abu-abu	Al
			2	15.24	80.60	-	-	abu-abu	Al-Si
			3	91.05	0.95	7.27	-	putih	Al ₂ Cu
			4	32.91	63.03	-	-	abu-abu	Al-Si
2	c	tebal	1	89.70	1.48	6.86	-	putih	Al ₂ Cu
			2	94.80	2.00	-	-	abu-abu	Al
			3	57.17	11.56	-	-	abu-abu	Al-Si
	d	tipis	1	38.36	5.87	45.20	-	putih	Al ₂ Cu
			2	59.15	14.91	21.82	-	putih	Al ₂ Cu
			3	52.37	42.09	-	-	abu-abu	Al-Si
3	e	tebal	1	88.11	1.27	8.47	-	putih	Al ₂ Cu
			2	60.53	11.68	-	-	abu-abu	Al-Si
			3	42.71	0.51	56.26	-	putih	Al ₂ Cu
	f	tipis	1	88.13	2.34	8.28	-	putih	Al ₂ Cu
			2	72.20	22.63	-	-	abu-abu	Al-Si
			3	93.84	1.76	-	-	abu-abu	Al-Si
4	g	tebal	1	70.22	11.91	11.48	-	putih	Al ₂ Cu
			2	57.09	11.19	-	-	abu-abu	Al-Si
			3	88.60	1.23	8.93	-	putih	Al ₂ Cu
	h	tipis	1	87.10	1.36	7.59	-	putih	Al ₂ Cu
			2	29.21	0.17	60.83	-	putih	Al ₂ Cu
			3	93.93	1.59	-	-	abu-abu	Al-Si
4	i	tebal	1	30.04	0.19	59.94	-	putih	Al ₂ Cu
			2	93.06	1.50	-	-	abu-abu	Al-Si
			3	11.83	83.11	-	-	abu-abu	Al-Si
	j	tipis	1	88.95	1.27	8.13	-	putih	Al ₂ Cu
			2	88.63	2.34	7.62	-	abu-abu	Al-Si
			3	87.95	1.16	9.16	-	putih	Al ₂ Cu



Gambar 4.14 Perubahan struktur mikro (SEM) paduan aluminium AC4B hasil LPDC dengan komposisi 0.115 wt. % Ti dengan waktu tahan (a-b) 0 jam; (c-d) 1 jam; (e-f) 2 jam; (g-h) 3 jam dan (i-j) 4 jam, masing-masing pada posisi sampel tebal dan tipis. Hasil analisa mikro pada setiap titiknya ditabulasi pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil analisa mikro paduan aluminium AC4B dengan 0.115 wt. % Ti pada titik-titik pengamatan sesuai Gambar 4.14

Jam ke	No Foto	Sampel	No. Titik	Unsur (wt. %)				Warna	Fasa
				Al	Si	Cu	Ti		
0	a	tebal	1	96.80	1.85	-	-	abu-abu	Al
			2	84.17	2.34	12.66	-	putih	Al ₂ Cu
			3	58.46	11.00	-	-	abu-abu	Al-Si
			4	28.19	65.95	-	-	abu-abu	Al-Si
1	b	tipis	1	93.48	1.61	-	-	abu-abu	Al-Si
			2	46.53	1.51	48.54	-	putih	Al ₂ Cu
			3	56.83	14.52	-	-	abu-abu	Al-Si
			4	35.06	1.47	63.29	-	putih	Al ₂ Cu
2	c	tebal	1	4.97	-	-	-	abu-abu	Al
			2	46.75	0.55	52.09	-	putih	Al ₂ Cu
			3	39.48	13.40	42.45	-	putih	Al ₂ Cu
	d	tipis	1	32.01	61.94	-	-	abu-abu	Al-Si
			2	87.26	1.49	9.65	-	putih	Al ₂ Cu
			3	90.80	1.64	6.24	-	putih	Al ₂ Cu
3	e	tebal	1	78.88	1.72	17.66	-	putih	Al ₂ Cu
			2	91.52	1.56	-	-	abu-abu	Al-Si
			3	88.48	1.56	8.37	-	putih	Al ₂ Cu
	f	tipis	1	93.20	1.94	-	-	abu-abu	Al-Si
			2	64.46	17.43	16.80	-	putih	Al ₂ Cu
			3	93.32	1.82	-	-	abu-abu	Al-Si
4	g	tebal	1	87.15	1.05	10.73	-	putih	Al ₂ Cu
			2	86.12	6.42	5.81	-	abu-abu	Al-Si
			3	91.87	1.55	-	-	abu-abu	Al-Si
	h	tipis	1	93.23	1.83	-	-	abu-abu	Al-Si
			2	90.82	1.42	6.34	-	putih	Al ₂ Cu
			3	95.15	1.21	-	-	abu-abu	Al-Si
4	i	tebal	1	85.83	3.25	8.52	-	putih	Al ₂ Cu
			2	32.60	0.50	66.71	-	putih	Al ₂ Cu
			3	34.17	0.60	61.65	-	putih	Al ₂ Cu
	j	tipis	1	73.40	4.20	18.37	-	putih	Al ₂ Cu
			2	90.15	1.56	6.96	-	putih	Al ₂ Cu
			3	89.11	1.29	8.10	-	putih	Al ₂ Cu

Selama proses LPDC dari jam ke 0 hingga jam ke 4, ukuran dan distribusi fasa Al₂Cu pada bagian tebal menunjukkan perubahan seiring bertambahnya waktu tahan. Distribusi fasa Al₂Cu terlihat semakin menurun seiring bertambahnya waktu tahan. Pada bagian yang tipis, distribusi fasa Al₂Cu terlihat menurun pada jam ke 1, sedangkan pada jam ke 2, 3 dan 4, perubahan tidak begitu terlihat. Untuk fasa Al-Si pada bagian tebal, kecenderungan yang terjadi juga tidak beraturan. Distribusi fasa Al-Si sempat menurun pada jam ke 1 dan jam ke 2, namun meningkat kembali pada jam ke 3 dan jam ke 4. Pada bagian

tipis, distribusi fasa Al-Si menurun pada jam ke 1 namun meningkat kembali pada jam-jam berikutnya.

Hasil diatas memperlihatkan bahwa bagian tipis paduan aluminium AC4B memiliki ukuran fasa Al_2Cu yang lebih kecil dan lebih terdistribusi dari pada bagian tebalnya. Fasa Al-Si pun mengalami kecenderungan yang sama. Pada bagian tipis, fasa Al-Si lebih kecil dan tersebar merata. Hasil ini memiliki korelasi dengan perubahan kekerasan dan lebar SDAS pada pembahasan sebelumnya. Bagian tipis memiliki kekerasan yang lebih tinggi daripada bagian tebal. Persebaran fasa Al_2Cu yang tinggi pada aluminium lebih diinginkan daripada jumlah fasa Al_2Cu yang banyak namun tidak tersebar merata. Aluminium dengan fasa Al_2Cu yang terdistribusi merata dan lebih bulat akan mengalami peningkatan kekuatan yang signifikan tanpa pengurangan keuletan yang berarti^[38].

Perubahan struktur mikro yang terjadi selama proses LPDC yang berlangsung selama 4 jam tidak memiliki kecenderungan perubahan yang berarti. Seharusnya jika mengkorelasikan dengan perubahan kekerasan dan lebar SDAS pada pembahasan sebelumnya, semakin lama waktu tahan maka ukuran dari fasa Al_2Cu dan Al-Si akan semakin besar dan distribusinya semakin menurun. Hal ini kemungkinan disebabkan karena sampel pengujian SEM diambil pada bagian paling terluar sampel uji kekerasan dan pengamatan mikroskop optik. Bagian terluar merupakan bagian tepi yang langsung bersinggungan dengan dinding cetakan yang pembekuannya sangat cepat. Pembekuan yang cepat akan mengurangi gradien temperatur sehingga *undercooling* menjadi kecil, dan butir yang dihasilkan akan semakin kecil^[39]. Prinsip penghalus butir yaitu mengecilkan *undercooling* sehingga terbentuk butir yang lebih kecil^[29]. Sehingga pada pembekuan cepat, penambahan penghalus butir tidak menimbulkan pengaruh yang signifikan.

4.4.2 Keberadaan Fasa Pembentuk Inti pada Paduan Aluminium AC4B Hasil Proses LPDC

Pengamatan SEM dan EDAX pada paduan aluminium AC4B menunjukkan bahwa pada Gambar 4.13a nomor titik 5 ditemukan keberadaan titanium dengan jumlah 0.64 wt. % pada fasa Al_2Cu . Penelitian Limmaneevichitr

menyebutkan bahwa fasa pembentuk inti dapat terbentuk pada fasa eutektik^[40]. Namun, hasil ini tidak menunjukkan bahwa fasa pembentuk inti sulit terbentuk pada aluminium primer yang hakikatnya merupakan fasa awal pembekuan paduan aluminium AC4B. Luasnya area yang diuji dan sulitnya mencari inti dendrit aluminium primer menjadi faktor penyebabnya.

Titik yang memiliki kandungan titanium pada paduan aluminium AC4B tidak disertai kandungan boron di dalamnya. Padahal, pada pengamatan SEM dan EDAX yang dilakukan pada penghalus butir Al-5Ti-1B, terdapat unsur boron dalam jumlah yang cukup tinggi. Hal ini dapat mengindikasikan telah terjadi *fading* di awal-awal proses LPDC pada partikel pembentuk inti khususnya yang mengandung boron seperti TiB_2 dan AlB_2 . Partikel TiB_2 tidak larut ketika dimasukkan ke *molten* dan akan tetap berwujud partikel padat dengan ukuran 0.5 sampai 5 μm ketika berada dalam *molten*^{[5][30]}. Berat jenis dari TiB_2 (4.5 g/cm^3) yang lebih besar daripada aluminium cair (2.3 g/cm^3) dapat menimbulkan pengendapan^[5].

Ketiadaan unsur boron pada titik yang memiliki kandungan titanium mengindikasikan bahwa yang bertindak sebagai partikel pembentuk inti pada paduan aluminium AC4B adalah $TiAl_3$. Menurut teori, partikel $TiAl_3$ pada penghalus butir akan langsung larut jika dimasukkan ke dalam *molten*. Selanjutnya, partikel $TiAl_3$ baru akan terbentuk ketika aluminium mengalami proses pembekuan, dimana pembentukan inti $TiAl_3$ akan terjadi lebih dahulu sebelum inti aluminium terbentuk^{[5][29][30]}. Sehingga dalam siklus LPDC yang memakan waktu 4 jam, partikel $TiAl_3$ lebih efektif daripada partikel TiB_2 .

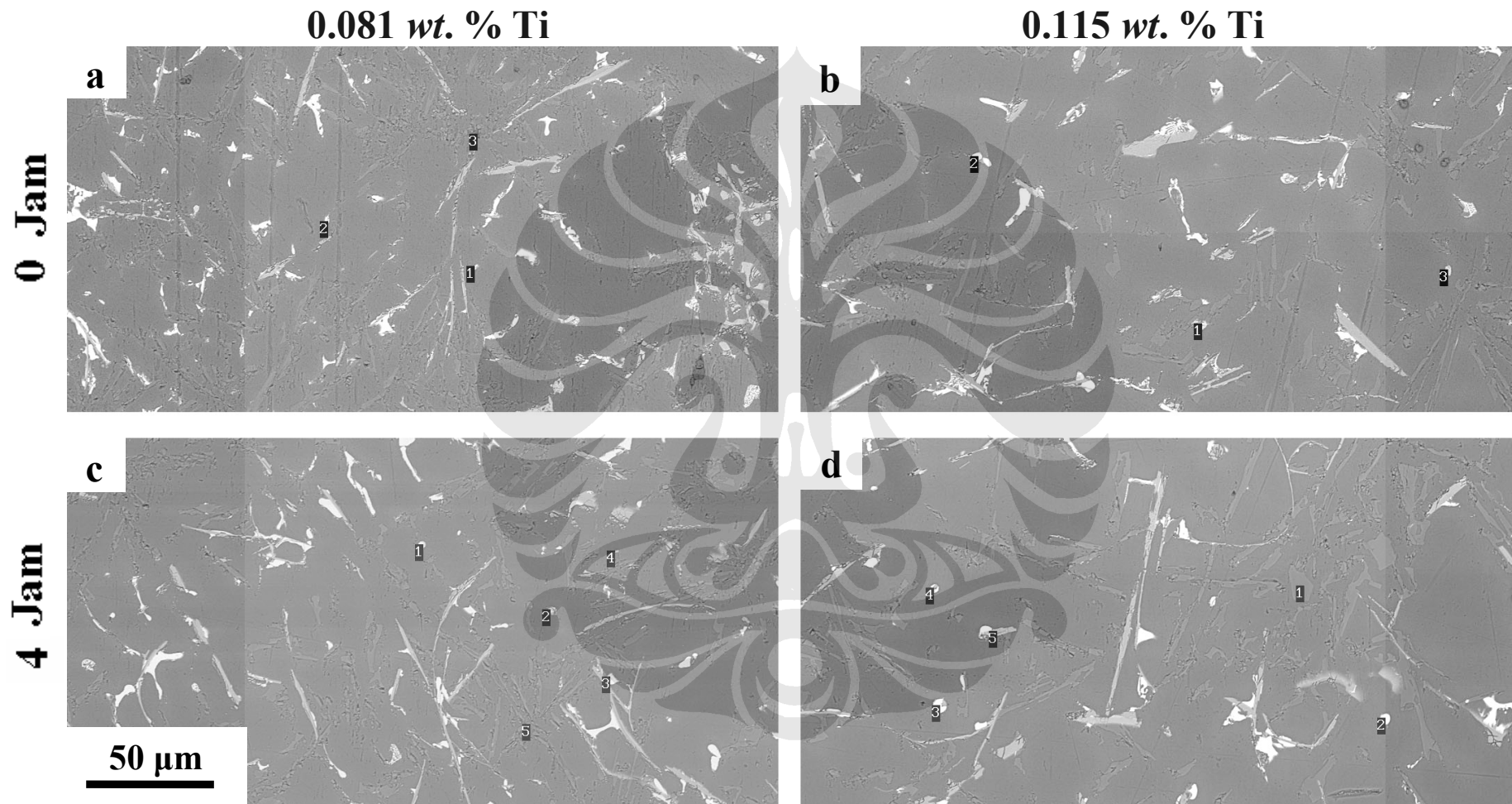
4.4.3 Keberadaan Fasa Pembentuk Inti pada Sampel Uji Tarik Paduan Aluminium AC4B Hasil Proses LPDC

Fasa-fasa yang ada pada sampel uji tarik jam ke 0 dan jam ke 4 sangat penting mengingat sampel-sampel tersebut dapat menjadi bukti terhadap *fading* pada penghalus butir yang terjadi selama proses LPDC. Sampel uji tarik jam ke 0 merupakan paduan AC4B yang memiliki waktu terdekat terhadap penambahan penghalus butir. Sedangkan sampel uji tarik jam ke 4 adalah paduan AC4B yang diambil ketika *holding furnace* LPDC dalam keadaan hampir habis. Dengan asumsi bahwa telah terjadi pengendapan partikel pembentuk inti, maka

seharusnya pada pengamatan EDAX akan ditemukan cukup banyak fasa pembentuk inti pada sampel uji tarik jam ke 4.

Hasil pengamatan struktur mikro dengan menggunakan SEM pada sampel uji tarik jam ke 0 dan jam ke 4 untuk paduan AC4B dengan kandungan 0.081 dan 0.115 wt. % Ti ditunjukkan melalui Gambar 4.15. Hasil analisa komposisi mikro menggunakan EDAX pada setiap titik di Gambar 4.15 ditabulasi pada Tabel 4.5. Pada tabel tersebut, sampel uji tarik paduan aluminium AC4B dengan 0.081 dan 0.115 wt. % Ti pada jam ke 0 memiliki kandungan unsur boron yang cukup tinggi. Hasil analisa fasa dengan perbandingan % atom untuk semua titik dengan cara yang sama seperti pada bagian 4.2 menunjukkan bahwa semua titik yang ditembak memiliki perbandingan atom yang dekat kepada fasa AlB_{12} . Dengan ditemukannya fasa AlB_{12} , maka dapat diperoleh informasi bahwa pada jam ke 0 awal masih terdapat banyak partikel pembentuk inti khususnya yang mengandung boron. AlB_{12} dapat bertindak sebagai pembentuk inti. Menurut teori paradigma unsur terlarut borida dan partikel-partikel lainnya adalah pembentuk inti yang efektif³¹. Hasil ini menunjukkan bahwa pada jam ke 0 awal, penghalus butir belum mengalami *fading*. Jika mengorelasikan hasil ini dengan perubahan kekerasan dan lebar SDAS, maka dapat dipertegas bahwa penghalus butir belum mengalami *fading* pada jam ke 0 awal. *Fading* baru terjadi antara jam ke 0 dan jam ke 1, atau lebih tepatnya mendekati jam ke 1.

Sampel uji tarik paduan aluminium AC4B dengan 0.081 dan 0.115 wt. % Ti pada jam ke 4 memiliki kandungan unsur boron yang cukup tinggi pula. Hasil analisa fasa dengan perbandingan % atom untuk semua titik menunjukkan bahwa titik-titik yang ditembak pada jam ke 4 umumnya adalah fasa AlB_{12} . Namun, ada dua titik yang merupakan fasa AlB_2 . Pada titik 2 jam ke 4 sampel uji tarik paduan aluminium AC4B dengan 0.115 wt. % Ti, selain terdapat fasa AlB_{12} juga terdapat keberadaan titanium, kemungkinan titik tersebut juga memiliki fasa TiB_2 di dalamnya. Dengan ditemukannya fasa pembentuk inti pada sampel uji tarik jam ke 4 ini, dapat diperoleh informasi bahwa semua fasa pembentuk inti yang mengandung boron telah mengendap pada dasar *holding furnace* selama 4 jam proses LPDC.



Gambar 4.15 Struktur mikro (SEM) sampel uji tarik paduan aluminium AC4B hasil LPDC dengan komposisi 0.081 wt. % Ti dengan waktu tahan (a) 0 jam dan (b) 4 jam; dan komposisi 0.115 wt. % Ti dengan waktu tahan (c) 0 jam dan (d) 4 jam. Hasil analisa mikro pada setiap titiknya ditabulasi pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil analisa mikro sampel uji tarik paduan aluminium AC4B dengan 0.081 dan 0.115 wt. % Ti pada titik-titik pengamatan sesuai Gambar 4.15

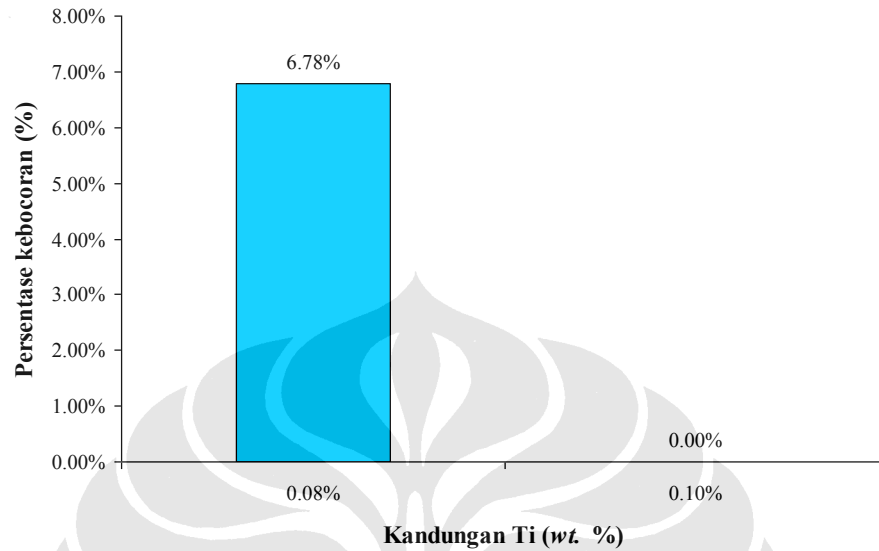
Jam ke	Kandungan Ti (wt. %)	No. Foto	No. Titik	Unsur (wt. %)					Warna	Fasa
				Al	Si	Cu	Ti	B		
0	0.081	a	1	16.65	0.18	-	-	81.92	putih	AlB ₁₂
			2	14.45	0.13	3.21	-	82.22	putih	AlB ₁₂
			3	8.47	5.9	-	-	84.74	putih	AlB ₁₂
	0.115	b	1	10.1	0.19	14.83	-	74.81	putih	AlB ₁₂
			2	7.3	1.59	10.61	-	77.96	putih	AlB ₁₂
			3	14.33	0.16	2.6	-	82.94	putih	AlB ₁₂
4	0.081	c	1	16.36	8.52	1.72	-	73.26	putih	AlB ₁₂
			2	27.12	0.33	-	-	71.79	putih	AlB ₁₂
			3	26.21	0.3	-	-	71.75	putih	AlB ₁₂
			4	27.36	0.3	-	-	71.93	putih	AlB ₁₂
			5	27.14	0.29	-	-	71.41	putih	AlB ₁₂
	0.115	d	1	0.11	20.46	-	-	78.64	putih	AlB ₁₂ dan
			2	26.47	0.3	3.38	0.57	69.06	putih	TiB ₂
			3	15.75	0.31	45.41	-	38.37	putih	AlB ₂
			4	25.02	0.29	4.49	-	69.91	putih	AlB ₁₂
			5	20.71	8.32	6.77	-	54.49	putih	AlB ₂

4.5 PENGARUH PENAMBAHAN 0.081 DAN 0.115 wt. % Ti TERHADAP KEGAGALAN BOCOR PADUAN ALUMINIUM AC4B

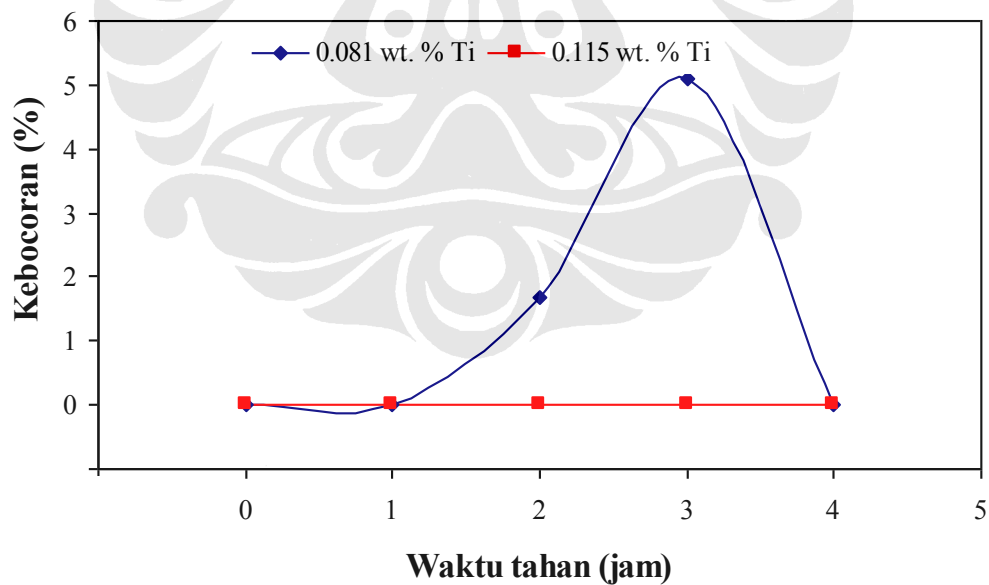
Kegagalan bocor merupakan kegagalan akibat adanya *shrinkage* dan *porosity* pada bagian dalam yang menembus hingga ke bagian luar *cylinder head*. Persentase kegagalan bocor yang terjadi pada paduan aluminium AC4B hasil LPDC yang ditambahkan penghalus butir diperlihatkan dalam Gambar 4.16. Dari 59 *part* paduan aluminium AC4B dengan 0.081 wt. % Ti, diketahui bahwa sebanyak 4 *part* diantaranya mengalami kegagalan bocor. Sedangkan untuk 61 *part* paduan aluminium AC4B dengan 0.115 wt. % Ti, tidak satu pun *part* yang mengalami kegagalan bocor.

Persentase kegagalan bocor paduan aluminium AC4B dengan 0.081 wt. % Ti dan 0.115 wt. % berdasarkan waktu tahan dalam *holding furnace* diperlihatkan dalam Gambar 4.17. Gambar tersebut memperlihatkan bahwa tidak ada kecenderungan yang terjadi antara waktu tahan dan persentase kegagalan bocor yang dihasilkan pada paduan aluminium AC4B hasil LPDC yang ditambahkan penghalus butir. Ketiadaan kecenderungan mengindikasikan bahwa

kegagalan bocor bukan disebabkan oleh mekanisme *fading* yang terjadi pada penghalus butir.



Gambar 4.16 Persentase kegagalan bocor paduan aluminium AC4B dengan 0.081 dan 0.115 wt. % Ti hasil proses LPDC.



Gambar 4.17 Persentase kegagalan bocor dan waktu tahan paduan aluminium AC4B dengan 0.081 dan 0.115 wt. % Ti hasil proses LPDC

Untuk mengetahui penyebab terjadinya kegagalan bocor perlu dipertimbangkan aspek yang lain. Kegagalan bocor merupakan kegagalan akibat adanya *shrinkage* dan *porosity* pada bagian dalam yang menembus hingga ke bagian luar *cylinder head*. *Shrinkage* dan *porosity* pada paduan aluminium AC4B hasil LPDC dapat disebabkan oleh^[41]:

1. tingginya kandungan hidrogen pada *molten*;
2. kebocoran tekanan injeksi;
3. tersumbatnya *gate*;
4. pembekuan yang tidak terarah ke *gate*;
5. *core* yang terlepas/gugur;
6. *coating* terlepas;
7. lapisan oksida ikut masuk ke cetakan; dan
8. *molten* yang kotor.

Dari ke delapan parameter diatas yang mungkin menjadi penyebab kegagalan bocor adalah poin 3 hingga 8. Untuk poin pertama, peluangnya cukup kecil sebab aluminium telah dilakukan proses *degassing* terlebih dahulu dan temperatur *molten* pun masih sesuai standar. Kandungan hidrogen pada aluminium akan meningkat dengan semakin tingginya temperatur^[20]. Sedangkan untuk poin ke dua tidak terjadi sebab selama proses pengecoran diketahui bahwa tekanan yang terjadi konstan dan masih sesuai standar yaitu 250 – 268 kPa. Pada penelitian ini, diketahui bahwa bagian *gate* produk *cylinder head* yang dihasilkan terisi penuh oleh aluminium cair yang mengindikasikan pembekuan yang tidak terarah ke *gate*, dan pada *gate* seringkali terdapat oksida aluminium walaupun dalam jumlah yang sedikit. Pernyataan ini menerangkan poin 3, 4, 7, dan 8. Oksida aluminium dapat tertumpuk pada filter *ferro* dan menghambat aliran aluminium cair ke cetakan. Pada suatu penelitian diketahui bahwa telah ditemukan adanya partikel TiB_2 dan oksida yang tersangkut pada filter keramik yang digunakan pada pengecoran aluminium yang ditambahkan Al-5Ti-1B^[42]. Selain itu pada penelitian ini juga sempat terlihat adanya inklusi pasir pada *cylinder head* dan juga beberapa kali *dies* mengalami kemacetan dan sulit digerakan. Pernyataan ini menjawab poin 5 dan 6.