

BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh Kandungan Sr dan Ti Terhadap Karakteristik Paduan AC4B dalam Kondisi Tuang

4.1.1 Analisis Komposisi Kimia

Tabel 4.1 menjelaskan tentang komposisi kimia paduan aluminium AC4B sebelum dan sesudah penambahan penghalus butir Ti dan *modifier* Sr yang dibandingkan dengan standar *Aluminium Association* (AA). Untuk memudahkan pembahasan, paduan aluminium AC4B tanpa penambahan Sr dan Ti dan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.0644, 0.0855, 0.1030 wt. % Ti disebut sebagai sampel A, B, C, dan D. Hasil uji komposisi kimia menunjukkan kandungan silikon (Si) sebagai unsur paduan utama yang berperan dalam meningkatkan sifat mampu cor, kekerasan, dan ketahanan terhadap retak panas (*creep*)^[20], mempunyai nilai 8.39, 9.45, 9.43, dan 8.85 wt. % untuk sampel A, B, C, dan D. Nilai tersebut masuk dalam rentang nilai standar AA 333, yaitu 7 – 10 wt. %.

Tabel 4.1 Hasil pengujian komposisi paduan aluminium AC4B sebelum dan sesudah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083, 0.108 wt. % Ti dibandingkan dengan standar QA AHM dan Aluminium Association (AA)

Unsur Paduan aluminium	Sebelum Penambahan (Sampel A)	Komposisi AC4B (wt.%)			Standar QA AHM	Standar AA 333
		+ 0.02 wt. % Sr, 0.0644 wt. % Ti (Sampel B)	+ 0.02 wt. % Sr, 0.0855 wt. % Ti (Sampel C)	+ 0.02 wt. % Sr, 0.108 wt. % Ti (Sampel D)		
Si	8.3900	9.4500	9.4300	8.8500	7 - 10	7 - 10
Cu	2.6900	2.6300	2.6800	2.1000	2.0 - 4.0	2 - 4
Mg	0.9650	0.5280	0.4120	0.2100	0.50 maks	0.03 - 0.50
Zn	0.5550	0.5000	0.4980	0.5500	1.00 maks	1.0 maks
Fe	0.7290	0.6460	0.7010	0.7600	1.00 maks	1.0 maks
Mn	0.4510	0.3300	0.3280	0.2500	0.50 maks	0.5 maks
Ni	0.0353	0.0050	0.0078	0.0900	0.35 maks	0.5 maks
Ti	0.0256	0.06444	0.0855	0.1030	0.20 maks	0.25 maks
Pb	0.0481	0.0260	0.0293	0.0500	0.20 maks	0.2 maks
Sn	0.0299	< 0.0100	0.0100	0.0200	0.10 maks	0.1 maks
Cr	0.0275	0.0318	0.0304	0.0300	0.20 maks	0.20 maks
Sr	< 0.0001	0.0268	0.0153	0.0250	-	-
Al	Sisa	Sisa	Sisa	Sisa	Sisa	Sisa

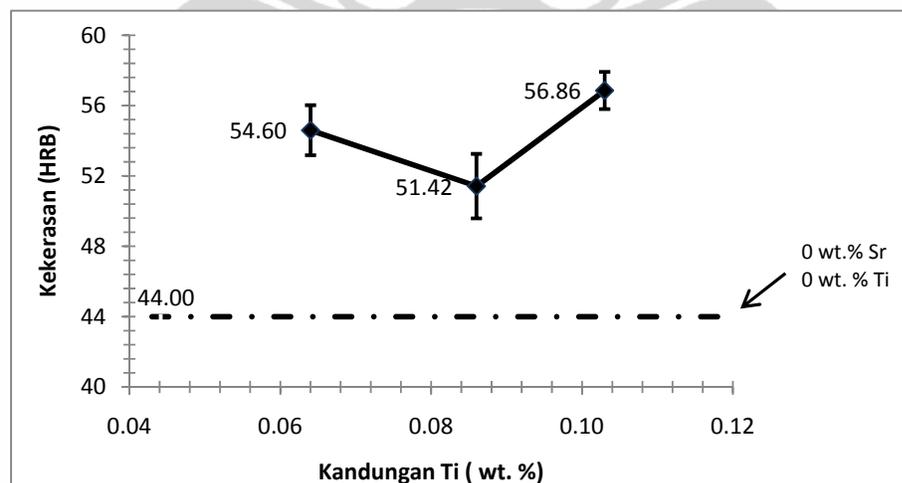
Tembaga (Cu) merupakan paduan utama kedua setelah silikon dengan kisaran nilai 2 – 2.69 wt. % dalam paduan aluminium AC4B untuk keempat sampel. Kandungan tembaga tersebut masuk dalam standar nilai AA 333, yaitu 2.0 – 4.0 wt. %. Tembaga berperan dalam meningkatkan sifat mampu mesin pada paduan aluminium silikon, namun kehadiran unsur tembaga dalam paduan aluminium silikon membentuk fasa Al_2Cu yang dapat menyebabkan efek perlindungan terhadap serangan korosi melemah dan berkurang^[4,20]. Hal ini karena terdapat beda potensial yang sangat besar antara fasa Al_2Cu dengan matriks $\alpha-Al$ ^[4], dimana Al_2Cu memiliki potensial kelarutan -440 mV ECS dan matriks $\alpha-Al$ -750 mV^[20]. Perbedaan tersebut dapat memicu terjadinya korosi galvanik ketika paduan AC4B terekspos di dalam media korosif. Unsur besi (Fe) dalam paduan aluminium AC4B memiliki nilai cukup tinggi dengan rentang 0.6 – 0.76 wt. %, meskipun demikian jumlah tersebut masih masuk dalam standar AA, yaitu maksimal 1.0 wt. %. Unsur besi berperan dalam meningkatkan ketahanan terhadap retak panas dan mengurangi kecenderungan cetakan menempel pada proses pengecoran^[20]. Dalam paduan aluminium tuang, besi adalah salah satu elemen penting dan juga pengotor yang paling banyak ditemukan yang umumnya berasal dari kotoran dalam bijih bauksit dan kontaminasi dengan logam besi dan oksida selama penanganannya^[29]. Kelarutan besi dalam aluminium padat sangat rendah, hanya 0.05 wt. %^[30]. Dalam penelitiannya, C.M. Dinnis *et al*^[31] melaporkan bahwa besi dapat membentuk fasa intermetalik $\beta-Al_5FeSi$ dan $\alpha-Al_{15}(Fe_2Mn)_3Si_2$. Diduga bahwa porositas meningkat dengan terbentuknya fasa intermetalik pada blok interdendrit. Hal tersebut dapat menurunkan ketahanan korosi pada paduan aluminium AC4B yang akan dikonfirmasi pada sub bab 4.1.3.

Hampir semua komposisi unsur tersebut masuk dalam standar QA AHM dan standar AA kecuali komposisi unsur Mg dalam sampel A, yaitu sebesar 0.9650 wt. % dan pada komposisi sampel B, yaitu 0.0528 wt.%. Rentang nilai kandungan Mg dalam standar AA 333 adalah 0.03 – 0.5 %. Unsur Mg umum ditambahkan dalam paduan aluminium silikon yang mengandung tembaga, nikel, dan unsur lainnya. Unsur ini berperan dalam meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada paduan aluminium silikon yang mendapat perlakuan panas. Kadar

Mg yang lebih dari 0.6 % tidak meningkatkan kekuatan secara signifikan. Paduan aluminium silikon yang memiliki kekuatan tinggi mempunyai kadar magnesium 0.4 – 0.6 %^[20]. Unsur Ti dalam hal ini berperan untuk menghaluskan butir, jumlah kandungannya dalam sampel A, B, C, dan D adalah 0.0256, 0.0644, 0.0855, dan 0.1030 wt. %. Kadar Ti tersebut masuk dalam rentang nilai standar AA 333, yaitu maksimal 0.25 wt. % dan akan diteliti lebih lanjut pengaruh penambahan Ti dalam paduan aluminium AC4B dengan *modifier* Sr yang berperan untuk memodifikasi kristal silikon eutektik. Secara garis besar, kadar unsur-unsur penyusun paduan aluminium AC4B dalam sampel A, B, C, dan D sudah sesuai dengan standar AA 333.

4.1.2 Analisis Kekerasan

Gambar 4.1 menunjukkan pengaruh penambahan Sr dan variasi Ti terhadap kekerasan paduan aluminium AC4B, sedangkan data mentahnya tersedia dalam Lampiran 2. Dari Gambar 4.1 dapat dilihat kekerasan paduan aluminium AC4B tanpa penambahan Sr dan Ti, yaitu sampel A lebih rendah dibandingkan paduan aluminium AC4B dengan penambahan Sr dan Ti, yaitu pada sampel B, C, dan D. Kekerasan untuk sampel A, B, C, dan D berturut-turut adalah sebesar 44.00, 54.60, 51.42, dan 56.86 HRB.



Gambar 4.1 Pengaruh penambahan Ti terhadap kekerasan paduan AC4B dengan kandungan 0.02 wt. % Sr dan perbandingannya dengan kekerasan paduan AC4B standar.

Perbedaan kekerasan ini dikarenakan adanya perubahan morfologi kristal silikon dalam paduan aluminium AC4B antara sebelum dan sesudah penambahan Sr dan Ti. Pada sampel A tanpa penambahan Sr, morfologi kristal silikon masih berupa pelat tajam (*acicular*), sedangkan sampel B, C, dan D yang mengandung 0.02 wt. % Sr morfologi silikonnya berubah menjadi *fibrous*. Untuk sampel B, C, dan D, dengan kandungan Sr yang sama, yaitu 0.02 wt. % dan kandungan Ti yang bervariasi, sampel B dengan kandungan 0.064 wt. % Ti nilai kekerasannya naik sebesar 24.09 % dibandingkan dengan sampel A, yaitu dari 44 HRB menjadi 54.6 HRB. Sedangkan pada sampel C dengan kandungan 0.0855 wt. % Ti, didapati kekerasannya turun sebesar 5.82 %, yaitu dari 54.6 HRB menjadi 51.42 HRB. Kekerasan paling tinggi ditunjukkan oleh sampel D dengan kandungan Ti sebesar 0.1030 wt. %. Peningkatan kekerasan pada paduan aluminium AC4B dengan penambahan Sr dan Ti tersebut menunjukkan adanya pengaruh penambahan Sr dan Ti terhadap morfologi mikrostruktur paduan aluminium AC4B tersebut, dimana morfologi kristal silikon mengalami perubahan dari *acicular* kasar menjadi *fibrous* yang halus^[32,33]. Perubahan ini dapat dilihat pada Gambar 4.3 hasil foto mikrostruktur paduan aluminium AC4B pada sub bab 4.3.

Dalam penelitiannya, KG. Basavakumar *et al*^[34] melaporkan dengan penambahan Al-1Ti-3B dan Sr di dalam paduan aluminium Al-7Si-2.5Cu akan mengubah mikrostruktur paduan aluminium, yaitu butir α -Al dari *columnar* yang kasar menjadi α -Al *equiaxed* halus, kristal silikon dari bentuk pelat kasar menjadi halus, dan fasa intermetalik Al₂Cu dari ukuran besar menjadi lebih halus dan terbentuk di sepanjang daerah interdendrit dan tersebar merata. Fenomena inilah yang dapat menaikkan sifat mekanik dari paduan Al-Si termasuk kekerasannya. Dalam penelitian tersebut dengan penambahan 0.02 wt. % Sr dan 1 wt. % Ti dalam Al-7Si-2.5Cu, kekerasan yang diperoleh adalah sebesar 98 HB. Fenomena yang berbeda terlihat pada sampel C, dimana terjadi penurunan kekerasan dengan peningkatan kandungan Ti dan kandungan Sr yang sama. Sampel B dengan kandungan 0.0644 wt. % Ti memiliki kekerasan sebesar 54.60 HRB. Dengan penambahan Ti menjadi 0.0855 wt. % dalam sampel C, kekerasannya turun menjadi 51.42 HRB. Hal ini kemungkinan besar karena jumlah porositas yang

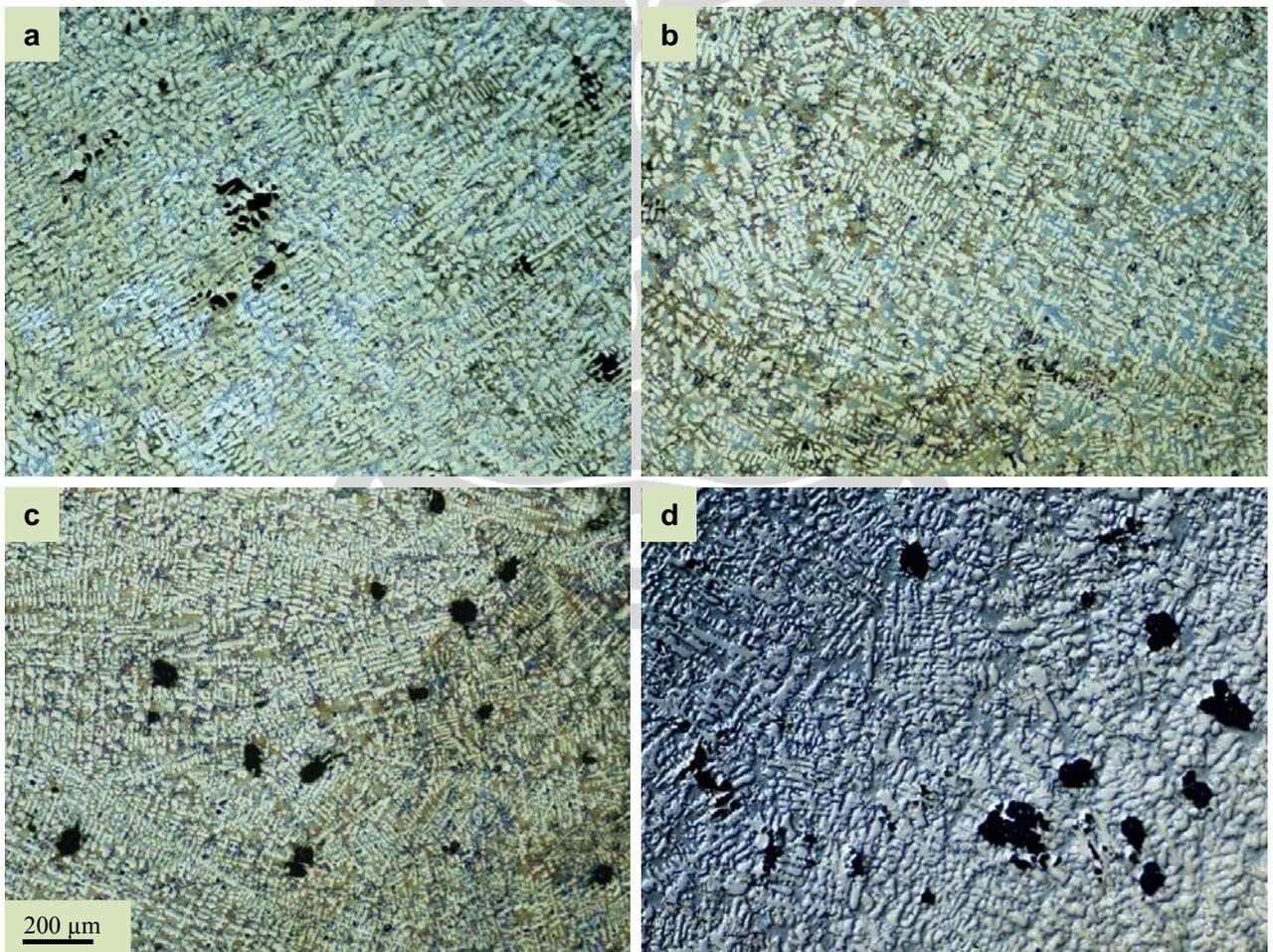
meningkat dan tidak terdispersi merata menjadi porositas mikro di dalam sampel C. Hal ini akan dikonfirmasi lebih lanjut pada sub bab 4.1.3.

4.1.3 Analisis Mikrostruktur

Pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik dilakukan untuk melihat porositas, struktur dendrit, fasa yang terbentuk, perubahan bentuk struktur setelah dilakukan penambahan Sr dan Ti, dan melihat kedalaman korosi setelah dilakukan pengujian terhadap paduan aluminium AC4B. Mikrostruktur logam paduan umumnya berkaitan dengan pengaruh besar DAS (*dendrite arm spacing*) terhadap sifat mekanik, metalurgi, dan laju korosi pada logam^[35].

Gambar 4.2 menampilkan mikrostruktur dari paduan aluminium AC4B tanpa dan dengan penambahan Sr dan Ti yang memperlihatkan sebaran porositas. Sementara itu untuk mengkonfirmasi analisis pada sub bab 4.1.1 dan 4.1.2, dari foto mikrostruktur pada Gambar 4.2 memperlihatkan adanya porositas dengan volume dan sebaran yang berbeda antara sampel A, B, C, dan D. Dari gambar tersebut tampak porositas yang terdapat pada sampel A berkumpul pada satu sisi bagian paduan aluminium AC4B. Kemudian setelah dilakukan penambahan Sr dan Ti, porositas terlihat menyebar merata dan terdispersi sebagai porositas mikro pada sampel B yang mengandung 0.0644 wt. % Ti. Sedangkan pada sampel C, berdasarkan pengamatan visual terjadi peningkatan volume porositas dan ukurannya lebih besar dibandingkan dengan porositas pada sampel A, B, dan D dengan sebaran yang merata. Sementara itu sampel D dengan kandungan Ti 0.103 wt. % terlihat memiliki sebaran porositas yang lebih merata di seluruh permukaannya dengan ukuran yang lebih halus dibandingkan dengan sampel C. Dalam penelitiannya, Haizi Ye^[15] melaporkan kelarutan hidrogen dalam Al-Si cair meningkat dengan meningkatnya temperatur, jika pembekuan paduan lebih cepat daripada keluarnya gas hidrogen dari Al-Si cair, porositas gas akan terbentuk di dalam paduan aluminium padat. Haizi Ye juga melaporkan dengan penambahan Sr dan Ti dapat menaikkan sifat mekanik Al-Si tetapi juga meningkatkan porositas. Namun, jika dibandingkan dengan pengaruh kelarutan hidrogen dalam cairan, modifikasi biasanya mempunyai pengaruh yang sedikit

terhadap pembentukan porositas. Berdasarkan hal ini diduga sampel C dengan kandungan Ti yang lebih banyak memiliki kekerasan yang lebih rendah daripada sampel B yang memiliki kandungan Ti lebih sedikit. Terdapat ketidakkonsistenan pada sampel C yang memiliki porositas besar. Dugaan yang paling memungkinkan untuk fenomena ini adalah terjadinya inklusi hidrogen yang lebih besar pada sampel C ini akibat tidak terkontrolnya laju pendinginan pada saat pengecoran. Namun demikian hal ini belum dapat dikonfirmasi. Kondisi sampel C dengan porositasnya dianggap sebagai bagian dari kondisi awal sampel.



Gambar 4.2 Mikrostruktur pada paduan aluminium AC4B (a) tanpa penambahan Sr dan Ti, dan dengan penambahan (b) 0.02 wt. % Sr dan 0.0644 wt. % Ti, (c) 0.02 wt. % Sr dan 0.0855 wt. % Ti, (d) 0.02 wt. % Sr dan 0.103 wt. % Ti, yang memperlihatkan sebaran porositas. Preparasi menggunakan etsa reagen Keller.

Gambar 4.3 menampilkan mikrostruktur dari paduan aluminium AC4B tanpa dan dengan penambahan Sr dan Ti yang memperlihatkan perubahan jarak lengan dendrit (DAS). Dari gambar tersebut terlihat DAS pada sampel A lebih lebar dibandingkan dengan setelah dilakukan penambahan Sr dan Ti pada sampel B, C, dan D. Penambahan Sr dan Ti pada komposisi ini memberi efek struktur butirannya menjadi lebih halus yang ditandai dengan berkurangnya lebar lengan dendrit (DAS). Dalam penelitian ini tidak dilakukan perhitungan lebar DAS, namun dari penelitian yang dilakukan oleh Mohammad Azi Fallah *et al*^[36] untuk paduan aluminium AC4B hasil LPDC, melaporkan bahwa untuk Sr konstan pada komposisi 0.02 wt. % dan 0.063 wt. % Ti nilai DAS menurun sebesar 36.25 % dari 26.76 μm menjadi 17.06 μm untuk daerah tipis dan menurun sebesar 6.51 % dari 31.81 μm menjadi 29.74 μm untuk daerah tebal. Untuk komposisi 0.083 wt. % Ti nilai DAS menurun sebesar 16.65 % dari 17.06 μm menjadi 14.22 μm untuk daerah tipis dan menurun sebesar 5.25 % dari 29.74 μm menjadi 28.18 μm untuk daerah tebal. Sedangkan pada komposisi 0.108 wt. % Ti nilai DAS menurun sebesar 5.83 % dari 14.22 μm menjadi 13.39 μm untuk daerah tipis dan menurun sebesar 3.48 % dari 28.18 μm menjadi 27.20 μm untuk daerah tebal.

Secara garis besar, DAS mengalami penurunan dengan penambahan kandungan Ti di dalam paduan aluminium AC4B. Namun secara kualitatif berdasarkan Gambar 4.3, sampel D dengan kandungan Ti terbesar, yaitu 0.1030 wt. %, ukuran DAS terlihat lebih besar dibandingkan dengan sampel B dan C yang memiliki kandungan Ti lebih sedikit. Hasil ini berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh Mohammad Azi Fallah^[36]. Perbedaan ini kemungkinan besar disebabkan oleh perbedaan proses pengecoran yang digunakan oleh Mohammad Azi Fallah, yaitu LPDC. Sedangkan penulis menggunakan proses *gravity die casting* (GDC). Sampel AC4B hasil LPDC dipengaruhi oleh tekanan dalam proses pengecorannya, sedangkan pada GDC tidak ada pengaruh tekanan terhadap produk hasil pengecorannya. Sehingga diduga dalam proses pengecorannya, sampel dengan proses GDC dapat mengalami penurunan efektifitas Sr akibat peningkatan kandungan Ti di dalam paduan aluminium AC4B pada sampel D atau dikenal dengan istilah efek *poisoning*. Namun hal ini tidak dapat dikonfirmasi

secara eksperimental. Dalam penelitiannya, Hengcheng Liao *et al*^[38] melaporkan perubahan morfologi kristal silikon dari serat halus menjadi kasar mengindikasikan adanya interaksi antara Sr dan Ti, dimana terjadi penurunan efektifitas Sr dengan meningkatnya penambahan Al-5Ti-1B dalam paduan aluminium silikon. Dalam penelitian ini, hal yang sama dapat dilihat juga pada Gambar 4.4.d.

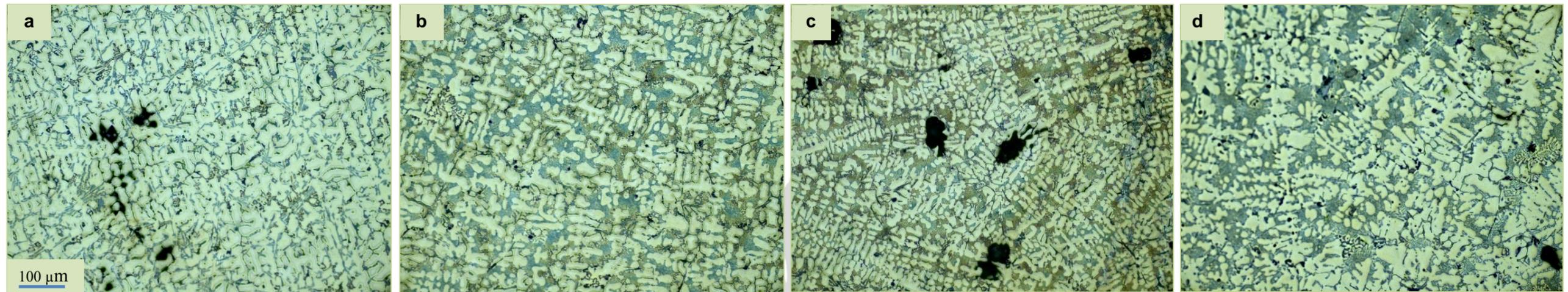
Gambar 4.4. menjelaskan tentang mikrostruktur paduan aluminium AC4B tanpa dan dengan penambahan Sr dan Ti yang memperlihatkan perubahan morfologi silikon. Pada sampel A paduan aluminium AC4B tanpa penambahan Sr dan Ti, kristal silikon berbentuk *acicular* seperti pelat tajam dan kasar. Setelah disamakan dengan literatur^[39], pada Gambar 4.4a dapat dilihat dalam bentuk ini matriksnya kaya akan aluminium (α -Al) berwarna putih kusam, adanya kristal Si seperti jarum kasar, dan fasa-fasa intermetalik yang terbentuk selama proses *casting*, yaitu pre-eutektik β -Al₅FeSi seperti jarum tebal dan lebar, Al₂Cu dalam bentuk blok berwarna coklat tua, eutektik Al-Al₂Cu, dan fasa α -Fe seperti *chinese script*. Gambar 4.4 b, c, dan d menampilkan morfologi mikrostruktur paduan aluminium AC4B kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dengan 0.0644, 0.0855, dan 0.103 wt. % Ti. Pada gambar tersebut setelah dilakukan penambahan Sr dan Ti terlihat beberapa perubahan mikrostruktur, yaitu: kristal silikon berubah dari *acicular* dan kasar menjadi bentuk *fibrous* yang lebih halus, α -Al secara signifikan berubah dari bentuk *columnar* menjadi *equiaxed*, dan fasa intermetalik seperti Al₂Cu dari *blocky* menjadi halus di wilayah interdendrit. KG. Basavakumar *et al*^[34] melaporkan dengan penambahan Al-1Ti-3B dan Sr bersama-sama di dalam paduan aluminium Al-7Si-2.5Cu akan mengubah mikrostrukturnya, yaitu butir α -Al dari *columnar* yang kasar menjadi α -Al *equiaxed* halus, kristal silikon dari bentuk pelat kasar menjadi halus, dan fasa intermetalik Al₂Cu dari ukuran besar menjadi lebih halus dan terbentuk di daerah interdendrit dan tersebar merata. Sedangkan L.Liu *et al*^[39] melaporkan perubahan mikrostruktur inilah yang dapat meningkatkan kekuatan mekanik paduan Al-Si.

0 wt. % Sr
0 wt. % Ti

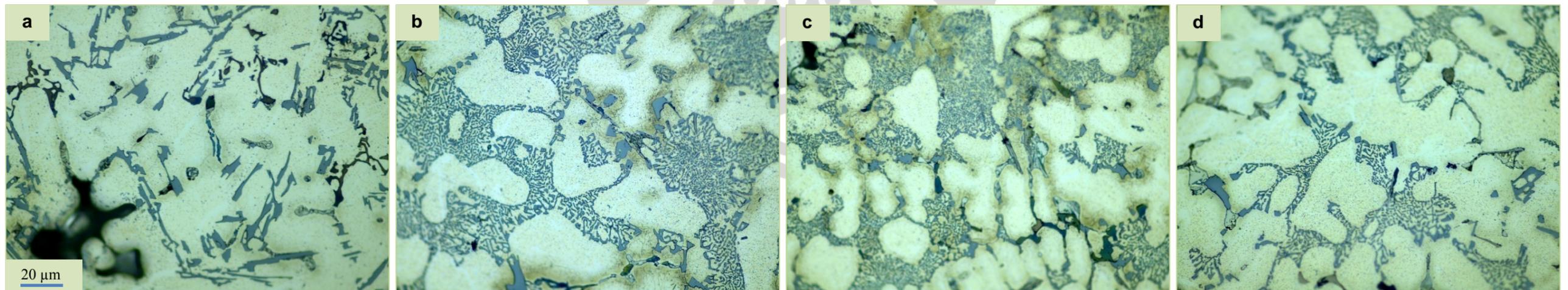
0.02 wt. % Sr
0.0644 wt. % Ti

0.02 wt. % Sr
0.0855 wt. % Ti

0.02 wt. % Sr
0.103 wt. % Ti



Gambar 4.3 Perubahan mikrostruktur pada paduan aluminium AC4B sebelum dan setelah penambahan Sr dan Ti, (a) tanpa penambahan, (b) 0.02 wt. % Sr dan 0.0644 wt. % Ti, (c) 0.02 wt. % Sr dan 0.0855 wt. % Ti, (D) 0.02 wt. % Sr dan 0.1030 wt. % Ti yang memperlihatkan perubahan DAS.

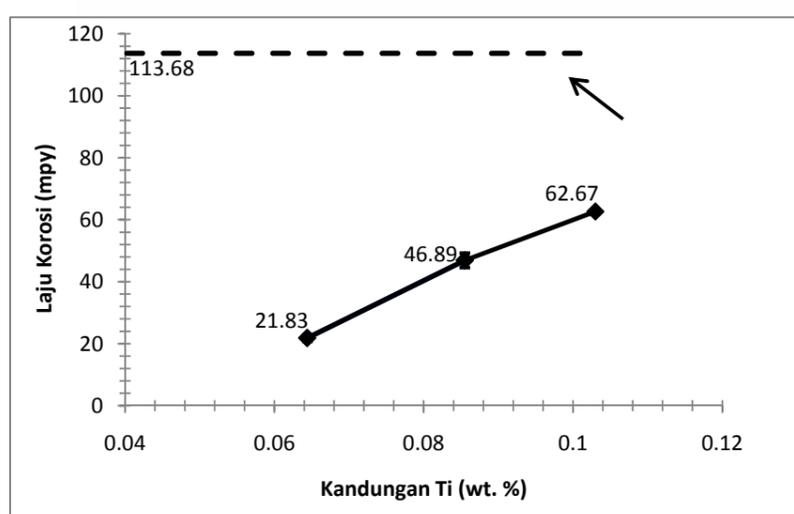


Gambar 4.4 Perubahan mikrostruktur pada paduan aluminium AC4B sebelum dan setelah penambahan Sr dan Ti, (a) tanpa penambahan, (b) 0.02 wt. % Sr dan 0.0644 wt. % Ti, (c) 0.02 wt. % Sr dan 0.0855 wt. % Ti, (d) 0.02 wt. % Sr dan 0.1030 wt. % Ti yang memperlihatkan perubahan morfologi silikon.

4.2 Pengaruh Sr dan Ti Terhadap Laju Korosi Paduan AC4B Melalui Pengujian Polarisasi

Gambar 4.5 menunjukkan pengaruh kandungan Ti dan 0.02 wt. % Sr terhadap laju korosi hasil polarisasi pada paduan aluminium AC4B dalam media H_2SO_4 4 %, 0.75 M *aerated*. Dari gambar tersebut terlihat paduan aluminium AC4B tanpa penambahan Sr dan Ti memiliki laju korosi tertinggi. Sedangkan pada kombinasi komposisi Sr konstan 0.02 wt. %, dengan semakin naiknya kandungan Ti dalam paduan akan meningkatkan laju korosinya.

Berdasarkan hasil polarisasi, sampel A tanpa penambahan Sr dan Ti memiliki laju korosi sebesar 113.68 mpy. Dibandingkan dengan sampel A, laju korosi pada paduan aluminium AC4B dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dengan 0.0644 wt. % Ti turun sebesar 80.8 %, yaitu dari 113.68 mpy menjadi 21.83 mpy. Sedangkan pada komposisi 0.0855 wt. % Ti, laju korosi naik sebesar 53.44 % dari 21.83 mpy menjadi 46.89 mpy. Pada komposisi 0.103 wt. % Ti laju korosi naik sebesar 25.18 %, dari 46.89 mpy menjadi 62.67 mpy. Data mentah dari pengujian laju korosi melalui polarisasi ini dapat dilihat pada Lampiran 3.



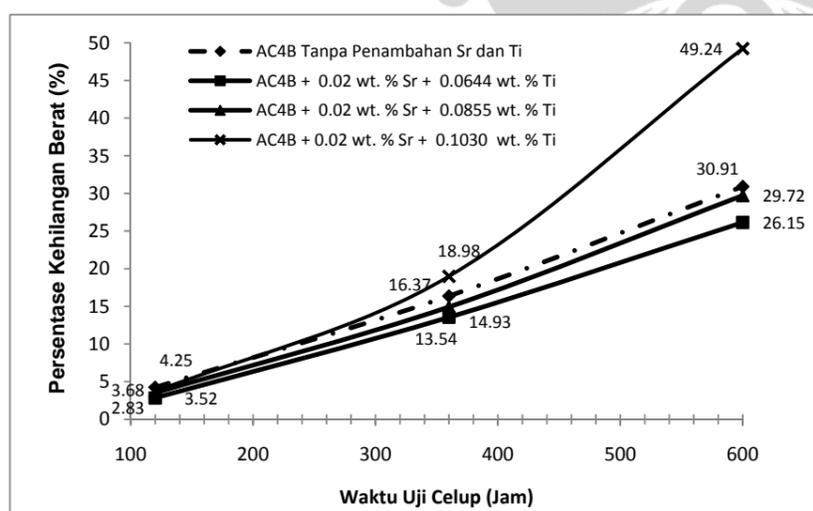
Gambar 4.5 Pengaruh kandungan Ti dan 0.02 wt. % Sr terhadap laju korosi hasil polarisasi pada paduan aluminium AC4B dalam media H_2SO_4 4 % 0.75 M *aerated*.

Tingginya laju korosi pada sampel A diduga karena pengaruh morfologi kristal silikon yang berada dalam bentuk pelat tajam. Ketika berada dalam bentuk ini, terjadi konsentrasi tegangan di dalam struktur paduan aluminium tersebut. Konsentrasi tegangan ini dapat menyebabkan lemahnya ketahanan korosi ketika permukaan sampel A terekspos dengan media korosif dalam hal ini H_2SO_4 dengan konsentrasi 4 %. Berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh Wislei R. Osorio *et al.*^[40] yang melaporkan bahwa setelah dilakukan pengujian ketahanan korosi dengan *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS), ketahanan korosi paduan Al-Si hipoeutektik tanpa penambahan *modifier* lebih tinggi dibandingkan dengan setelah penambahan *modifier*. Mereka melaporkan fenomena ini disebabkan oleh pengaruh mikrostruktur paduan Al-Si. Ketika tidak dimodifikasi, fasa paduan tersebut kaya akan α -Al dan Si berada dalam bentuk pelat. Sedangkan setelah dimodifikasi, kristal silikon berubah menjadi serat halus sehingga batas permukaan fasa α -Al dan Si meningkat. Peningkatan batas permukaan fasa α -Al dan Si menyebabkan Al-Si yang termodifikasi lebih cenderung terserang korosi. Sementara dalam penelitian ini, dilakukan penambahan penghalus butir Ti bersama-sama dengan Sr, ternyata ketahanan korosi menjadi lebih baik terhadap paduan aluminium AC4B yang tergolong sebagai Al-Si hipoeutektik. Namun dengan kandungan Sr yang sama, yaitu 0.02 wt. % Sr, dengan naiknya kandungan Ti dalam paduan AC4B menyebabkan turunnya ketahanan korosi pada sampel B, C, dan D. Fenomena ini kemungkinan besar disebabkan oleh unsur Ti yang berperan sebagai penghalus butir, sehingga daerah antar dendrit menjadi lebih luas, yang artinya terjadi pengumpulan fasa intermetalik di batas butir. Keadaan ini membuat wilayah di batas butir menjadi lebih lemah dan lapisan oksida di titik ini lebih mudah larut ketika terekspos H_2SO_4 . Teori ini didukung juga oleh analisis mikrostruktur dari keempat komposisi paduan aluminium AC4B pada sub bab 4.1.3. Sementara ini diduga kandungan 0.02 wt % Sr dan 0.0644 wt. % Ti merupakan kondisi optimum ketahanan korosi paduan aluminium AC4B.

4.3 Pengaruh Sr dan Ti Terhadap Ketahanan Korosi dengan Metode Uji Celup

4.3.1 Pengaruh Kandungan Sr dan Ti Terhadap Kehilangan Berat Paduan AC4B

Gambar 4.6 menunjukkan hasil uji celup paduan AC4B dalam larutan H_2SO_4 4 % *aerated* untuk masing-masing kombinasi komposisi Sr dan Ti dengan interval waktu 120, 360, dan 600 jam. Pengujian korosi dengan metode uji celup ini dilakukan untuk melihat laju korosi dari paduan aluminium AC4B berdasarkan kehilangan berat.



Gambar 4.6 Pengaruh kandungan Ti dan 0.02 % wt. Sr terhadap kehilangan berat paduan aluminium AC4B pada uji celup dalam media H_2SO_4 4 % 0.75 M *aerated*.

Dari Gambar 4.6 dapat diketahui bahwa persentase kehilangan berat mengalami peningkatan seiring dengan lama waktu pengujian. Data mentah dapat dilihat pada Lampiran 4. Pada pengujian dengan durasi 120 jam, persentase kehilangan berat sampel A, B, C, dan D berturut-turut adalah 4.25, 2.83, 3.52, dan 3.68 wt. %. Pada durasi 360 jam persentase kehilangan berat sampel A, B, C, dan D berturut-turut adalah 16.37, 13.54, 14.93, dan 18.98 wt. %. Pada durasi 600 jam, persentase kehilangan berat sampel A, B, C, dan D berturut-turut adalah 29.72, 26.15, 30.91 dan 49.24 wt. %. Dari data tersebut, dapat diketahui pada

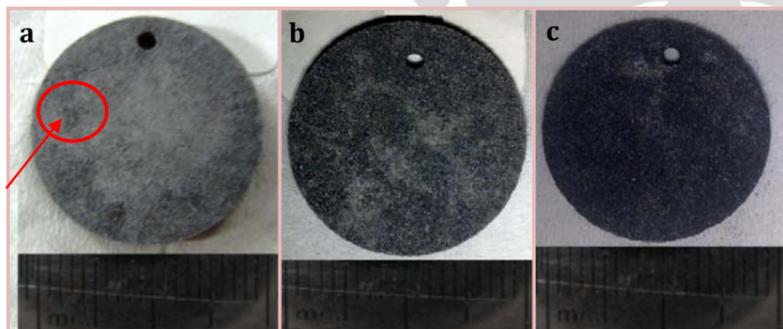
durasi 120 jam, sampel A memiliki persentase kehilangan berat paling besar. Namun pada durasi 360 - 600 jam, sampel D dengan kandungan 0.1030 wt. % Ti mengalami kehilangan berat paling besar. Secara keseluruhan dari durasi 120 – 600 jam waktu uji celup, sampel B dengan kandungan 0.0644 wt. % Ti memiliki ketahanan korosi paling baik. Fenomena ini disebabkan oleh komposisi Ti yang terdapat dalam paduan aluminium AC4B tanpa penambahan Sr dan Ti sangat sedikit dan komposisi Sr hampir tidak ada sehingga ketahanan korosi menjadi sangat rendah pada paduan aluminium ini.

Unsur Sr sebagai *modifier* berfungsi untuk mengubah morfologi silikon eutektik dari bentuk *acicular flakes* menjadi *fibrous* sehingga meningkatkan sifat mekanik terutama kekerasan dan elongasi, sedangkan Ti berfungsi untuk menghaluskan butir. Tidak adanya unsur Sr di dalam paduan aluminium tersebut menyebabkan morfologi porositas mikronya tidak beraturan dan pertumbuhannya mengikuti permukaan sel eutektik dan bercabang. Selain itu tanpa adanya unsur Sr, porositas yang memang sudah ada akibat proses casting jadi tidak tersebar dan berkumpul pada bagian-bagian tertentu dalam paduan aluminium AC4B ini. Hal di atas dapat dijelaskan dengan bantuan foto mikrostruktur yang terdapat pada Gambar 4.3. Pada Gambar 4.3 tersebut perbedaan morfologi mikrostruktur antara sebelum dan setelah penambahan Sr dan Ti dapat terlihat dengan jelas. Tanpa adanya Sr, kristal silikon berada dalam bentuk pelat tajam (*acicular*) terjadi konsentrasi tegangan di permukaan paduan aluminium tersebut. Sedangkan tanpa adanya Ti matriks α -Al masih berada dalam bentuk *columnar* dan kasar, fasa intermetalik seperti Al_2Cu masih dalam bentuk *blocky* besar, dan kehomogenannya masih rendah^[34]. Diduga faktor tersebut merupakan penyebab rendahnya ketahanan korosi pada paduan aluminium AC4B tanpa penambahan Sr dan Ti sehingga persentase pengurangan beratnya menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan paduan aluminium AC4B dengan penambahan 0.02 wt % Sr dan 0.0644, 0.0855 wt. % Ti. Namun dengan kandungan Ti yang lebih tinggi lagi, yaitu pada sampel D dengan komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.1030 wt. % Ti, ketahanan korosi semakin memburuk.

Dalam penelitiannya, KG. Basavakumar *et al*^[34] melaporkan penambahan Ti bersama-sama dengan Sr akan mengubah mikrostruktur paduan aluminium, yaitu butir α -Al dari *columnar* yang kasar menjadi α -Al *equiaxed* halus, kristal silikon dari bentuk pelat kasar menjadi halus, dan fasa intermetalik Al₂Cu dari ukuran besar menjadi lebih halus yang terbentuk di daerah interdendrit dan tersebar merata. Sedangkan Chen Tijun *et al*^[41] dalam penelitiannya melaporkan bahwa Ti dapat menurunkan ketahanan korosi dan terdapat beda potensial yang sangat besar antara α -Al dan fasa Al₂Cu. Al₂Cu memiliki potensial kelarutan -440 mV ECS dan matriks α -Al -750 mV^[20]. Dalam penelitiannya, Sibel Zor *et al*^[42] melaporkan fasa intermetalik Al₂Cu lebih *noble* dibandingkan dengan fasa α -Al dan dapat menyebabkan terjadinya korosi galvanik mikrosel ketika kedua fasa ini berada dalam satu mikrostruktur. Meningkatnya jumlah Ti dalam paduan AC4B mengakibatkan penyebaran fasa intermetalik Al₂Cu semakin merata. Diduga hal ini yang merupakan faktor menurunnya ketahanan korosi dengan meningkatnya kandungan Ti. Selain itu dengan penambahan Ti porositas mikro di dalam paduan AC4B semakin tersebar ke seluruh permukaan, hal ini dapat dilihat dari foto mikro pada Gambar 4.3.

Ketika terekspos pada lingkungan yang korosif, yaitu H₂SO₄ dengan konsentrasi 4 % 0.75 M *aerated*, korosi cenderung akan menyerang lapisan pasif di titik-titik terlemah paduan aluminium. Lapisan pasif yang melindungi permukaan paduan aluminium AC4B pada bagian yang poros akan lebih cepat larut karena terjadi inisiasi sumuran (*pit inisiation*) di titik ini. Dalam penelitiannya, Sibel Zor *et al*^[42] melaporkan fasa α -Al lebih anodik dibandingkan dengan fasa intermetalik, sehingga korosi akan terjadi pada fasa α -Al yang mengelilingi fasa intermetalik. Korosi sumuran terjadi ketika lingkungan cairan mengandung ion pelarut seperti klorida, sulfat, atau nitrat. Mekanisme ini dibagi ke dalam 2 tahap^[20]. Pertama, lapisan oksida pasif dilarutkan melalui interaksi dengan ion pelarut. Reaksi ini biasanya terjadi pada sisi aktif (inklusi Al₂Cu atau Al₃Fe). Kedua, bahan aluminium bagian dalam bereaksi kuat dengan ion pelarut dan membentuk suatu pit (lubang). Hal ini ditunjukkan dari pengamatan foto mikro bahwa adanya sumuran di permukaan paduan aluminium AC4B baik tanpa

maupun dengan penambahan Sr dan Ti ketika terekspos selama 120 jam di dalam larutan H_2SO_4 . Setelah terekspos selama 360 jam, lapisan pasif yang melindungi permukaan paduan aluminium AC4B dipasti hampir seluruhnya larut sehingga korosi dapat menyerang seluruh permukaan secara merata. Ini ditunjukkan dengan jenis korosi pada permukaan paduan aluminium AC4B sebagai *uniform corrosion*. Gambar 4.7 menunjukkan perbandingan bentuk permukaan paduan aluminium AC4B sesudah dilakukan pengujian pada masing-masing interval waktu yang diwakili oleh sampel B. Dari gambar tersebut terlihat sumuran yang di area yang di beri tanda panah.



Gambar 4.7 Pengamatan visual morfologi permukaan paduan aluminium AC4B dengan komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.0644 wt. % Ti setelah terekspos selama: a) 120, b) 360, dan c) 600 jam dalam H_2SO_4 4 % 0.75 M aerated.

Pengaruh kombinasi komposisi Sr dan Ti terhadap distribusi porositas paduan aluminium AC4B pernah dilakukan oleh Mohammad Azi Falah^[36] dan Nike Lestari^[37]. Pada penelitiannya Azi menemukan bahwa pada kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr konstan dan 0.063, 0.083 wt. % Ti nilai porositas masing-masing meningkat dengan volume fraksi porositas 9 dan 11 % dibandingkan dengan komposisi normal yang memiliki volume fraksi porositas 3.5 %. Sedangkan pada kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr konstan dan 0.103 wt. % Ti volume fraksi porositasnya meningkat dibandingkan komposisi normal dari 3 % menjadi 9 %. Porositas ini terjadi pada hasil coran paduan Al-Si umumnya dikarenakan adanya gas hidrogen berlebih yang mengendap pada aluminium cair^[19]. Penambahan Sr menyebabkan tegangan aluminium cair menurun dan membuat permukaannya menjadi lebih encer sehingga memudahkan gas hidrogen

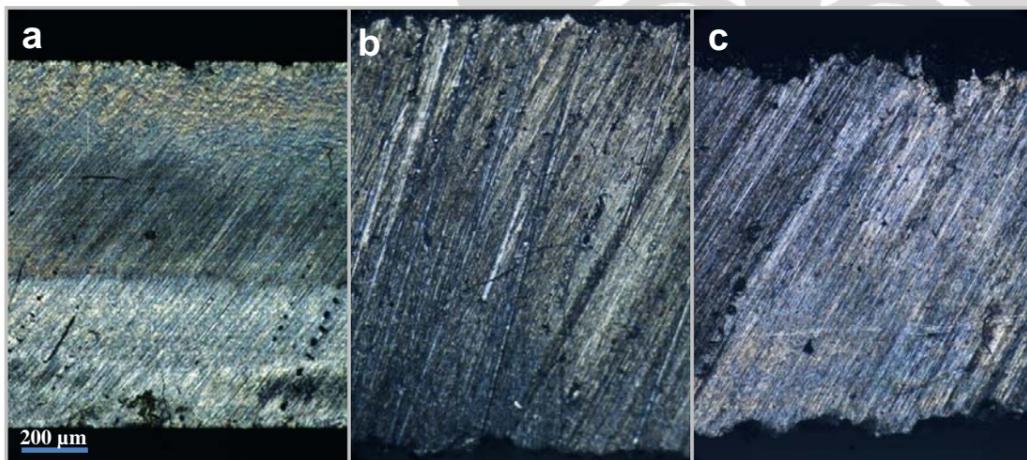
masuk ke dalam aluminium cair dan menimbulkan porositas. Meningkatnya penambahan Ti dalam paduan aluminium AC4B akan membuat butiran semakin halus dan luas permukaan butir makin meningkat. Morfologi permukaan yang poros dan meningkatnya luas permukaan butir menyebabkan korosi semakin mudah menyerang paduan aluminium di daerah batas butir, sehingga dengan meningkatnya persentase Ti dalam paduan aluminium AC4B dengan persentase Sr konstan menyebabkan ketahanan korosinya semakin tinggi. Pada penelitian ini ditemukan bahwa dengan komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.0644 wt. % Ti diperoleh persentase kehilangan berat paling kecil dan pada komposisi ini paduan aluminium AC4B memiliki ketahanan korosi paling baik.

Berbeda dengan penelitian sejenis yang dilakukan oleh Hengcheng Liao *et al*^[9] mengenai pengaruh modifikasi sodium dan stronsium dalam Al – 11.7 wt. % Si terhadap ketahanan korosi, Hengcheng melaporkan bahwa paduan aluminium Al-11.7 wt. % Si tanpa penambahan Sr memiliki ketahanan korosi paling baik dibandingkan dengan modifikasi Sr. Hasil pengujian celup yang dilakukan selama rentang waktu 120 – 600 jam menunjukkan modifikasi Sr menurunkan ketahanan korosi sebesar 13 %, sedangkan tanpa modifikasi turun sebesar 6.10 %. Perbedaan ini kemungkinan besar disebabkan pada pengujiannya Hengcheng tidak menambahkan unsur Ti sebagai penghalus butir, sehingga ketahanan korosinya juga berbeda. Ketahanan lapisan oksida terhadap serangan korosi dipengaruhi juga oleh komposisi unsur paduan dalam logam. Dari perbandingan hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan 0.02 wt. % Sr dan 0.0644 – 0.0855 wt. % Ti dapat meningkatkan ketahanan korosi pada paduan aluminium silikon.

4.3.2 Pengaruh Waktu Uji Celup Terhadap Kedalaman Korosi

Gambar 4.8 menampilkan foto mikro kedalaman korosi pada paduan AC4B dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.0644 wt. % Ti setelah melewati uji celup pada rentang waktu 120 sampai 600 jam. Dari gambar tersebut terlihat bahwa semakin lama paduan aluminium AC4B terekspos di dalam larutan H₂SO₄, maka kerusakan akibat serangan korosi pada permukaan logam semakin tinggi. Dari pengamatan menggunakan mikroskop, kedalaman korosi

pada sampel B yang dapat diukur pada waktu ekspos 120, 360, dan 600 jam adalah sebesar 34 – 92 μm , 82 – 198 μm , dan 209 – 523 μm .



Gambar 4.8 Foto makro kedalaman korosi paduan aluminium AC4B hasil uji celup dalam H_2SO_4 4 % 0.75 M *aerated* selama (a) 120 jam, (b) 360 jam, dan (c) 600 jam.

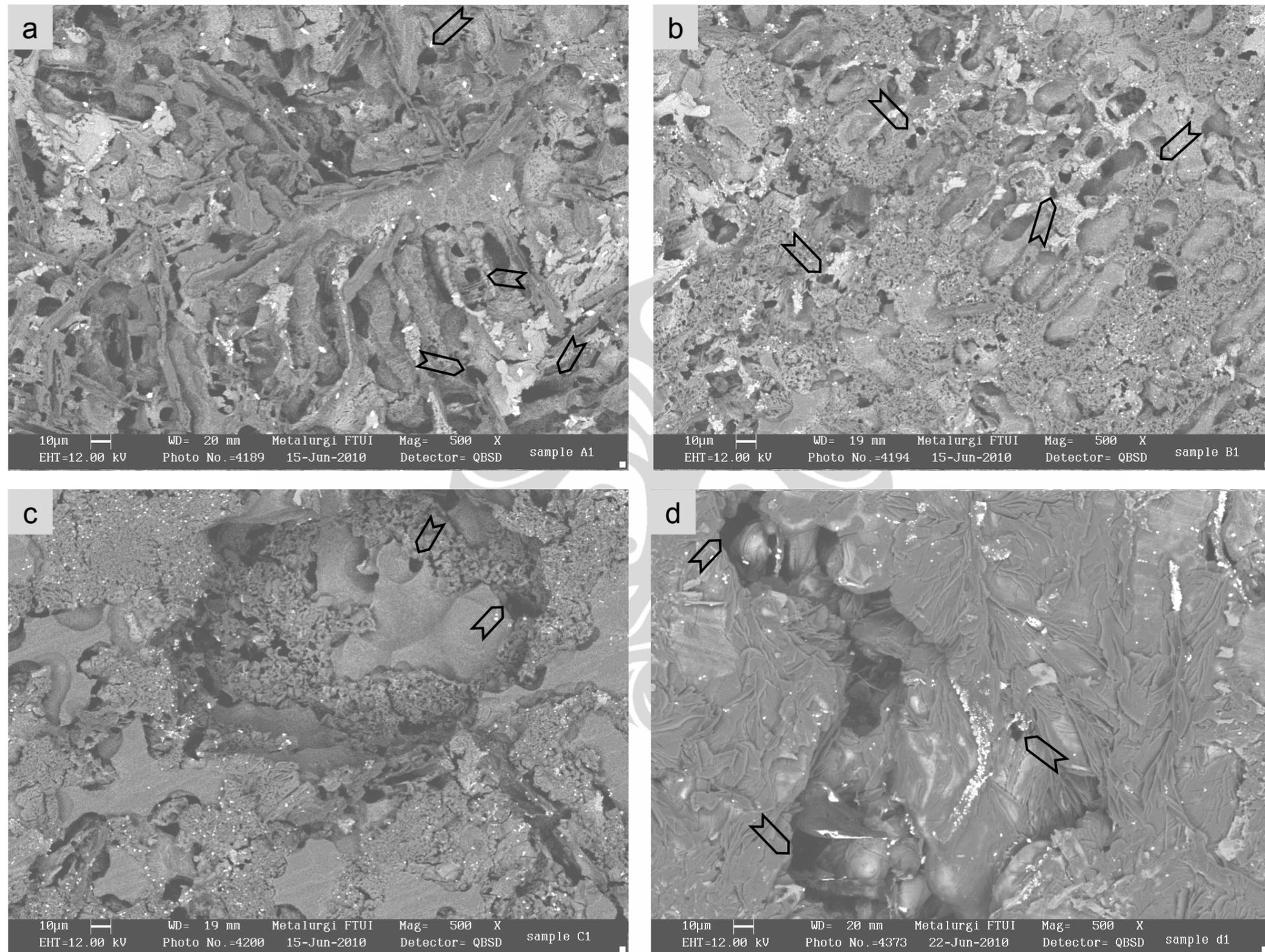
Kedalaman korosi ini masih lebih rendah jika dibandingkan dengan kedalaman sumuran akibat terekspos media garam NaCl pada interval waktu 108 jam. Ini menunjukkan bahwa lapisan oksida paduan aluminium AC4B lebih lemah bertahan dalam lingkungan yang mengandung ion Cl^- dibandingkan dengan lingkungan yang mengandung ion SO_4^{2-} . Fenomena ini sesuai dengan literatur^[20,42]. Dari Gambar 4.8 tersebut ditemukan korosi sumuran mengawali rusaknya lapisan oksida yang melindungi paduan aluminium pada waktu uji 120 jam. Semakin lama terekspos dalam larutan H_2SO_4 lapisan oksida yang melindungi permukaan logam makin menipis dan serangan korosi di seluruh permukaan logam semakin gencar. Sehingga pada waktu ekspos 360 jam lapisan oksida pelindung larut secara keseluruhan yang ditandai oleh kerusakan secara merata di permukaan logam. Kerusakan semakin parah pada interval waktu ekspos 600 jam dan ditandai dengan semakin tingginya persentase kehilangan berat dari paduan aluminium AC4B tersebut. Pada rentang waktu 360 – 600 jam serangan korosi yang terjadi adalah korosi *uniform*.

4.3.3. Pengamatan Mikrostruktur Produk Korosi Hasil Uji Celup dengan SEM dan EDS

Hasil pengamatan dengan SEM dapat dibedakan melalui morfologi, warna dan komposisi kimia dari fasa yang terbentuk. Identifikasi fasa-fasa tersebut dilakukan dengan menggunakan EDS. Data mentah hasil SEM dan EDS untuk pengujian celup ini tersedia dalam Lampiran 5. Gambar 4.9 menampilkan morfologi permukaan sampel A, B, C, dan D setelah melalui proses uji celup selama 120 jam, sedangkan data hasil EDS untuk pengujian ini dapat dilihat pada Table 4.2. Berdasarkan Gambar 4.9 a, b, c, dan d terlihat perbedaan morfologi permukaan sampel yang tertutup produk korosi. Gambar 4.9a yang merupakan hasil SEM untuk sampel A tanpa penambahan Sr dan Ti, morfologi produk korosinya memanjang dan padat. Setelah disamakan dengan literatur^[42] dan hasil EDS, dianalisis bahwa mikrostruktur paduan AC4B terdiri dari θ -fasa, yaitu Al_2Cu berwarna abu-abu muda yang dikelilingi oleh fasa α -aluminium eutektik berupa lempengan yang berwarna abu-abu gelap. Fasa α -Al ini lebih anodik daripada θ -fasa Al_2Cu , sehingga korosi terjadi pada fasa α -Al^[42]. Hal ini dapat dilihat jelas pada Gambar 4.9a, dimana dalam gambar tersebut tampak lubang-lubang hitam (*black holes*) yang ditunjukkan dengan tanda panah. Lubang hitam tersebut diduga merupakan korosi sumuran yang terjadi dalam fasa α -Al yang mengelilingi θ -fasa Al_2Cu , sementara itu θ -fasa Al_2Cu tidak terkorosi.

Pada Gambar 4.9 b, c, dan d yang merupakan hasil SEM sampel B, C, dan D dengan kandungan 0.02 wt. % Sr dan variasi 0.0644, 0.0855, dan 0.1030 wt. % Ti, tampak perbedaan morfologi produk korosi yang cukup jelas. Pada sampel B tampak θ -fasa Al_2Cu berwarna abu-abu terang tersebar merata. Dilihat secara visual, ukurannya lebih kecil dibandingkan ketika berada pada sampel A. Ini merupakan efek dari penambahan Ti pada paduan aluminium AC4B. Diduga awal korosi sumuran terjadi pada fasa α -Al yang mengelilingi θ -fasa Al_2Cu . Dari gambar ini tampak lubang yang terbentuk berukuran lebih kecil dan tersebar merata yang ditunjukkan dengan tanda panah.. Berdasarkan literatur^[43] bentuk karang-karang halus berwarna abu-abu muda berpori diduga merupakan fasa Al-Si eutektik yang tertutup produk korosi, dimana bentuk kristal silikonnya telah

berubah dari *acicular flakes* yang kasar menjadi *fibrous* halus yang merupakan efek penambahan Sr. Pada Gambar 4.9 c dan d yang merupakan hasil SEM untuk sampel B dan C terlihat lubang yang terbentuk lebih besar dibandingkan dengan sampel B dan terjadi pada fasa α -Al yang mengelilingi θ -fasa Al_2Cu .



Gambar 4.9 Mikrostruktur (SEM) pada paduan aluminium AC4B setelah melalui uji celup selama 120 jam, (a) sebelum ditambahkan Sr dan Ti, (b) 0.02 wt. % Sr dan 0.0644 wt. % Ti, (c) 0.02 wt. % Sr dan 0.0855 wt. % Ti, (d) 0.02 wt. % Sr dan 0.1030 wt. % Ti.

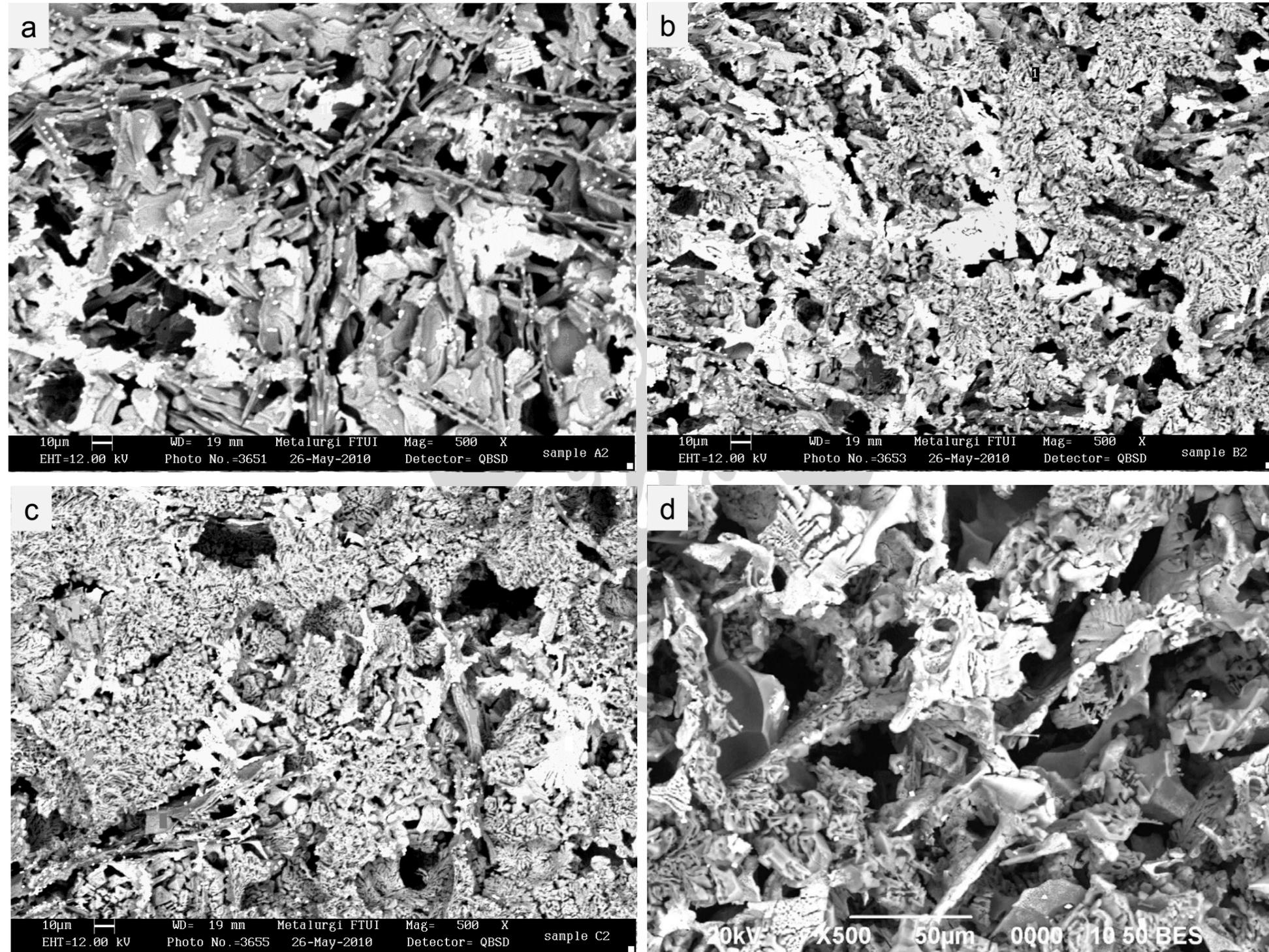
Tabel 4.2. Data EDS paduan aluminium AC4B setelah melalui uji celup selama 120 jam

Waktu Uji (Jam)	Sampel	No. Titik	Unsur (wt. %)															Elemen Lain	Warna	Fasa yang Mungkin
			O	Al	Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Sn	Cr	Sr	S	C			
120	A	1	3.19	11.58	0.18					2.69							1.66	Sisa	Abu-abu muda halus	Al ₂ O ₃ , segregasi Al, Ni, Si, Al ₂ (SO ₄) ₃
		2	0.43	0.99	81.27													Sisa	Abu-abu gelap	Al ₂ O ₃ segregasi Al, Segregasi Si.
		3	7.77	3.67	2.45	80.97					0.17						4.98	Sisa	Abu-abu muda berpori	Al ₂ Cu, AlSi, Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃ , segregasi Cu, Ti
		4	0.53	5.73	2.09	90.84												sisa	Putih keabuan	Al ₂ O ₃ , Al ₂ Cu, segregasi Cu
	B	1	1.79	30.08	0.90	66.30						0.16					0.44	sisa	Abu-abu terang	Al ₂ Cu, AlSi, Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃ , segregasi Cu, Ti
		2	2.55	79.04	3.16				0.44			0.09		0.03			0.70	sisa	Abu-abu gelap halus	α-Al, AlSi, Ti, Al ₂ (SO ₄) ₃ , segregasi Zn, Ti, Cr
		3	8.79	4.36	79.25	2.65	4.02	0.05							0.41			Sisa	Abu-abu muda berpori	Al ₂ O ₃ , Al ₂ Cu, MgO, Al-Si, segregasi Zn dan Cr
		4	18.71	15.98	2.24	47.10						0.01		0.35	1.07	14.53		Sisa	Putih keabuan	Al ₂ O ₃ , Al ₂ Cu, AlSrO

Lanjutan Tabel 4.2

Waktu Uji (Jam)	Sampel	No. Titik	Unsur (wt. %)														Elemen Lain	Warna	Fasa yang Mungkin	
			O	Al	Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Sn	Cr	Sr	S				C
120	C	1	2.94	87.30	2.23	6.72		0.2				0.17						Sisa	Abu-abu gelap halus	α -Al, AlSi, Al ₂ O ₃ , segregasi Ni
		2	24.49	8.55	51.33	6.54		0.56		0.56	0.29				6.38	1.29	Sisa	Abu-abu muda berpori	Al ₂ O ₃ , AlSi, Al ₂ (SO ₄) ₃ , segregasi Cu, Ni, Ti	
		3	8.18	22.96	2.87	61.65		0.86		0.51	0.21				2.38	0.38	Sisa	Putih keabu-abuan	Al ₂ O ₃ , Al ₂ Cu, segregasi Zn, Ni, Ti	
		4	7.65	23.39	3.04	62.88		0.06							2.49	0.50	Sisa	Abu-abu terang	Al ₂ Cu, AlSi, Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃ , segregasi Zn	
	D	1	44.94	31.40	0.70	8.25									14.70		Sisa	Putih terang	Al ₂ Cu, AlSi, Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃	
		2	60.75	12.45	0.28			0.46							26.07		Sisa	Abu-abu gelap kasar	Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃ , segregasi Si, Zn	
		3	52.44	21.66	0.80	7.75		0.41				0.16			16.76		Sisa	Abu-abu gelap halus	Al ₂ Cu, Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃ , segregasi Zn	
		4	26.62	24.95	0.85	36.03					0.22				11.32		Sisa	Abu-abu muda	Al ₂ Cu, AlSi, Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃ , segregasi Cu, Ti	

Gambar 4.10 merupakan hasil SEM yang menunjukkan morfologi mikrostruktur sampel A, B, C, dan D setelah melalui uji celup selama 360 jam dalam media H_2SO_4 4 % 0.75 M *aerated*. Sedangkan data EDS dapat dilihat pada Tabel 4.3. Dari Gambar 4.10 yang merupakan hasil SEM sampel A, B, C, dan D terlihat ada kesamaan morfologi permukaan produk korosinya dengan Gambar 4.9. Demikian juga dengan kemungkinan fasa-fasa yang terbentuk berdasarkan hasil EDS. Pada waktu ekspos 360 jam ini korosi yang terjadi semakin gencar dengan pertambahan waktu ekspos yang ditandai dengan semakin banyaknya lubang-lubang hitam (*black holes*) yang terbentuk sebagai efek korosi dan secara merata terjadi di permukaan sampel, sehingga dapat digolongkan sebagai korosi *uniform*. Perbedaan yang cukup signifikan terjadi pada sampel D, dimana kerusakan akibat korosi semakin parah pada waktu ekspos 360 dan 600 jam. Hal ini dapat dilihat dari Gambar 4.9d, 4.10d, dan 4.11d, dimana dari perbandingan gambar tersebut tampak secara visual lubang hitam yang terbentuk semakin banyak dan dalam. Ini menunjukkan dengan bertambahnya kandungan Ti di dalam paduan AC4B akan menurunkan ketahanan korosi. Fenomena ini diduga karena dengan bertambahnya Ti, daerah antar dendrit semakin luas dan terjadi pengumpulan fasa intermetalik Al_2Cu di wilayah batas butir. Keadaan ini membuat wilayah di batas butir menjadi lebih lemah dan lapisan oksida di titik ini lebih mudah larut ketika terekspos dengan larutan H_2SO_4 . Selain itu perbedaan potensial yang cukup besar antara fasa $\alpha\text{-Al}$ dengan Ti, yaitu -750 mV untuk Al dan -150 mV untuk Ti^[20] diduga berperan memicu terjadinya korosi mikro galvanik pada paduan AC4B ini ketika terekspos dalam H_2SO_4 .



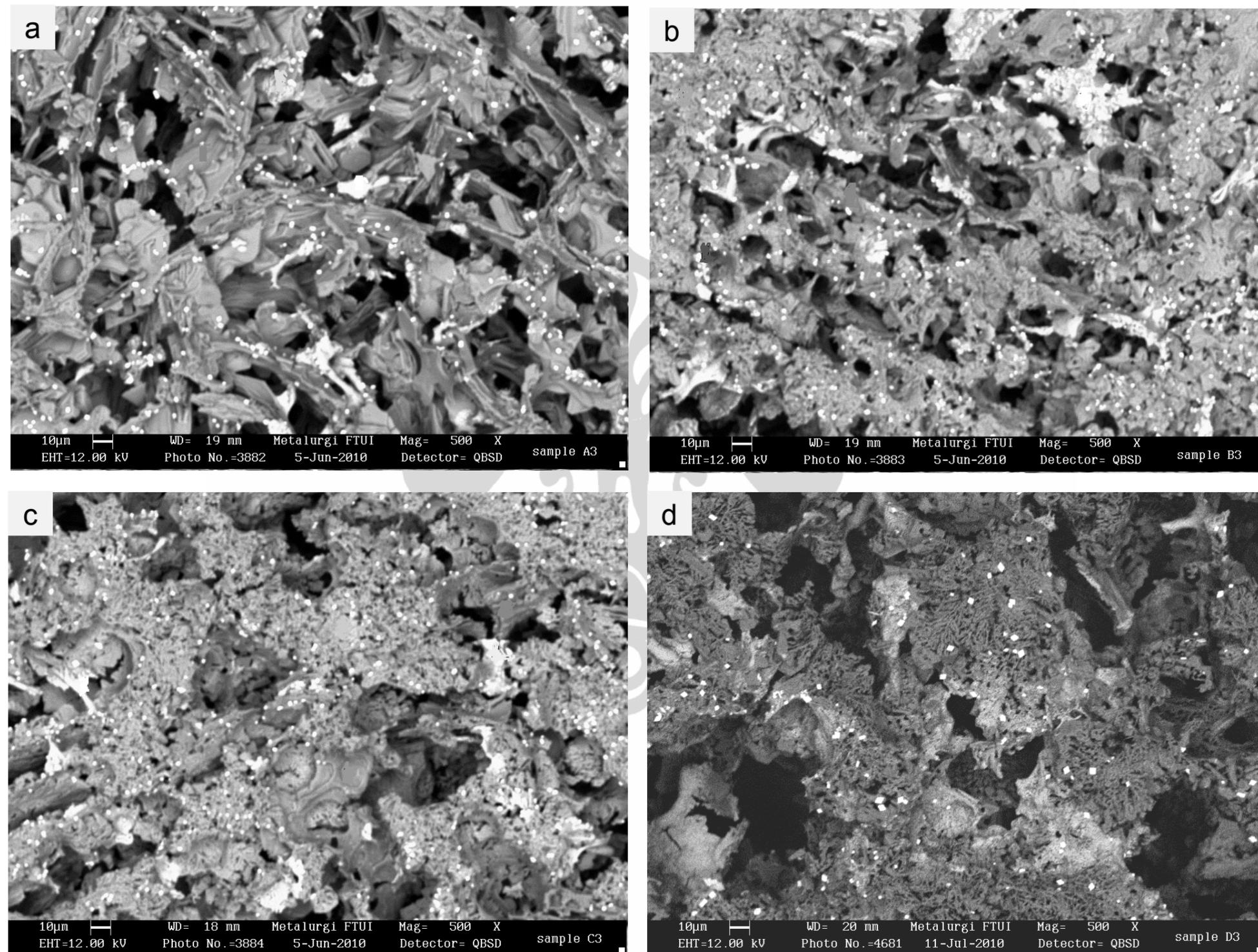
Gambar 4.10 Mikrostruktur (SEM) pada paduan aluminium AC4B setelah melalui uji celup selama 360 jam, (a) sebelum ditambahkan Sr dan Ti, (b) 0.02 wt. % Sr dan 0.0644 wt. % Ti, (c) 0.02 wt. % Sr dan 0.0855 wt. % Ti, (d) 0.02 wt. % Sr dan 0.1030 wt. % Ti.

Tabel 4.3. Data EDS paduan aluminium AC4B setelah melalui uji celup selama 360 jam

Waktu uji (Jam)	Sampel	No. Titik	Unsur (wt. %)														Elemen Lain	Warna	Fasa yang Mungkin			
			O	Al	Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Sn	Cr	Sr	S				C		
360	A	1	5.10	2.38	56.86	33.35													Sisa	Putih terang	Al ₂ Cu, AlSi, Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃ , segregasi Sn	
		2	5.12	4.97	29.04	57.86													Sisa	Abu-abu gelap halus	Al ₂ Cu, AlSi, Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃	
		3	0.27	0.47	3.40	95.3														Sisa	Putih keabuan	Al ₂ Cu, AlSi, Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃
		4	2.06	1.46	23.11	72.29														Sisa	Abu-abu gelap	Al ₂ Cu, AlSi, Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃
		5	0.20	1.06	34.87	62.89							0.48					0.20		Sisa	Abu-abu muda	Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃ , segregasi Sn
	B	1	4.93	0.76	72.63	16.53	0.05	0.01					1.73					3.35		Sisa	Abu-abu terang berpori	Al ₂ O ₃ , Al ₂ Cu, AlSi, Al ₂ (SO ₄) ₃ , Segregasi Sn, Zn, Al.
		2	0.85	1.70	3.93	91.57							0.12					1.84		Sisa	Putih terang	Al ₂ Cu, Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃ , segregasi Sn
		3	0.77	1.16	60.07	36.70			0.07	0.29			0.43					0.52		Sisa	Abu-abu muda berpori	Al ₂ (SO ₄) ₃ Al ₂ O ₃ , Al ₁₂ (Fe,Mn) ₃ Si, segregasi Sn
		4	13.90	4.91	19.43	48.65					0.27		1.65					11.19		Sisa	Putih keabuan halus	Al ₂ O ₃ , Al ₁₂ (Fe,Mn) ₃ Si, segregasi Sn, Al ₂ Cu, AlSi, Al ₂ (SO ₄) ₃
		5	1.44	0.79	15.56	79.25					0.12	0.02	0.92					2.00		Sisa	Abu-abu muda halus	Al ₂ O ₃ , Al ₁₂ (Fe,Mn) ₃ Si, segregasi Ti dan Sn

Lanjutan Tabel 4.3

Waktu uji (Jam)	Sampel	No. Titik	Unsur (wt. %)														Elemen Lain	Warna	Fasa yang Mungkin		
			O	Al	Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Sn	Cr	Sr	S				C	
360	C	1	6.22	0.90	78.10	9.75	0.04	0.37		0.49			1.10						Sisa	Abu-abu berpori	Al ₂ Cu, AlSi, Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃ , Al ₁₂ (Fe,Mn) ₃ Si segregasi Sn, Mg
		2	23.97	8.24	11.63	42.66		0.79		0.05		0.20	1.38						Sisa	Abu-abu terang halus	Al ₂ Cu, AlSi, Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃ , Al ₁₂ (Fe,Mn) ₃ Si segregasi Sn, Ti, Zn
		3	2.02	30.27	2.12	63.16					1.73	0.10	0.07						Sisa	Putih terang	Segregasi Ti, Ni, Al ₂ Cu, AlSi,
		4	0.31	4.06	0.97	92.79					0.18	1.39		0.13		0.02	0.14		Sisa	Abu-abu muda berserat halus	Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃ , Al ₁₂ (Fe,Mn) ₃ Si segregasi Sn dan Cu
		5	42.67	8.36	16.02	20.44		0.38		0.08	0.29		1.00				10.74		Sisa	Abu-abu tua halus	Al ₂ Cu, AlSi, Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃ , Al ₁₂ (Fe,Mn) ₃ Si segregasi Sn, Ti, Zn
D		1		95.11	4.89													Sisa	Abu-abu halus	α -Al, Si	
		2	16.69	3.89	69.42	5.18										4.82		Sisa	Abu-abu berpori	Al ₂ Cu, Al ₂ O ₃ , Al ₂ (SO ₄) ₃	
		3		33.78	5.08	59.07					2.08							Sisa	Putih berpori	Segregasi Al, Si, Cu, Ni	



Gambar 4.11 Mikrostruktur (SEM) pada paduan aluminium AC4B setelah melalui uji celup selama 600 jam, (a) sebelum ditambahkan Sr dan Ti, (b) 0.02 wt. % Sr dan 0.0644 wt. % Ti, (c) 0.02 wt. % Sr dan 0.0855 wt. % Ti, (d) 0.02 wt. % Sr dan 0.1030 wt. % Ti.

Tabel 4.4. Data EDS paduan aluminium AC4B setelah melalui uji celup selama 600 jam

Waktu uji (Jam)	Sampel	No. Titik	Unsur (wt. %)														Elemen Lain	Warna	Fasa yang mungkin	
			O	Al	Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Sn	Cr	Sr	S				C
600	A	1	4.47	22.43	5.31	65.41											2.38	Sisa	Bintik2 putih	$Al_2(SO_4)_3$, Segregasi Al, Si, Cu
		2	0.71	21.10	1.26	75.86			0.59		0.06						0.41	Sisa	Putih terang	Al_2Cu , $Al_2(SO_4)_3$, segregasi Cu, Fe, Ti
		3	8.78	2.52	70.09	11.50			1.21				2.99				2.91	Sisa	Abu-abu gelap	Al_3Fe , Al_2Cu , $Al_2(SO_4)_3$, segregasi Cu, Fe, Sn
		4	1.35	11.09	15.54	69.03					0.22						2.75	Sisa	Abu-abu muda	$Al_2(SO_4)_3$, AlSi, $TiAl_3$, segregasi Cu, Si, Al, Ti
	B	1	5.01	7.73	0.66	75.23				0.17	3.52		0.24		0.26	7.06	0.12	Sisa	Putih berpori	$Al_2(SO_4)_3$, Segregasi Al, Si, Cu, Ni, Sn, Sr
		2	7.21	4.62	20.92	60.74				0.10	0.60	0.10	0.26			5.27	0.16	Sisa	Abu-abu gelap berpori	Al_2O_3 , $Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$ segregasi Sn
		3	26.74	14.09	8.48	39.28			0.31	0.23	0.43		0.25			9.92	0.28	Sisa	Abu-abu gelap berserat	$Al_2(SO_4)_3$, Al_2O_3 , $Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$ segregasi Sn
		4	10.13	15.97	5.43	56.11					1.33	0.30	0.02		0.02	10.23	0.41	Sisa	Abu-abu muda halus	$Al_2(SO_4)_3$, Al_2O_3 , $TiAl_3$, segregasi Sn

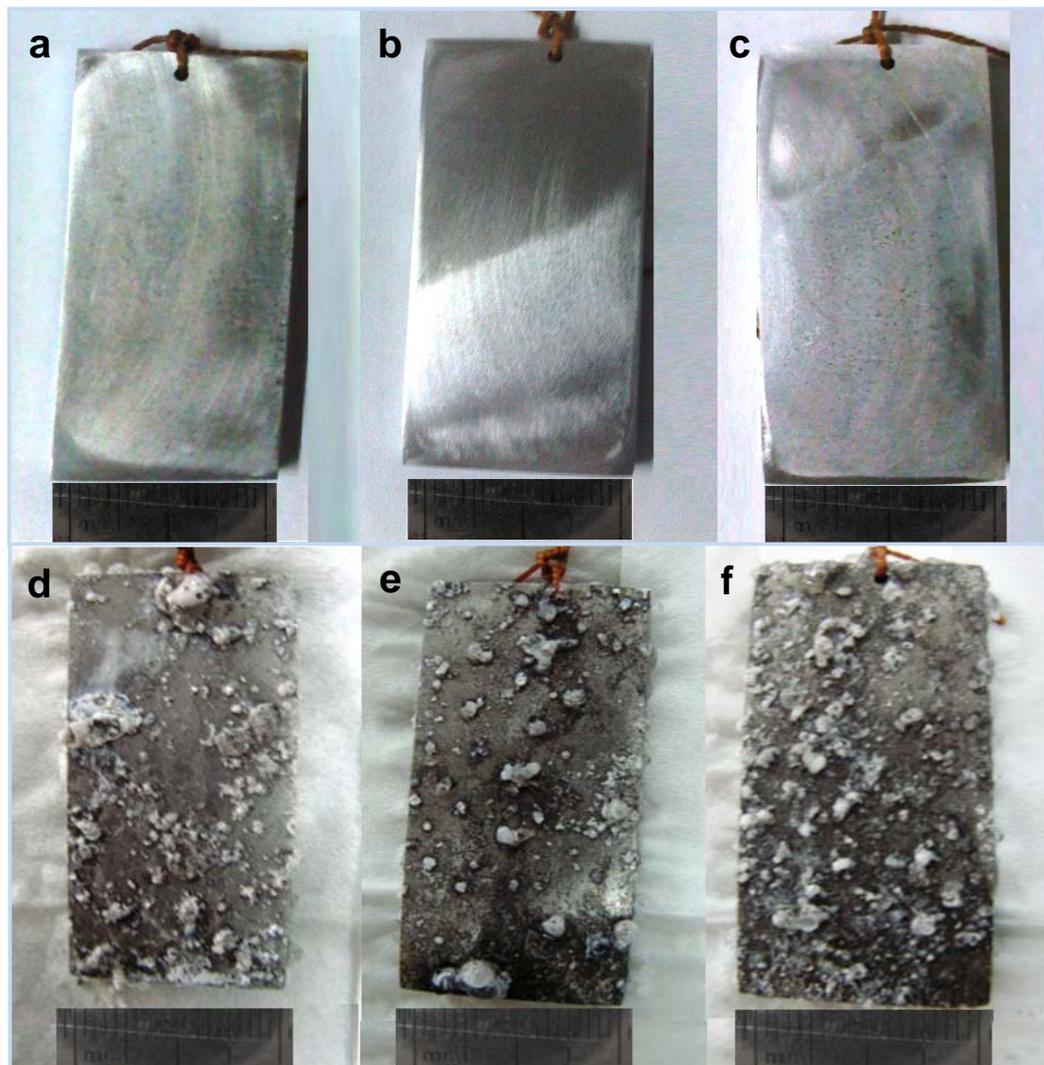
Lanjutan Tabel 4.4

Waktu uji (Jam)	Sampel	No. Titik	Unsur (wt. %)														Elemen Lain	Warna	Fasa yang mungkin	
			O	Al	Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Sn	Cr	Sr	S				C
600	C	1	1.73	4.13	42.55	45.88		0.25		0.63	0.03	0.26				4.38	0.16	Sisa	Abu-abu muda berpori	Al ₂ Cu, AlSi, Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃ , segregasi Zn, Ni, Ti, Sn
		2	55.74	5.56	22.72	10.31		0.89		0.14		0.68				3.65	0.30	Sisa	Abu-abu muda halus	Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃ , segregasi Zn, Ni, Sn
		3	0.68	8.94	3.87	86.00		0.11			0.05					0.31	0.05	Sisa	Bintik2 Putih	Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃ , segregasi Cu, Zn, Ti
		4	5.00	8.70	25.03	57.61		0.06			0.10	0.71				2.58	0.20	Sisa	Abu-abu gelap	Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃ , segregasi Cu, Zn, Ti, Sn
		5	1.68	33.34	1.70	61.18		1.40			0.18					0.43	0.10	Sisa	Putih terang	Al ₂ (SO ₄) ₃ , Al ₂ O ₃ , segregasi Cu, Zn, Ti

4.4. Pengujian Ketahanan Korosi dengan Metode Sembur Garam (*Salt Spray*)

4.4.1 Permukaan dan Produk Hasil Uji Sembur Garam

Gambar 4.12 menunjukkan morfologi permukaan paduan aluminium AC4B sebelum dan sesudah terekspos selama 108 jam dalam lingkungan garam NaCl 5% dengan suhu operasi $38 \pm 2^\circ\text{C}$ dan pH larutan 6.7.



Gambar 4.12 Morfologi permukaan paduan aluminium AC4B sebelum dan sesudah uji *salt spray* dengan larutan NaCl 5 % selama 108 jam pada $T = 38^\circ\text{C} \pm 2$ dan pH 7.1, (a) dan (d) tanpa penambahan Sr dan Ti, dan dengan kombinasi komposisi: (b) dan (e) 0.02 wt. % Sr + 0.0644 wt. % Ti, (c) dan (f) 0.02 wt. % Sr + 0.0855 wt. % Ti.

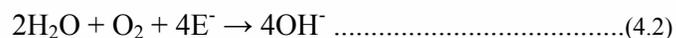
Dari gambar tersebut tampak produk korosi berwarna putih yang menempel pada permukaan paduan aluminium AC4B tanpa penambahan Sr dan Ti maupun dengan kombinasi komposisi 0.02 % wt. Sr dan 0.0644 wt. % Ti dan 0.0855 wt. % Ti. Uji *salt spray* dilakukan di laboratorium korosi selama 108 jam dengan kondisi pengoperasian alat maksimal selama 12 jam perhari, hal ini disebabkan alat uji *salt spray* tidak mendukung untuk dilakukannya pengujian secara kontinyu selama 108 jam. Ketika permukaan aluminium dan paduannya terekspos dalam lingkungan yang mengandung klorida, korosi yang terbentuk pada permukaan logam merupakan korosi sumuran. Pada pH antara 4 – 9 dalam suhu kamar sampai 80°C, sumuran dapat terjadi pada permukaan aluminium dan paduannya dengan kehadiran ion Cl^- [20].

Berbeda dengan logam lainnya, korosi pada aluminium dan paduannya lebih mudah dikenali karena korosi sumuran tertutupi oleh lepuhan gelatin putih dan tebal dari gel alumina $\text{Al}(\text{OH})_3$. Lepuhan ini lebih besar dari rongga dibawahnya. Mekanisme sumuran terjadi dalam dua tahap, yaitu tahap inisiasi dan propagasi [20]. Pada paduan aluminium AC4B inisiasi sumuran diawali ketika ion-ion klorida teradsorb pada lapisan oksida yang diikuti dengan rusaknya lapisan pelindung pada titik titik terlemah, yaitu pada daerah intermetalik (Al_2Cu , Al_3Fe , FeAlMn_6) [20]. Rusaknya lapisan oksida menyebabkan terbentuknya *micro crack* yang lebarnya hanya beberapa nanometer. Beberapa penelitian melaporkan bahwa inisiasi sumuran hanya terjadi dalam beberapa hari. Studi polarisasi menunjukkan ketika sumuran berhenti berkembang, maka mereka akan kembali pasif dan sumuran mulai menyerang area yang masih baru [23]. Secara perlahan oksigen makin berkurang di area intermetalik yang tertutup lapisan oksida paling sedikit. Saat lapisan ini rusak aluminium akan teroksidasi terus menerus dan terbentuk intermediet klorida AlCl_4^- [20]. Pada tahap propagasi reaksi kimia yang terjadi, yaitu [20]:

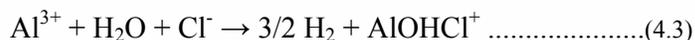
Pada bagian ujung lubang (anoda):



Pada bagian atas lubang (permukaan logam):



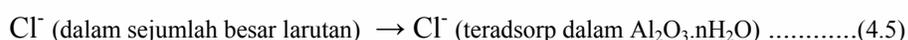
Elektron ditransfer melewati logam sehingga baik Al^{3+} maupun OH^- bereaksi membentuk presipitat $\text{Al}(\text{OH})_3$ berupa bubuk putih atau gel yang terbentuk di permukaan logam. Kation Al^{3+} yang terlarut pada lubang menyebabkan reaksi:



Klorida berlebih berdifusi dari lingkungan ke dalam pit (lubang) untuk menjaga tingkat perubahan elektrolit di dalam pit yang menyebabkan meningkatnya proses korosi yang berlangsung. Karena Al dapat bereaksi secara langsung dengan H^+ dan Cl^- , reaksi lain yang dapat terjadi adalah:



H_2 kemudian diproduksi dan memecahkan lebih banyak lapisan oksida pelindung permukaan. pH yang terjadi di dalam pit berkisar ± 3.5 . Fenomena yang serupa terjadi juga dengan kehadiran nitrat dan sulfat, tetapi korosinya lebih rendah. Ketika klorida dicampurkan dengan konsentrasi tinggi nitrat atau sulfat, anion-anion tersebut dapat berperan sebagai penghambat. Dalam penelitiannya, Faiza M. Al-Kharafi *et al*^[44] melaporkan ketebalan lapisan oksida akan meningkat pada saat pertama kali terekspos dalam media korosif, kemudian menurun sejalan dengan waktu. Perilaku ini disebabkan oleh adsorpsi anion-anion yang reaktif seperti NO_3^- dan Cl^- pada permukaan yang dilapisi oksida. Lapisan oksida pada permukaan logam berangsur-angsur terurai sebagai reaksi kimia antara ion-ion yang teradsorpsi dengan ion-ion aluminium pada lapisan oksida. Proses ini mengawali menipisnya lapisan oksida, dengan reaksi^[44]:

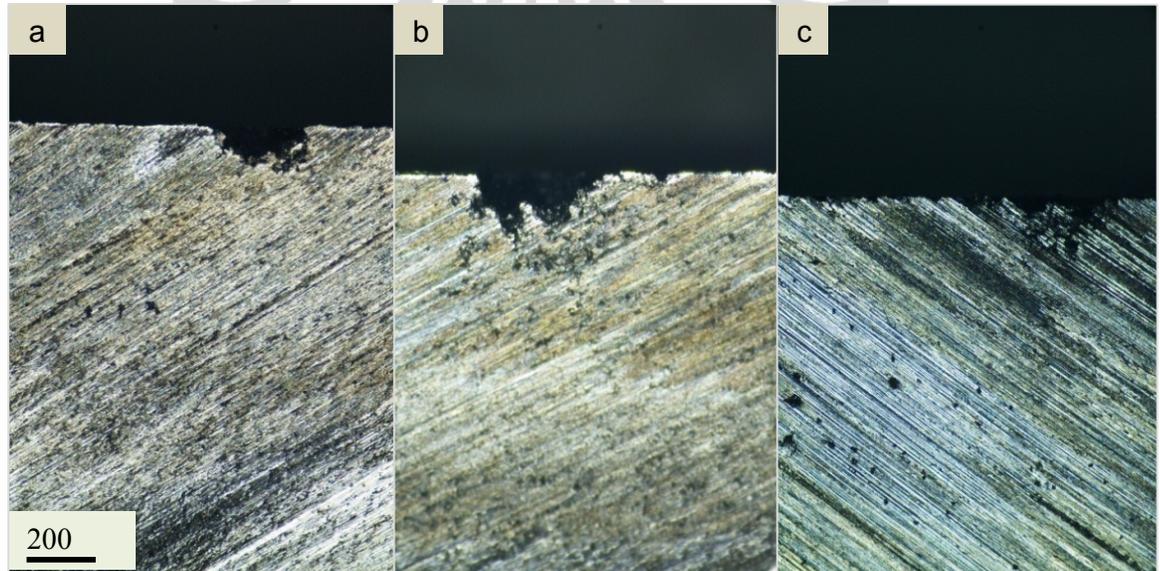


Pengamatan secara visual, setelah proses pencucian dengan air demineral, lepuhan putih yang menempel pada permukaan paduan aluminium AC4B ini tidak seluruhnya larut, masih ada lapisan tipis putih yang menutupi sebagian permukaan

logam. Namun korosi sumuran sudah dapat dilihat secara visual dengan bantuan cahaya yang cukup.

4.4.2 Pengaruh Waktu Uji *Salt Spray* Terhadap Kedalaman Korosi

Paduan aluminium AC4B yang telah dibersihkan dari produk karatnya, dipotong dengan arah melintang (*cross section*) tepat di bagian permukaan yang terbentuk sumuran. Pemotongan dilakukan dengan metode *low speed diamond* agar tidak merusak struktur sumurannya. Pengukuran kedalaman korosi dilakukan menggunakan mikroskop pengukur. Gambar 4.13 menampilkan bentuk korosi pada paduan aluminium AC4B untuk sampel A, B, dan C setelah dilakukan uji *salt spray* selama 108 jam. Dari hasil pengukuran diperoleh data kedalaman korosi pada sampel A tanpa penambahan Sr dan Ti adalah sebesar 35 – 305 μm . Kedalaman korosi pada sampel B dengan kandungan 0.0644 wt. % Ti adalah sebesar 35 – 449 μm , dan pada sampel C dengan kandungan 0.0855 wt. % Ti kedalaman korosinya sebesar 32 – 400 μm .



Gambar 4.13 Foto Makro Kedalaman Korosi Paduan Aluminium AC4B Hasil Uji *Salt Spray* (a) Sebelum Penambahan Sr dan Ti, dan dengan Penambahan (b) 0.02 wt. % Sr dan 0.0644 wt. % Ti, (c) 0.02 wt. % Sr dan 0.0855 wt. % Ti.

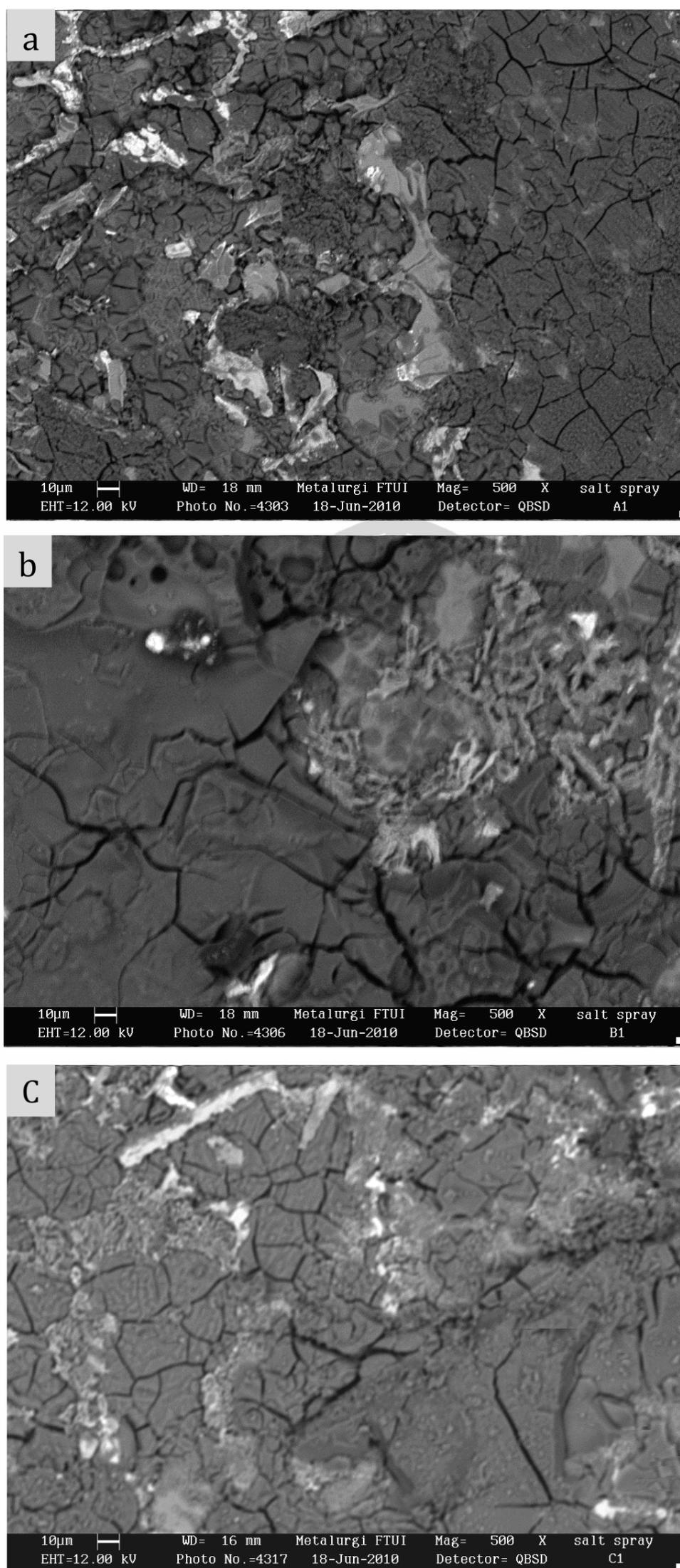
Ditinjau dari penampang sumuran, masing masing komposisi paduan aluminium AC4B memiliki bentuk penampang sumuran yang berbeda-beda. Berdasarkan variasi penampang sumuran yang ditampilkan pada Gambar 2.5, paduan aluminium AC4B tanpa penambahan Ti dan Sr memiliki bentuk lebar dan rendah, paduan dengan komposisi 0.0644 wt. % Ti berbentuk vertikal mengikuti mikrostrukturnya, sedangkan paduan dengan komposisi 0.0855 wt. % Ti memiliki bentuk seperti *undercutting*. Dalam penelitiannya, Hengcheng Liao *et al*^[9] melaporkan bahwa morfologi korosi kemungkinan berhubungan dengan orientasi dendrit α -Al pada paduan Al-Si. Dalam sampel yang tidak dimodifikasi, kristal silikon eutektik berada dalam bentuk *flakes*, sementara dendrit α -Al berukuran kasar dan tidak beraturan. Sedangkan pada sampel yang termodifikasi, partikel silikon eutektiknya berubah menjadi *fibrous* yang lebih halus. Selama terekspos dalam media NaCl, sumuran pada permukaan bergerak maju searah dengan ketebalan lempengan. Oleh sebab itu dikatakan arah perkembangan kedalaman sumuran konsisten dengan orientasi dendrit α -Al dalam paduan yang dimodifikasi dengan Sr.

4.4.3. Pengamatan Mikrostruktur Produk Korosi Hasil Uji *Salt Spray* dengan SEM dan EDS

Hasil pengamatan dengan SEM dapat dibedakan melalui morfologi, warna dan komposisi kimia dari fasa yang terbentuk. Identifikasi fasa-fasa tersebut dilakukan dengan menggunakan EDS. Data mentah hasil SEM dan EDS pengujian sembur garam ini tersedia dalam Lampiran 6. Gambar 4.14 menampilkan morfologi permukaan sampel A, B, dan C setelah melalui proses uji sembur garam selama 108 jam. Data fasa-fasa yang mungkin terbentuk di permukaan sampel A,B, dan C dapat dilihat pada Tabel 4.4. Dari Gambar 4.14a yang merupakan hasil SEM permukaan sampel A terlihat adanya perbedaan warna, dimana untuk warna putih setelah dibandingkan dengan hasil EDS diduga merupakan senyawa $\text{Al}(\text{OH})_3$ berupa lepuhan putih yang menutupi korosi sumuran di bawahnya^[20,45]. Sedangkan permukaan dengan warna abu-abu muda berupa blok-blok, dari hasil EDS diduga sebagai fasa Al_2Cu . Terlihat adanya lubang kecil sebagai korosi sumuran di dekat wilayah ini. Sedangkan permukaan

dengan warna abu-abu gelap kasar setelah dibandingkan dengan hasil EDS diduga merupakan NaAlO_2 hasil reaksi NaCl dengan lapisan pasif Al_2O_3 ^[47]. Unsur klorida tidak terdeteksi sama sekali pada permukaan sampel A, B, dan C. Diduga kemungkinan ion klorida menguap ketika sampel dikeluarkan di udara bebas setelah melalui uji *salt spray*.

Gambar 4.14b yang merupakan hasil SEM permukaan sampel B, setelah disamakan dengan literatur dan hasil EDS, diduga permukaan berwarna putih terang merupakan fasa $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ ^[46] dan adanya segregasi Fe melihat tingginya persentase Fe dari hasil EDS di titik ini. Permukaan dengan alur berwarna putih keabu-abuan di sepanjang retakan diduga merupakan fasa $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}$ ^[15,45]. Keberadaan Fe dan fasa intermetaliknya yang lebih *nobel* dari matriks $\alpha\text{-Al}$ dapat menyebabkan terjadinya korosi galvanik ketika paduan aluminium terekspos dalam media yang korosif^[41]. Diduga adanya fasa ini juga memicu turunnya ketahanan korosi pada paduan AC4B. Terlihat adanya lubang yang sangat halus di wilayah ini yang diduga merupakan korosi sumuran. Sedangkan permukaan dengan warna abu-abu gelap diduga merupakan NaAlO_2 hasil reaksi NaCl dengan lapisan pasif Al_2O_3 ^[47]. Gambar 4.14c adalah hasil SEM untuk sampel C. Dari gambar ini dapat dilihat adanya permukaan yang berupa alur berwarna putih terang, berdasarkan hasil EDS diduga fasa yang terbentuk pada titik ini adalah $\text{Al}(\text{OH})_3$ berupa lepuhan putih. Permukaan dengan warna abu-abu muda kasar dari hasil EDS diduga merupakan fasa Al_2Cu dan Al-Si eutektik. Permukaan dengan warna abu-abu gelap diduga merupakan matriks $\alpha\text{-Al}$ melihat tingginya persentase Si dari hasil EDS di titik ini. Terlihat adanya lubang yang terbentuk di wilayah ini yang berdekatan dengan fasa intermetalik Al_2Cu . Diduga lubang ini merupakan korosi sumuran dan porositas yang memang sudah ada. Sedangkan permukaan dengan warna abu-abu gelap diduga merupakan fasa NaAlO_2 . Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa ketika paduan AC4B terekspos dalam larutan NaCl , korosi yang terjadi adalah korosi sumuran yang merupakan korosi lokal.



Gambar 4.14 Mikrostruktur (SEM) pada paduan aluminium AC4B setelah melalui uji *salt spray* selama 108 jam, (a) sebelum ditambahkan Sr dan Ti, (b) 0.02 wt. % Sr dan 0.0644 wt. % Ti, (c) 0.02 wt. % Sr dan 0.0855 wt. % Ti.

Tabel 4.5 Data EDS paduan aluminium AC4B hasil uji *salt spray* selama 108 jam

Sampel	No. Titik	Unsur (wt. %)												Elemen Lain	Warna	Fasa yang mungkin
		O	Al	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Ti	Cr	Sr	Na	C			
A	1	13.96	6.99	0.14	78.77			0.08		0.05				Sisa	Putih terang	Al ₂ O ₃ , Al(OH) ₃ ^[20] , Al ₂ Cu, AlSi, segregasi Ti, Si, Al, Sr ^[14]
	2	3.40	1.15	85.78	8.75	0.92								Sisa	Abu-abu muda	Al ₂ O ₃ , Al ₂ Cu ^[15] , AlSi, segregasi Si dan Mg
	3	48.71	43.89	1.87							5.52			Sisa	Abu-abu gelap kasar	Al ₂ O ₃ , Al(OH) ₃ ^[20] , NaAlO ₂ ^[47] , AlSi, segregasi Si
	4	41.03	44.87	1.49			6.55	4.56			1.50			Sisa	Abu-abu gelap halus	Al ₂ O ₃ , Al(OH) ₃ ^[20] , Al ₃ Fe, Al ₃ FeSi ^[15] , Al ₁₂ (Fe,Mn) ₃ Si ^[15] , segregasi Na
B	1		1.03	0.78			96.76	0.19				1.24		Sisa	Putih	β- Al ₃ FeSi ^[46] , segregasi Fe dan Ti
	2	4.21	49.06	6.12	13.59		17.11	8.05	0.27	0.98			0.60	Sisa	Putih keabuan	Al ₂ O ₃ , Al(OH) ₃ ^[20] , Al ₁₂ (Fe,Mn) ₃ Si ^[15] , Al ₂ Cu, Segregasi Si, Ti, Cr
	3	21.98	14.43	50.76	11.71				0.05				1.06	Sisa	Abu-abu muda	Al ₂ O ₃ , Al ₂ Cu ^[15] , AlSi, segregasi Si, Ti
	4	43.54	53.35	0.70					0.52		1.48	0.42		Sisa	Abu-abu gelap	Al ₂ O ₃ , NaAlO ₂ ^[47] , AlSi, segregasi Si, Ti, C
C	1	17.59	11.60	0.26	70.26	0.28								Sisa	Putih terang	Al ₂ O ₃ , Al(OH) ₃ ^[20] , Al ₂ Cu, AlSi, segregasi Ti, Mg, Si, Al ^[14]
	2	24.24	33.45	20.17	22.13									Sisa	Abu-abu muda kasar	Al ₂ O ₃ , Al ₂ Cu ^[15] , AlSi, segregasi Si
	3	28.98	59.60	2.30			9.12							Sisa	Abu-abu muda	Al ₂ O ₃ , Al ₃ Fe, β- Al ₃ FeSi, AlSi, Segregasi Si
	4	43.17	55.17	0.57							55.17			Sisa	Abu-abu tua	Al ₂ O ₃ , NaAlO ₂ ^[47] , segregasi Si