

Oksida kaya-Si Tingkatkan Rintangan Pengoksidaan Struktur Terkimpal Al-Mg-Si Pada Suhu 400°C dan 600°C *Si-rich Oxides Increase Oxidation Resistance on Welded Al- Mg-Si at at 400°C and 600°C*

Nur Azida Che Lah^{1,*}, Muhamad Hellmy Hussin¹

¹ Fabrication and Joining, University of Kuala Lumpur Malaysia France Institute (UNIKL MFI), Section 14, Jalan Teras Jernang, 43650 Bandar Baru Bangi, Selangor, Malaysia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 April 2020

Received in revised form 25 July 2020

Accepted 30 July 2020

Available online 30 October 2020

ABSTRACT

Pada suhu tinggi struktur terkimpal aloi Al-Mg-Si mengalami kebolehrintangan yang rendah disebabkan oleh kesan pengoksidaan yang kompleks yang melibatkan pembentukan lapisan atau kerak oksida dan degradasi dalaman. Keadaan menjadi lebih kompleks apabila ia aloi ini telah melalui proses kimpalan iaitu penyambungan logam yang melibatkan pemanasan dan penyejukan cepat. Seterusnya, struktur terkimpal tersebut didedahkan pada pengoksidaan suhu tinggi menyebabkan perubahan dan pembentukan fasa oksida yang berbeza. Oleh itu, tujuan penyelidikan ini dijalankan adalah untuk untuk mengenalpasti kesan pengoksidaan suhu tinggi pada sambungan kimpalan aloi Al-Mg-Si dengan menggunakan logam pengisi ER 4043 (Al-5%Si). Analisis dan pencirian sampel merangkumi morfologi dan mikrostruktur menggunakan OM dan SEM/EDX, dan fasa oksida ditentukan dengan menggunakan XRD. Penambahan 5% Si daripada logam pengisi dan pembentukan SiO₂ pada permukaan struktur terkimpal kesan pendedahan pengoksidaan didapati efektif dalam merendahkan tahap pengoksidaan dengan mengurangkan kemasukan oksigen ke dalam substrat aloi. SiO₂ juga membantu mengukuhkan lapisan pelindung Al₂O₃. Kesimpulannya, penggunaan logam pengisi ER 4043 yang mengandungi elemen pengalioan sekunder tertinggi iaitu 5% Si pada struktur terkimpal Al-Mg-Si adalah bersesuaian untuk aplikasi sehingga suhu tinggi.

At high temperatures the Al-Mg-Si alloy structure is characterized by low resistance due to the complex oxidation effects involving the formation of layers or scale oxides and internal degradation. The situation becomes more complex when this alloy undergoes a welding process of metal bonding that involves heating and cooling. Subsequently, the welded structure is exposed to high temperature oxidation resulting in different oxide formation and phase changes. Therefore, the present study aims to determine the effect of high temperature oxidation on Al-Mg-Si alloy welded joint using ER 4043 (Al-5% Si) filler metal. The analysis and characterization of samples include morphology and microstructure using OM and SEM / EDX, and the oxide phase was determined using XRD. The addition of 5% Si from the filler metal and the formation of SiO₂ on the surface of the welded structure due to the oxidation exposure was found to be effective in lowering the oxidation level by reducing penetration of oxygen diffusion into the alloy

* Corresponding author.

E-mail address: nurazida@unikl.edu.my

<https://doi.org/10.37934/arfmts.77.1.5168>

substrate. SiO₂ also helps strengthen the Al₂O₃ protective layer. In conclusion, the use of an ER 4043 as a filler metal containing a 5% of Si as a major secondary element in the Al-Mg-Si welded structure is suitable for high temperature applications.

Keywords:

Struktur terkimpal; Al-Mg-Si; logam pengisi; pengoksidaan suhu tinggi; SiO₂

Welded joint; Al-Mg-Si; filler metal; high temperature oxidation; SiO₂

1. Pengenalan

Aloi Al 6061 ini mempunyai sifat kebolehbentukan dan kebolehkimpalan yang baik disebabkan oleh sifat fizikal dan kimia yang berbeza dengan logam lain. Sebelum era saintifik bermula, industri penyambungan bahan logam menggunakan proses yang tidak melibatkan kimpalan. Industri fabrikasi pada masa itu menggunakan proses penyambungan konvensional seperti rivet, pateri, dan tempaan [1-3]. Selain daripada itu, industri kimpalan ini banyak menyumbang kepada industri pembinaan struktur bangunan, perkapalan, struktur pelantar minyak, aeroangkasa dan binaan struktur kenderaan. Penggunaannya secara meluas adalah disebabkan oleh kelebihan dan keistimewaan aloi tersebut yang ringan dan membolehkan penjimatan minyak serta pengurangan penghasilan gas tercemar [4,5]. Selain itu, ia juga menawarkan ciri-ciri kekuatan dan kerintangan yang tinggi terhadap kakisan [6]. Dalam konteks fabrikasi dan penyambungan pula, logam aloi Al boleh disambung menggunakan pelbagai jenis kimpalan pelakuran seperti kimpalan logam gas arka (GMAW) dan kimpalan logam tungsten gas arka (GTAW). Aplikasi kimpalan jenis ini sering digunakan kerana ia dapat mengurangkan potensi penghasilan fluks berlebihan yang menyebabkan kakisan pada struktur terkimpal tersebut [7].

Selain itu, kepentingan penyambungan kimpalan untuk logam aloi Al yang melibatkan aplikasi suhu tinggi terutamanya dalam bidang aeroangkasa seperti pembuatan kerangka tingkap kapal terbang, dan binaan struktur kenderaan memberikan cabang cabaran yang berbeza [8,9]. Penggunaan secara meluas dalam bidang pembuatan dan penapisan seperti tangki simpanan sehingga kepada sistem paip berpenebat dalam aplikasi bersuhu tinggi, memberikan ruang yang jelas di mana kepentingan penyambungan logam perlu dititikberatkan terutamanya apabila kerja-kerja pembaikan dan baik pulih struktur tersebut perlu dilakukan [10]. Walaupun pada masa kini, teknologi kimpalan baru seperti hibrid dan pancaran tenaga tinggi (*laser*) diperkenalkan secara meluas, kimpalan pelakuran jenis konvensional ini masih menjadi pilihan utama disebabkan oleh penggunaan mesin yang mudah, senang untuk di bawa ke lokasi untuk tujuan baik pulih dan juga kos aplikasi mesin yang rendah berbanding jenis kimpalan yang lain [11-13].

Pengoksidaan suhu tinggi merupakan masalah yang perlu diberi perhatian khusus dalam pelbagai industri terutamanya dalam sistem pengubahan tenaga, iaitu kilang pemprosesan kimia, relau, enjin, turbin gas dan kilang nuklear. Umumnya, logam aloi Al yang mengalami pengoksidaan suhu tinggi melibatkan pembentukan lapisan atau kerak oksida dan degradasi dalaman yang sering diberi perhatian oleh kajian-kajian terdahulu [14-17]. Namun, apabila ia melibatkan struktur terkimpal, proses pengoksidaan yang dilalui menjadi lebih kompleks kerana berlakunya pengoksidaan selektif dengan pertumbuhan kerak oksida pada kadar yang berbeza dan juga disebabkan oleh kehadiran kecacatan dan perbezaan mikrostruktur yang jelas jika dibandingkan dengan bahagian logam asas aloi Al. Struktur terkimpal merupakan sambungan logam yang lengkap merangkumi tiga zon utama iaitu bahagian logam asas, logam terkimpal dan zon terkesan haba (HAZ) dan ia perlu mempunyai ciri-ciri yang hampir sama seperti logam asas [18].

Jelasnya, faktor penggunaan logam pengisi dalam penyambungan logam aloi Al melibatkan elemen pengaloi sekunder dari logam pengisi didapati memainkan peranan penting dalam pengoksidaan suhu tinggi. Ini menjurus kepada pertumbuhan logam oksida yang kompleks yang seterusnya memberi impak kepada prestasi struktur terkimpal tersebut [19,20]. Aloii Al dengan kepekatan elemen pengaloi yang tertentu seperti Mg dan Si merupakan kumpulan aloii yang mempunyai kepentingan tersendiri dalam industri yang melibatkan logam Al. Di samping itu, Rahman *et al.*, [21] mendapati kesan kepekatan Si merekodkan peningkatan silika pada permukaan sampel struktur terkimpal Al 6061. Selain itu, dalam penggunaan struktur terkimpal Al 6061 yang menggunakan ER 4043 sebagai logam pengisi menunjukkan bahawa bahagian logam terkimpal merupakan zon yang lebih bersifat anodik berbanding bahagian logam asas yang lebih bersifat katodik. Mereka mendapati bahawa kakisan galvanik berlaku pada struktur terkimpal tersebut dan proses anodic ini dikawal oleh pertumbuhan lapisan permukaan oksida dan ia semakin bertambah dengan kehadiran fasa antara logam [21-23].

Unsur pengaloi Si juga mempunyai kelebihan yang tersendiri. He *et al.*, [24] mendapati unsur pengaloi Si dalam aloii Al-Si dengan kandungan Si sebanyak 7% didapati mempengaruhi pertumbuhan oksida pada permukaan. Si didapati telah dioksidakan dan bercampur dengan Al_2O_3 apabila dileburkan. Mereka juga melaporkan bahawa kandungan Al adalah lebih tinggi berbanding Si, di mana kandungan Al_2O_3 didapati melebihi SiO_2 . Hwang *et al.*, [25] menyatakan sebatian Al-Si-O nipis terbentuk pada permukaan aloii Al-Si apabila melalui proses pemanasan. Sebatian oksida ini didapati mempunyai takat lebur yang rendah berbanding sebatian oksida-Al yang terbentuk pada matrik Al dan ia menyebabkan struktur berliang terbentuk. Selain itu, Moon *et al.*, [26] menyatakan bahawa pengoksidaan yang melibatkan Si dalam aloii Al-Si yang dioksidakan pada julat suhu di antara $100^\circ C$ hingga $200^\circ C$, di mana oksida-Si didapati terbentuk pada permukaan melalui proses penyerapan O secara fizikal. Selain alumina (Al_2O_3), silika (SiO_2) juga merupakan lapisan pelindung yang mempunyai keistimewaan tersendiri. Pengoksidaan Si membentuk logam oksida SiO_2 yang nipis, dan lapisan tersebut bersifat bukan butiran. Sifat pelindung yang dipunyai oleh logam oksida ini seringkali digunakan untuk meningkatkan tahap kerintangan bahan terhadap kakisan pada suhu tinggi. Kofstad [27] menyatakan bahawa kesan pengaruh Si ke atas pengoksidaan Al pada suhu $250^\circ C$ dan $300^\circ C$ adalah tidak ketara, tetapi apabila suhu ditingkatkan kepada $350^\circ C$, lapisan oksida nipis didapati terbentuk. Ini juga menunjukkan bahawa Si^{4+} terlarut dalam amorfus Al_2O_3 dan memberi kesan yang sama seperti Mg^{2+} tetapi pengkayaan Mg^{2+} menunjukkan perbezaan yang lebih jelas berbanding Si^{4+} . Chęcmanowski dan Szczygieł [28] juga melaporkan bahawa unsur pengaloi Si juga diperkayakan dalam fasa logam di bawah lapisan logam - oksida. Sebatian SiO_2 yang terbentuk selepas pengoksidaan merupakan lapisan yang bertindak sebagai lapisan penyembuh. Ini adalah kerana sifat SiO_2 yang tumbuh dengan perlahan dan membenarkan sebatian lain yang lebih reaktif terbentuk dahulu. Walaupun begitu, masalah yang utama adalah pemeruapan SiO_2 pada tekanan oksigen rendah, kecenderungannya untuk membentuk sebatian yang mempunyai takat lebur rendah, dan mengalami fenomena kerapuhan adalah tinggi [29-31].

Oleh itu, kajian melibatkan pengoksidaan suhu tinggi pada suhu $400^\circ C$ dan $600^\circ C$ telah dijalankan ke atas struktur terkimpal aloii Al-Mg-Si yang telah dikimpal menggunakan logam pengisi Al-5%Si (STK 4043), dan juga sampel tuangan logam pengisi Al5%Si (TLP 4043) juga telah dikaji pada keadaan dan parameter yang sama. Analisis perincian mikrostruktur, keratin rentas dan pemetaan elemen yang melibatkan Mikroskop Optik model Olympus dan Mikroskop Imbasan Elektron yang dilengkapi dengan Spektroskopi Serakan Tenaga Sinar-X (SEM-EDX) telah dijalankan pada sampel-sampel yang telah melalui proses pengoksidaan. Perincian fasa oksida juga dijalankan menggunakan Penyerakan Tenaga Sinar-X (XRD).

2. Kaedah Ujikaji

Bahan mentah yang digunakan dalam penyelidikan ini adalah logam Al-Mg-Si, dan logam pengisi Al-5%Si digunakan untuk tujuan kimpalan dan tuangan. Prosedur kimpalan yang dijalankan ini adalah mengikut piawaian Persatuan Kimpalan Amerika (AWS) iaitu melibatkan proses Kimpalan Logam Gas Arka (GMAW) semi-automatik dengan menggunakan logam pengisi ER 4043 (Al-5%Si) dan gas pelindung argon. Ujian pengoksidaan suhu tinggi ini dijalankan dengan memasukkan sampel struktur terkimpal ke dalam kotak relau model Lindberg. Sebelum sampel didedahkan pada suhu tinggi, berat sampel struktur terkimpal (STK 4043) dan tuangan logam pengisi (TLP 4043) telah direkodkan. Kemudian, sampel-sampel tersebut didedahkan kepada ujian pengoksidaan suhu tinggi dalam udara biasa pada suhu 400°C dan 600°C. Pendedahan pada pengoksidaan suhu tinggi ini dilakukan mengikut jangkamasa yang ditetapkan iaitu 40 jam untuk setiap bacaan suhu. Pemilihan masa selama 40 jam ini dipilih berdasarkan masa minimum yang diambil jika berlaku insiden pemberhentian proses operasi atau masa yang diambil untuk proses pembaikan atau pemulihan sesuatu struktur binaan atau perpaipan. Kajian pengoksidaan untuk jangkamasa maksimum 40 jam ini dipilih adalah untuk mengkaji dan memahami fenomena pengoksidaan yang bakal berlaku. Ujian pengoksidaan ini dilakukan dalam udara biasa pada tekanan 1 atm. Jadual 1 menunjukkan komposisi kimia untuk sampel TLP 4043 dan STK 4043.

Jadual 1

Komposisi kimia dalam peratus berat (bt %) untuk logam terkimpal STK 4043 dan TLP 4043 yang digunakan dalam ujian pengoksidaan suhu tinggi

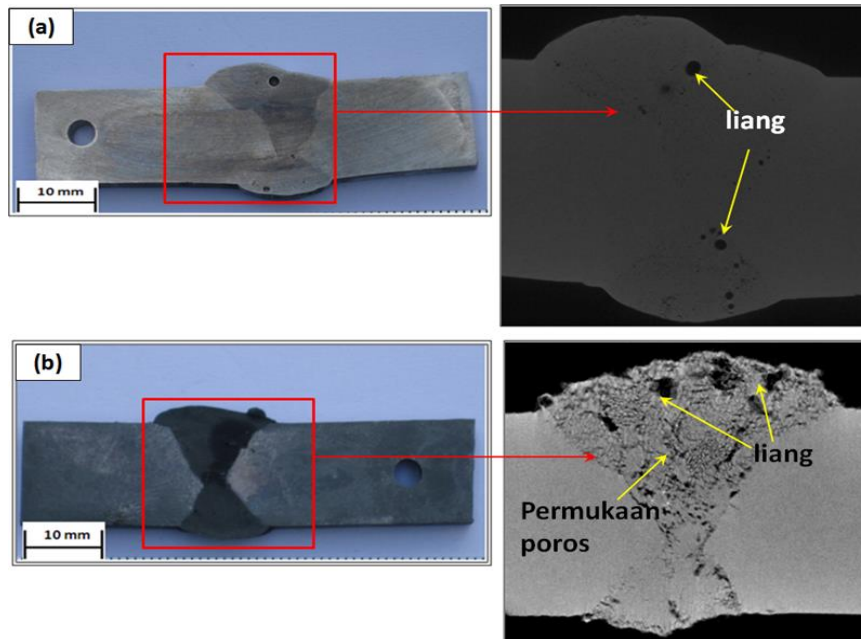
Logam Terkimpal	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	V	Al
TLP 4043	5.20	0.80	0.3	0.05	0.05	0.20	-	0.10	0.0008	93.2
STK 4043	2.06	0.183	0.146	0.003	0.501	0.054	-	0.007	0.005	97

Dalam pencirian makrostruktur dan mikrostruktur, sampel-sampel ini dipotong menggunakan mesin pemotong berlian untuk mendapatkan potongan yang baik dan teliti. Setelah itu, pencirian sampel-sampel tersebut dijalankan menggunakan Mikroskop Optik model Olympus BX 41M dan Mikroskop Imbasan Elektron (SEM) yang dilengkapi dengan Penyerakan Tenaga Sinar-X (EDX) model 1430 VPSEM LEO. Pencirian dilakukan menggunakan Teknik Pembelauan Sinar-X (XRD) model Bruker AXS:D8 Advance. Pencirian ini dilakukan untuk menentukan dan mencirikan fasa lapisan oksida yang terbentuk hasil daripada proses pengoksidaan suhu tinggi.

3. Keputusan dan Perbincangan

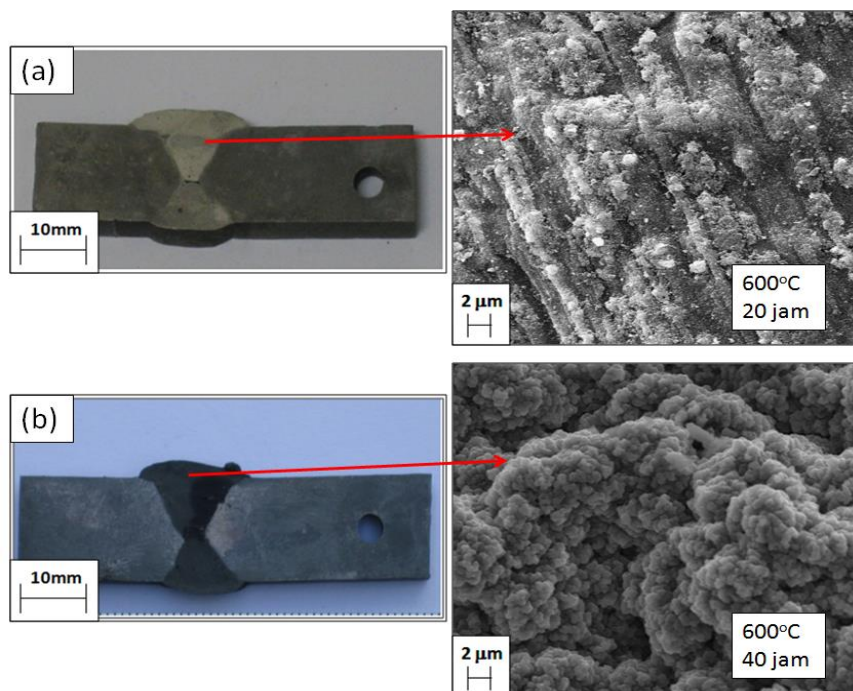
3.1 Analisis Imbasan Kecacatan dan Morfologi Bahan

Seterusnya, analisis kecacatan untuk sampel logam terkimpal STK 4043 ini dijalankan untuk mengenalpasti degradasi dalaman yang berlaku setelah pengoksidaan dijalankan. Rajah 1(a) dan Rajah 1(b) menunjukkan imej mikrograf imbasan kecacatan sampel STK 4043 yang telah dioksidakan pada suhu 400°C dan 600°C, masing-masing selama 40 jam. Imej mikrograf STK 4043 yang telah dioksidakan pada suhu 400°C menunjukkan tahap pengoksidaan yang rendah dan hanya terdapat liang-liang halus pada bahagian logam terkimpal. Manakala, apabila sampel tersebut dioksidakan pada suhu 600°C, bahagian logam terkimpal didapati lebih berliang dengan kehadiran liang-liang yang semakin membesar membentuk lurah dan lompong (Rajah 1(b)).



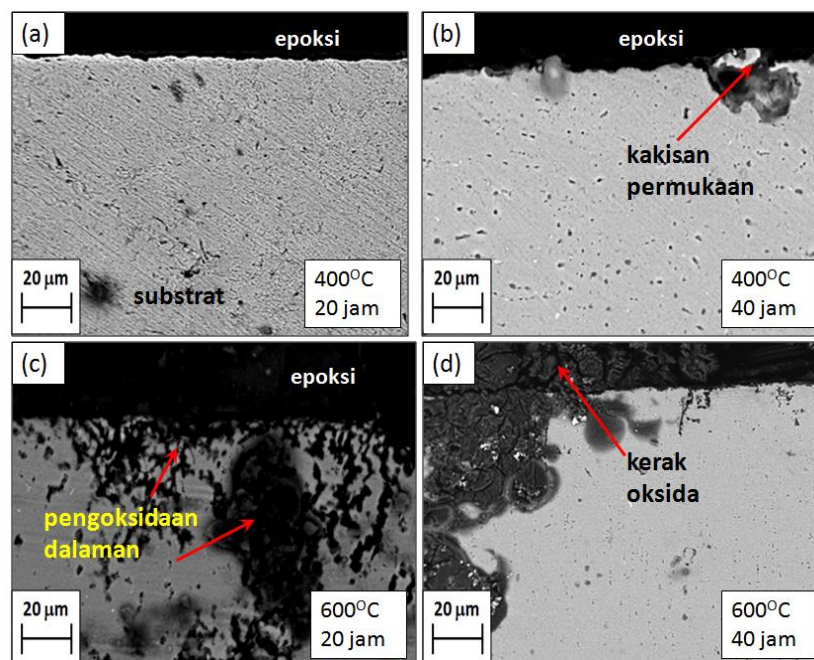
Rajah 1. Imej optikal dan mikrograf ujian imbasan sinar-X untuk STK 4043 yang telah telah dioksidakan selama 40 jam pada suhu (a) 400°C dan (b) 600°C

Rajah 2 menunjukkan imej mikrograf morfologi permukaan untuk sampel STK 4043 yang menunjukkan permukaan sampel yang pada mulanya berbutir halus dan kasar berubah menjadi kelompok butiran. Butiran-butiran kasar tersebut membesar dan didapati bersambung di antara satu sama lain membentuk kelompok butiran kasar seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2(a) dan Rajah 2(b).



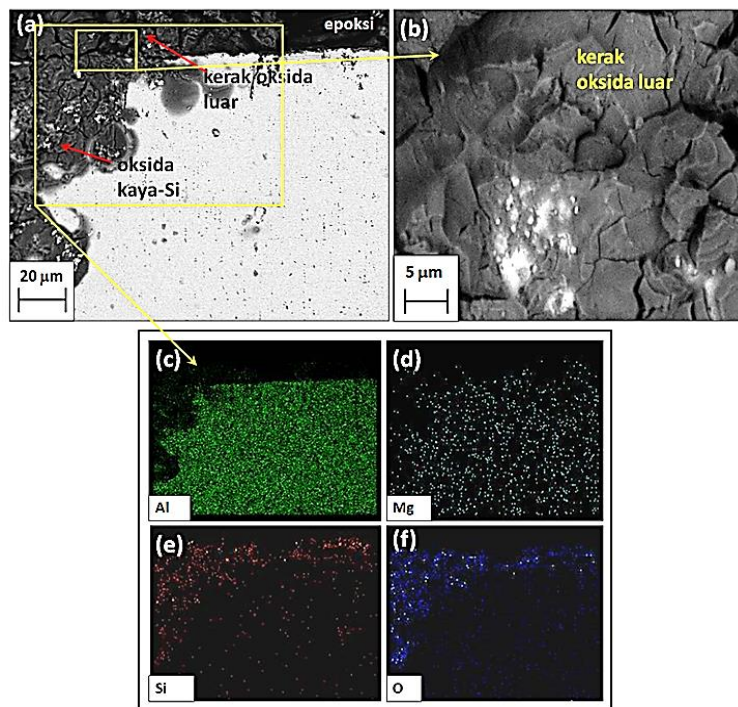
Rajah 2. Imej optikal dan mikrograf SEM sampel STK 4043 yang telah dioksidakan dalam udara biasa pada suhu 600°C selama (a) 20 jam, dan (b) 40 jam

Rajah 3 pula menunjukkan keratan rentas sampel STK 4043 yang telah dioksidakan pada suhu 400°C dan 600°C iaitu masing-masing selama 20 dan 40 jam. Merujuk kepada Rajah 3, tahap pengoksidaan pada sampel STK 4043 yang dioksidakan pada suhu 400°C adalah rendah. Manakala, permukaan substrat sampel tersebut didapati berliang. Ini dibuktikan lagi dengan pengoksidaan dalaman yang berlaku pada sampel yang dioksidakan pada suhu 600°C selama 20 jam (Rajah 3(c)). Tiada pertumbuhan kerak oksida luaran diperhatikan. Hanya degradasi dalaman sahaja diperhatikan. Apabila masa pendedahan ditingkatkan kepada 40 jam (Rajah 3(d)), lapisan kerak oksida luaran didapati terbentuk pada permukaan luar substrat tersebut. Ini jelas ditunjukkan dalam Rajah 4 iaitu imej keratan rentas sampel dan analisis pemetaan elemen untuk sampel STK 4043 yang telah dioksidakan pada suhu 600°C selama 40 jam.



Rajah 3. Keratan rentas sampel STK 4043 yang telah dioksidakan pada suhu, (a) 400°C 20 jam, (b) 400°C 40 jam, (c) 600°C 20 jam dan (d) 600°C 40 jam

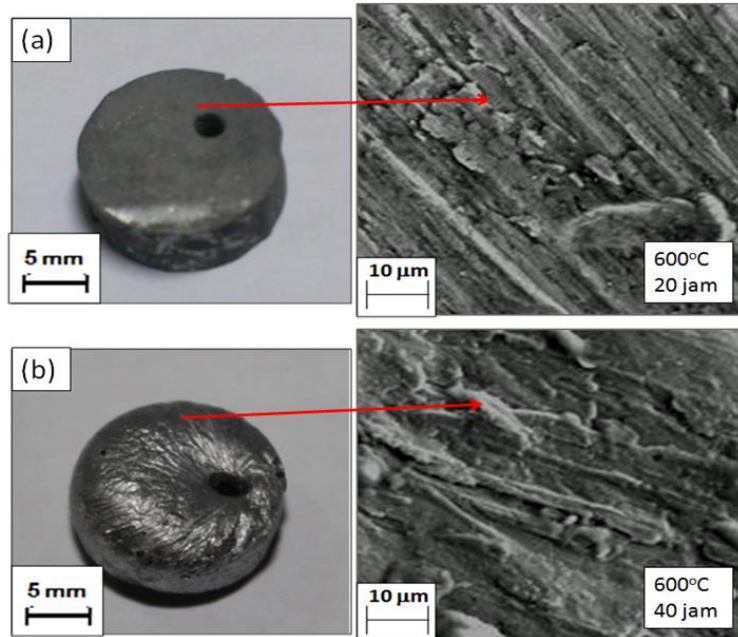
Rajah 4(a) hingga Rajah 4(f) menunjukkan keratan rentas sampel STK 4043 yang telah dioksidakan pada suhu 600°C selama 40 jam. Keadaan pengoksidaan ini semakin berlarutan apabila suhu ditingkatkan kepada 600°C. Apabila masa pendedahan ditingkatkan kepada 40 jam, lapisan kerak oksida luaran didapati terbentuk pada permukaan luar substrat tersebut. Berdasarkan pemerhatian, Rajah 4(a) didapati menunjukkan lapisan kerak oksida luaran yang terbentuk pada permukaan atas substrat sampel STK 4043. Kerak oksida ini didapati mempunyai permukaan yang tidak rata dan tekstur yang seakan terpecah-pecah. Berdasarkan pemetaan elemen dalam Rajah 4(c) hingga Rajah 4(f), didapati berlaku pengasingan Si dan O ke permukaan substrat. Mg dan Al didapati mengalami pengurangan pada bahagian antaramuka aloi - oksida. Ini merujuk kepada kehadiran oksida kaya -Si pada kerak oksida sampel tersebut. Seterusnya, hasil pemerhatian untuk morfologi permukaan, imbasan kecacatan dalaman dan keratan rentas diteruskan untuk analisis sampel TLP 4043 yang telah dioksidakan pada suhu 400°C dan 600°C selama 20 dan 40 jam, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5. Penerangan pemerhatian ini adalah bertujuan untuk mengenalpasti kesan pengoksidaan yang dialami oleh logam pengisi tersebut dan bagaimana peranan kandungan elemen pengaloi sekunder mempengaruhi tahap pengoksidaan yang ditunjukkan pada sampel STK 4043.



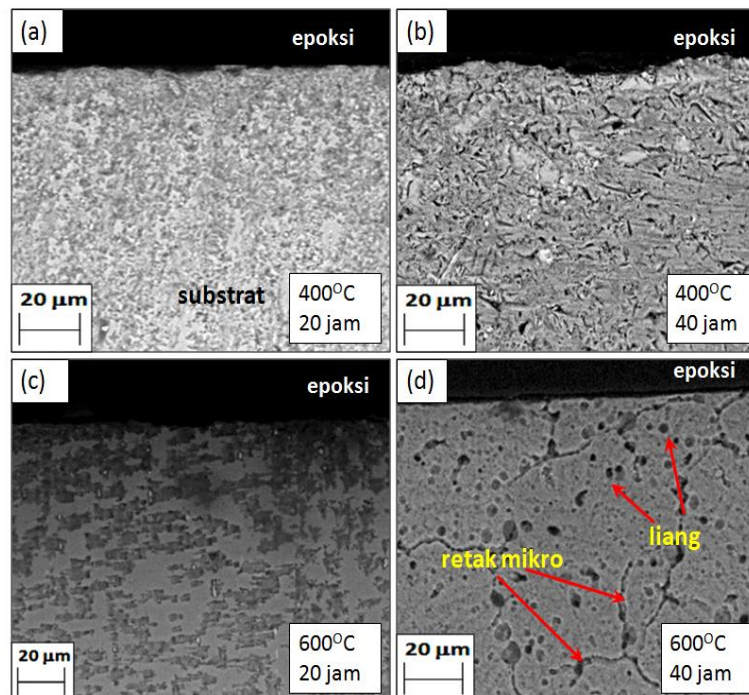
Rajah 4. Keratan rentas dan analisis pemetaan elemen sampel STK 4043 yang telah dioksidakan pada suhu 600°C selama 40 jam, (a) imej SEM, (b) pembesaran imej pada (a), dan imej mikrograf pemetaan elemen iaitu (c) Al, (d) Mg, (e) Si, dan O

Berdasarkan Rajah 5(a) dan Rajah 5(b) menunjukkan sampel TLP 4043 yang dioksidakan pada suhu 600°C menunjukkan kesan pengoksidaan yang rendah untuk kedua-dua masa pengoksidaan. Imej mikrograf SEM menunjukkan permukaan yang rata pada sampel TLP 4043 yang telah dioksidakan selama 20 jam. Manakala, apabila ia ditingkatkan kepada 40 jam, permukaan sampel menunjukkan pengelupasan halus. Sampel yang telah dioksidakan selama 40 jam pada suhu 600°C (Rajah 5(b)) didapati menggulus dengan permukaan kasar dan tidak licin serta berubah bentuk.

Berdasarkan Rajah 6(a) dan Rajah 6(b), sampel yang telah dioksidakan pada suhu 400°C didapati tidak menunjukkan kesan pengoksidaan yang ketara apabila dibandingkan dengan sampel yang telah dioksidakan pada suhu 600°C (Rajah 6(c) dan Rajah 6(d)). Tiada pertumbuhan kerak oksida diperhatikan. Tahap pengoksidaan sampel didapati meningkat apabila suhu ditingkatkan kepada 600°C terutamanya pada masa pendedahan 40 jam (Rajah 6(d)). Ini dijelaskan dengan mendalam pada Rajah 6(a) hingga Rajah 6(d). Seterusnya, analisis difokuskan kepada Rajah 6(d) dan diperincikan secara mendalam dalam Rajah 7. Pada suhu 600°C, sampel TLP 4043 (Rajah 7) yang dioksidakan selama 40 jam, didapati mengalami pengoksidaan dalaman yang menghasilkan tekstur dalaman yang berliang halus. Liang-liang halus ini didapati tertabur secara rawak pada bahagian dalaman sampel tersebut. Retak mikro juga didapati terbentuk terutamanya pada lokasi yang mengandungi liang-liang halus. Liang-liang halus tersebut didapati bersambungan di antara satu sama lain membentuk garis retakan. Jajaran liang yang tersusun berdekatan ini memudahkan pembentukan garis retak mikro yang kelihatan bersambungan dan ini didapati mempercepatkan proses degradasi sampel berkenaan.



Rajah 5. Imej mikrograf sampel TLP 4043 yang telah dioksidakan pada suhu 600°C selama (a) 20 jam, dan (b) 40 jam



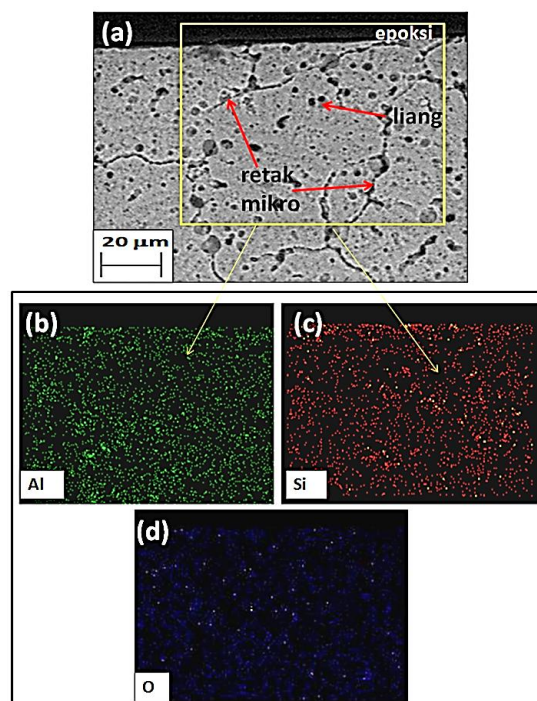
Rajah 6. Keratan rentas sampel TLP 4043 yang telah dioksidakan pada suhu, (a) 400°C 20 jam, (b) 400°C 40 jam, (c) 600°C 20 jam dan (d) 600°C 40 jam

Pemetaan elemen dalam Rajah 7 juga tidak menunjukkan sebarang indikasi pengkayaan oksida pada bahagian dalaman sampel berkenaan. Pemetaan elemen pada sampel keratan rentas TLP 4043 dan didapati mempunyai kandungan Al dan Si yang tertabur secara homogen dan tiada berlaku pengasingan Si dan O ke permukaan substrat. Ini mengukuhkan lagi hipotesis yang menunjukkan walaupun suhu ditingkatkan kepada 600°C, tiada perubahan pada permukaan sampel dan didapati

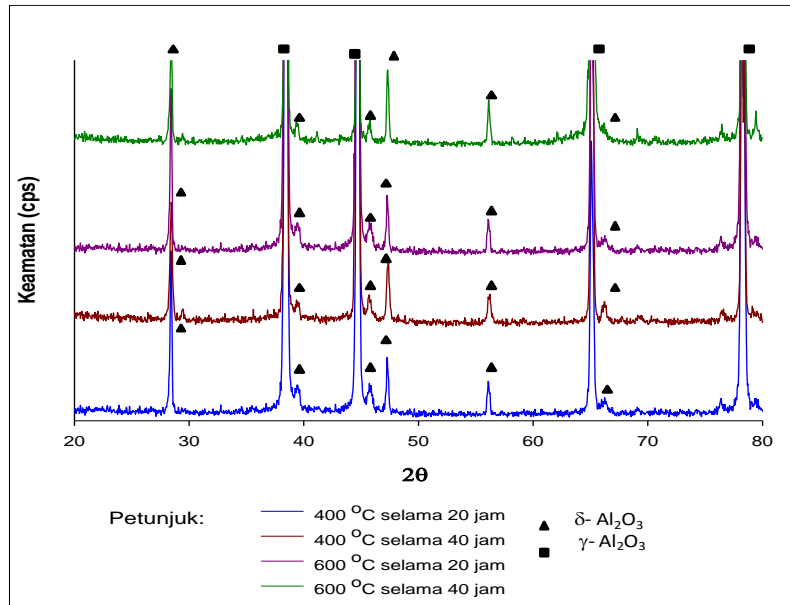
lapisan oksida pada substrat masih bertindak sebagai oksida pelindung. Rajah 8 pula menunjukkan spektrum fasa oksida yang hadir pada TLP 4043 yang didapati mempunyai kehadiran spektrum fasa γ - Al_2O_3 menunjukkan puncak keamatan yang tertinggi pada 37.539° , 45.668° , 66.602° dan 78.23° (nombor fail spektrum 00-050-0741). Selain itu, fasa δ - Al_2O_3 (nombor fail spektrum 00-056-1186) didapati hadir dan terbentuk secara majoriti.

Rajah 9 pula menunjukkan spektrum XRD untuk sampel STK 4043. Spektrum XRD dengan keamatan yang tertinggi direkodkan untuk fasa oksida γ - Al_2O_3 pada ketiga-tiga bacaan 2θ iaitu pada 37.53° , 45.66° , 66.60° , dan 78.23° (nombor fail spektrum 00-050-0741). Berdasarkan Rajah 9, ia menunjukkan bahawa apabila sampel ini dioksidakan pada suhu 400°C selama 20 dan 40 jam, didapati mempunyai spektrum fasa δ - Al_2O_3 (nombor fail spektrum 00-056-1186) pada keamatan yang rendah. Apabila sampel STK 4043 ini dioksidakan pada suhu yang lebih tinggi iaitu 600°C , puncak keamatan spektrum δ - Al_2O_3 didapati lebih tinggi menunjukkan kehadiran struktur penghabluran yang tinggi.

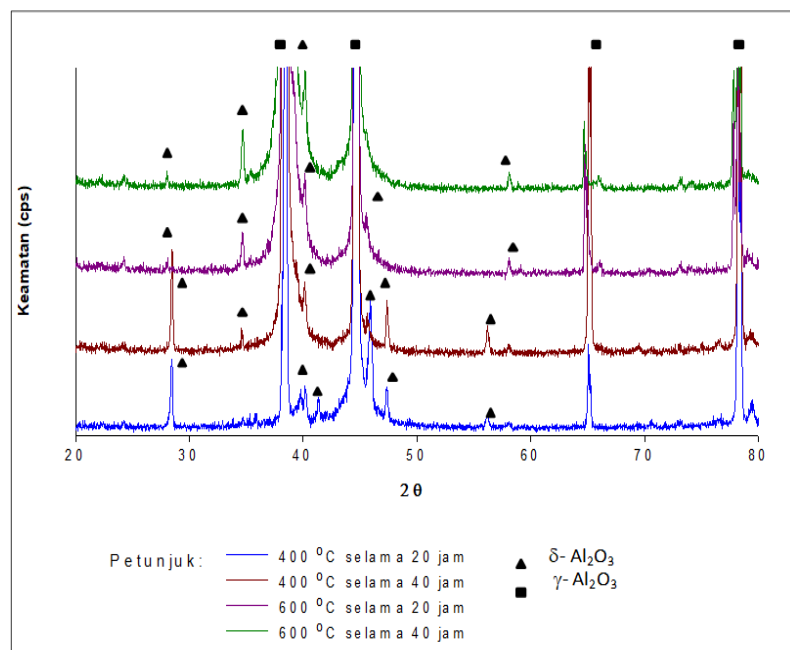
Apabila terdedah kepada persekitaran udara pada suhu bilik, lapisan oksida pelindung yang nipis iaitu Al_2O_3 terbentuk pada permukaan sampel STK 4043. Pemerhatian ini didapati mempunyai persamaan dengan Nylund *et al.*, [32] yang menyatakan bahawa lapisan oksida yang tumbuh pada bahan berasaskan logam Al di bawah suhu 400°C adalah bersifat amorfus. Penemuan ini adalah bertentangan dengan kajian yang dijalankan oleh Bandaru *et al.*, [33] yang membuktikan bahawa lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan aloi Al-0.8 at.% Mg yang dioksidakan pada suhu 327°C selama 2 jam didapati tidak sekata dan didapati nukleasi oksida mengandungi campuran struktur amorfus, poli hablur, dan juga oksida dalam rantau peralihan antara amorfus- hablur. Rantau hablur tersebut didapati mengandungi MgO.



Rajah 7. Keratan rentas dan analisis pemetaan elemen sampel TLP 4043 yang telah dioksidakan pada suhu 600°C selama 40 jam, (a) imej SEM, dan imej mikrograf pemetaan elemen iaitu (b) Al, (c) Si, dan (d) O



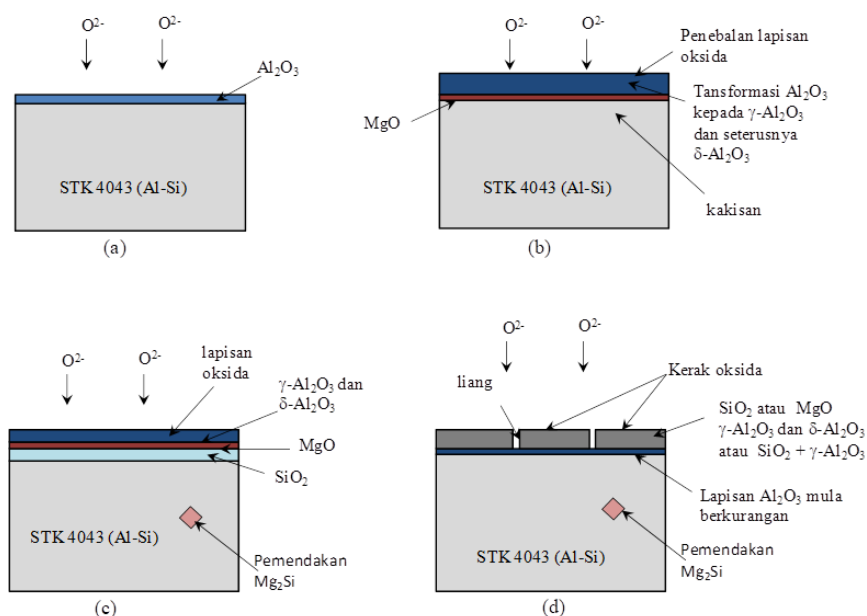
Rajah 8. Spektrum XRD fasa oksida sampel TLP 4043 yang telah dioksidakan pada suhu, (a) 400°C 20 jam, (b) 400°C 40 jam, (c) 600°C 20 jam dan (d) 600°C 40 jam



Rajah 9. Spektrum XRD sampel STK 4043 yang telah dioksidakan pada suhu 400°C dan 600°C, masing-masing selama 20 jam dan 40 jam

Ketebalan oksida juga meningkat. Logam oksida yang berasaskan Al dan Mg ini didapati terbentuk bebas pada permukaan sampel (Rajah 10). Panda *et al.*, [34] juga menyatakan nukleasi penghabluran dengan kehadiran fasa oksida MgO pada permukaan aloi AlMg berlaku seawal suhu 200°C. Pada suhu 200°C, permukaan sampel AlMg dilapisi oleh lapisan oksida amorfus dan juga hablur. Oleh itu, disebabkan oleh kajian ini merangkumi suhu pengoksidaan bermula pada 400°C, dan tidak memfokuskan kepada suhu yang lebih rendah. Walaupun begitu dapat dinyatakan bahawa pada suhu 400°C, lapisan oksida nipis berhablur didapati terbentuk pada permukaan sampel STK 4043. Ini juga

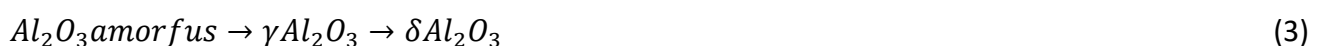
dapat dinyatakan bahwa apabila sampel STK 4043 ini didedahkan sehingga suhu 400°C dalam persekitaran udara, didapati lapisan pelindung Al_2O_3 yang nipis terbentuk pada permukaan sampel masih bertindak sebagai lapisan oksida pelindung. Pada suhu ini, penembusan anion oksigen yang berterusan memberi kesan kepada bahagian dalaman substrat dan didapati menghakis bahagian dalaman substrat [35-37]. Selain itu, bahagian dalaman substrat mengalami pengasingan fasa yang mengandungi oksida kaya-Mg dan Si di bawah lapisan oksida pelindung Al_2O_3 . Kesan penambahan logam pengisi dalam logam terkimpal juga didapati meningkatkan kandungan Si dan ini memberi kesan terhadap fenomena pengasingan elemen [38,39]. Walaupun kandungan Mg dalam STK 4043 adalah rendah, disebabkan oleh afiniti Mg yang lebih tertarik kepada oksigen, ia membentuk sebatian MgO. Lapisan nipis MgO ini tumbuh di bawah lapisan Al_2O_3 . Ini berkemungkinan disebabkan oleh komposisi Mg yang lebih rendah iaitu 0.5% berbanding kandungan Si yang lebih tinggi iaitu 2%. Mg juga didapati tidak memberi kesan yang kritikal terhadap proses pengoksidaan sampel STK 4043.



Rajah 10. Ilustrasi skematik cadangan model mekanisme pertumbuhan lapisan oksida pada permukaan logam STK 4043 yang telah dioksidakan dalam medium udara biasa pada (a) suhu bilik, (b) suhu 400°C , (c) dan (d) suhu 600°C

Meyer *et al.*, [40] menyatakan bahawa dalam pertumbuhan kinetik pengoksidaan Al_2O_3 , berlaku peningkatan berat sampel. Seterusnya, berlaku transformasi fasa kepada fasa penghabluran iaitu $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ kepada $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ iaitu bermula daripada suhu $100 - 500^{\circ}\text{C}$. Apabila suhu melebihi 300°C , Al_2O_3 yang bersifat amorfus berubah kepada $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Ini bertentangan dengan kajian yang dijalankan oleh Han dan Young [41] yang menyatakan apabila bahan berasaskan aloi Al dengan penambahan Ni dan Cr ini dioksidakan dan dipanaskan pada suhu melebihi 500°C , berlaku kakisan permukaan dan tiada peningkatan berat diperhatikan. Mereka mendapati hanya Al_2O_3 sahaja yang terbentuk pada permukaan sampel. Tiada kakisan dalaman berlaku dan lapisan oksida yang terbentuk masih bertindak sebagai pelindung walaupun dioksidakan melebihi 500°C . Pertumbuhan lapisan oksida nipis Al_2O_3 berlaku dan seterusnya mengalami penebalan apabila dioksidakan pada suhu 400°C . Pada suhu 400°C , didapati berlaku proses transformasi fasa di mana penukleusan dan pertumbuhan lapisan oksida hablur $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ terbentuk pada bahagian antaramuka oksida – gas. Seterusnya, fasa $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ini akan melalui proses transformasi fasa kepada $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ dengan peningkatan suhu dan jangkamasa

untuk membentuk oksida yang lebih stabil [28]. Lapisan oksida yang didapati terbentuk juga bukan sahaja Al_2O_3 tetapi juga mengandungi transformasi fasa yang berlainan. Tindak balas kimia yang dicadangkan berlaku adalah seperti dalam persamaan kimia (1) hingga (3). Seterusnya, apabila suhu ditingkatkan kepada $600^\circ C$ (Rajah 11(c) dan Rajah 11(d)), lapisan oksida yang terdedah kepada persekitaran suhu tinggi semakin menebal. Pada tahap ini sifat pelindung yang dipunyai oleh permukaan sampel tersebut tidak dapat menahan daripada mengalami pengoksidaan berterusan. Ini menyebabkan peningkatan kation Al daripada substrat mengambil alih pertumbuhan kerak oksida dan seterusnya, substrat aloi tersebut mengalami kekurangan Al.



Cadangan pertumbuhan lapisan oksida dalam Rajah 11 untuk STK 4043 ini disokong oleh analisis morfologi dan SEM/EDX yang diperolehi. Analisis pemetaan elemen yang dijalankan difokuskan kepada sampel yang telah dioksidakan pada suhu $600^\circ C$ selama 40 jam yang menunjukkan lapisan oksida yang lebih tebal. Kerak oksida yang tumbuh pada lapisan luar permukaan mempunyai tekstur yang tidak rata dan terpecah-pecah. Pemecahan lapisan oksida ini adalah disebabkan oleh peningkatan suhu pengoksidaan. Apabila suhu pengoksidaan meningkat, atom-atom yang tersusun rapat pada keadaan pepejal mengalami perlanggaran atom. Penyerapan dan penjerapan anion oksigen semakin mudah berlaku dan menular ke bahagian dalaman substrat sampel. Oleh itu, proses pengoksidaan yang melibatkan kehilangan dan penerimaan ion lebih mudah berlaku. Ini kerana, gas oksigen adalah agen pengoksidaan yang diketahui akan menambah sebatian oksida yang dapat melemahkan lapisan yang pada asalnya bersifat pelindung. Apabila anion oksigen bergabung dan bertindak balas dengan kation logam pada substrat, ia cenderung untuk membentuk oksida logam atau dikenali sebagai karat. Tindak balas kimia ini dijelaskan lagi dengan atom logam yang mengalami kehilangan elektron untuk membentuk kation logam yang teroksida bersama dengan molekul oksigen tersebut dan membentuk ion negatif oksigen. Oleh itu, proses kehilangan elektron dan penggabungan kation bersama dengan anion oksigen ini didapati melemahkan struktur lapisan oksida dan seterusnya mengubah lapisan tersebut menjadi porous dengan struktur yang terpecah. Lapisan pelindung yang berubah menjadi kerak oksida ini didapati menular ke bahagian dalaman substrat sampel tersebut. Pemetaan elemen menunjukkan kerak oksida yang tumbuh diperkaya dengan oksida kaya-Si. Pengkayaan oksida kaya-Si ini adalah bersifat setempat dan tidak meliputi keseluruhan bahagian dalaman substrat.

Hasil ini adalah sejajar dengan kesimpulan yang dinyatakan oleh Meyer *et al.*, [40] dan Chęćmanowski dan Szczygieł [28] bahawa lapisan pelindung $SiO_2 - Al_2O_3$ yang telah dihasilkan melalui proses sintesis dapat bertindak melindungi permukaan aloi FeCrAl dan ia juga didapati dapat membantu meningkatkan ketahanan bahan pada persekitaran suhu tinggi bergantung kepada ciri-ciri bahan tersebut. Novák *et al.*, [42] juga mendapati bahawa tahap pengoksidaan dan kekerasan aloi Fe-Al-Si didapati meningkat apabila dioksidakan pada suhu melebihi $600^\circ C$. Perbezaan ditunjukkan oleh penemuan yang didapati oleh Frutos *et al.*, [43] yang menyatakan bahawa salutan logam yang mengandungi Al-31at%Si bertindak sebagai lapisan pelindung kepada logam AISI 316 LVM keluli tahan karat hanya pada suhu $900^\circ C$ sahaja. Pada suhu kurang daripada $900^\circ C$, salutan logam tersebut tidak menunjukkan kesan rintangan oksida yang baik. Jiang *et al.*, [44] juga menunjukkan penemuan yang berlainan yang menyatakan bahawa penambahan Nb (5%-10%) dan

Si (1% - 5%) dapat meningkatkan tahap pengoksidaan aloi TiAl pada suhu 900°C dan mereka juga mendapati bahawa lapisan Al₂O₃ yang padat didapati terbentuk pada bahagian dalaman substrat logam. Oleh yang demikian dalam kajian ini, dapat dinyatakan bahawa kesan penambahan Si dapat membantu Al dalam meningkatkan rintangan bahan terhadap pengoksidaan seperti yang dinyatakan oleh Meyer *et al.*, [40] dan Chęćmanowski dan Szczygieł [28] yang didapati bertindak sebagai lapisan pelindung. Si dalam sesuatu bahan membolehkan sifat ketahanan terhadap pengoksidaan meningkat. Sama ada tinggi atau rendah peratusan Si tersebut, ia tetap memainkan peranan sebagai lapisan pelindung. Dalam kajian ini, peratus komposisi 5% Si daripada penambahan logam pengisi TLP 4043 yang terdapat dalam struktur terkimpal STK 4043 menunjukkan kesan rintangan terhadap pengoksidaan seawal suhu 400°C. Ini bertentangan dengan Frutos *et al.*, [43] yang menunjukkan bahawa salutan logam dengan peratus 31 at.% Si, ia bertindak sebagai lapisan pelindung kepada logam pada suhu 900°C. Ini dapat disimpulkan bahawa walaupun dengan kehadiran Si dalam peratusan yang rendah masih membolehkan ia bertindak sebagai lapisan pelindung walaupun pada suhu yang rendah. Apabila suhu meningkat kepada 600°C (Rajah 11(c) dan Rajah 11(d)), penembusan masuk gas oksigen secara berterusan menghasilkan fasa pengasingan pada bahagian dalaman substrat iaitu di bawah lapisan oksida pelindung Al₂O₃. Pengasingan fasa ini mengandungi oksida kaya-Mg dan Si. Ini menghasilkan pengkayaan oksida pada antaramuka aloi – oksida [45-47]. Seterusnya, pengkayaan oksida di bawah permukaan lapisan oksida didapati dimonopoli oleh oksida yang kaya-Si dan membentuk lapisan pengkayaan oksida yang mengandungi SiO₂ seperti yang ditunjukkan dalam persamaan kimia (4). Lebihan atom-atom Si ini berkemungkinan tertarik kepada Mg dan mungkin membentuk sebatian antara logam yang membentuk mendakan kimia Mg₂Si. Oleh kerana disebabkan oleh kandungan Mg yang rendah, mendakan sebatian Mg₂Si adalah rendah. Apabila suhu meningkat, resapan Si ke dalam lapisan oksida pada permukaan sampel semakin bertambah dan menyebabkan kecenderungan nukleasi oksida hasil tindak balas campuran antara SiO₂ dan Al₂O₃ dan membentuk sebatian Al₂SiO₅ seperti dalam tindak balas kimia dalam persamaan (6). Ini didapati meningkatkan tahap rintangan terhadap pengoksidaan walaupun sampel ini dioksidakan pada suhu 600°C .

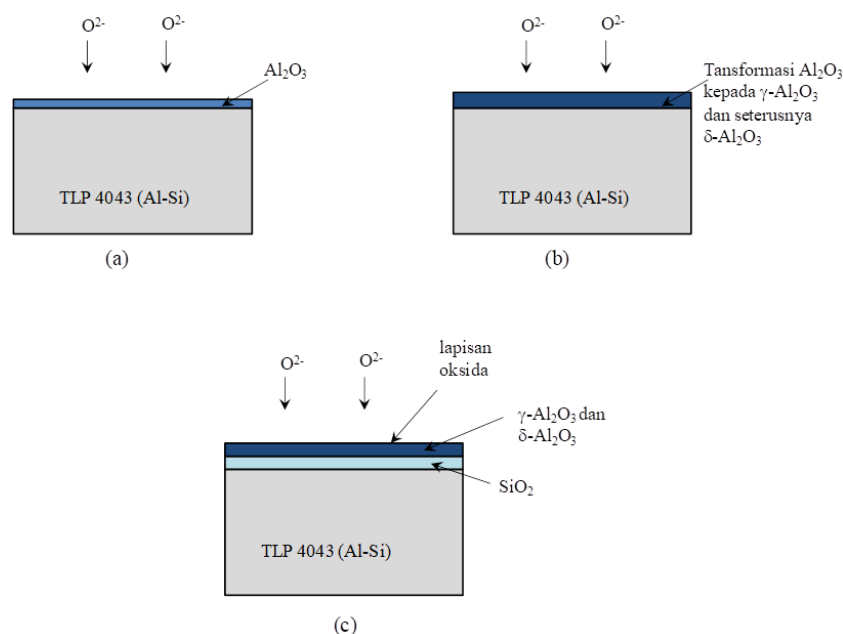


Keadaan kesan pengoksidaan pada STK 4043 ini dibuktikan dengan kehadiran pengkayaan oksida pada lapisan permukaan substrat logam terkimpal dengan pencirian XRD. Berdasarkan Rajah 10, puncak spektrum XRD membuktikan kehadiran fasa oksida γ -Al₂O₃ dan δ -Al₂O₃ dengan struktur penghabluran untuk sampel logam terkimpal STK 4043 yang dioksidakan pada kedua-dua suhu iaitu 400°C dan 600°C, masing-masing selama 20 dan 40 jam. Pencirian XRD tidak dapat mengesahkan kehadiran fasa oksida yang mengandungi Si walaupun pemetaan elemen menunjukkan kehadiran resapan Si ke bahagian antaramuka aloi – oksida [48,49]. Manakala, EDX pula hanya dapat mencapai kedalaman 0.1 – 0.3 μ m daripada permukaan sampel tersebut. Ini membolehkan analisis kehadiran dan pembuktian logam oksida nipis yang hadir pada permukaan sampel ditentukan.

Oleh itu, secara termodinamik berdasarkan tenaga pengaktifan Gibbs, dapat dicadangkan turutan tindak balas pengoksidaan yang terlibat merangkumi, (i) pertumbuhan lapisan oksida Al₂O₃ pada suhu bilik, (ii) Mg dioksidakan kepada MgO dengan nilai ΔG°_{400} adalah – 1,062.3 kJ dan ΔG°_{600} adalah – 1,015.68 kJ, (iii) Al dioksidakan secara berterusan membentuk γ -Al₂O₃ dan δ -Al₂O₃ dengan ΔG°_{400}

adalah -976.91 kJ dan ΔG°_{600} adalah -931.66 kJ, (iv) resapan Si berlaku dan kation Si telah dioksidakan membentuk SiO_2 dengan ΔG°_{400} adalah -785.07 kJ dan ΔG°_{600} adalah -750.39 kJ, (v) pembentukan mendakan Mg_2Si dengan ΔG°_{400} adalah -105.42 kJ dan ΔG°_{600} adalah -90.12 kJ dan (vi) sebatian Al_2O_3 dan SiO_2 bertindak balas membentuk Al_2SiO_5 dengan ΔG°_{400} adalah -6.193 kJ dan ΔG°_{600} adalah -5.416 kJ.

Apabila suhu mencecah 600°C (Rajah 11(c)), resapan kation logam tidak dapat dibuktikan melalui analisis pemetaan EDX. Pada suhu ini, penembusan anion oksigen masih mendominasi keadaan di mana pengoksidaan dalaman menyebabkan bahagian dalaman substrat mengalami degradasi. Ini menghasilkan bahagian dalaman substrat yang berliang dan mempunyai retak mikro. Walaupun tiada bukti resapan kation logam berlaku, secara jelasnya, tahap pengoksidaan yang dialami oleh TLP 4043 ini menunjukkan tahap kerintangan terhadap pengoksidaan yang lebih baik apabila didedahkan kepada suhu tinggi.



Rajah 11. Ilustrasi skematik cadangan model mekanisme pertumbuhan lapisan oksida pada permukaan logam TLP 4043 yang telah dioksidakan dalam medium udara biasa pada (a) suhu bilik, (b) suhu 400°C , dan (c) suhu 600°C

Namun, dapat dicadangkan bahawa, resapan kation Si ke permukaan tetap berlaku secara semulajadi. Dalam kes ini yang melibatkan TLP 4043, kandungan Mg yang sangat rendah didapati kurang memberikan tenaga pemacu untuk menarik Si keluar daripada substrat sampel tersebut. Oleh itu, atom-atom Si yang tertinggal dalam bahagian substrat didapati telah dioksidakan membentuk oksida kaya-Si iaitu membentuk SiO_2 . Oleh itu, lapisan pelindung yang kaya-Al masih kukuh meliputi permukaan sampel dan menghalang pengoksidaan berterusan daripada berlaku. Berdasarkan Rajah 10, fasa oksida yang didapati terbentuk adalah $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ dan $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ dengan struktur penghabluran untuk kedua-dua suhu 400°C dan 600°C selama 20 dan 40 jam. Ini selari dengan pemetaan SEM/EDX yang tidak menunjukkan sebarang indikasi pengkayaan oksida pada sub-permukaan sampel tersebut. Ini dapat dicadangkan bahawa lapisan Al_2O_3 yang terbentuk di permukaan sampel masih kukuh dan bertindak sebagai lapisan oksida pelindung dengan tahap kerintangan yang tinggi terhadap pengoksidaan [50]. Selain itu, tiada puncak spektrum yang berunsurkan Si diperhatikan dan ini dapat

dicadangkan bahawa kandungan elemen Si dengan pecahan kecil tidak menunjukkan sebarang indikasi resapan disebabkan oleh kehadiran kandungan fasa Al_2O_3 yang lebih dominan.

Apabila ia melibatkan pengoksidaan Si, dapat dinyatakan bahawa proses penembusan dan migrasi spesies oksidan seperti gas oksigen adalah lebih dominan berbanding migrasi keluar kation Si. Si juga berperanan dalam memperlambatkan proses pengoksidaan dengan mengurangkan kemasukan oksigen ke dalam kerak oksida dan juga didapati mengurangkan kecacatan keliangan dalam kerak oksida yang tumbuh. Ini memberikan kelebihan kepada sampel TLP 4043 dengan kehadiran Si sebagai elemen pengaloi sekunder yang tertinggi dalam mengurangkan kemasukan oksigen dalam substrat logam aloi dan seterusnya menjadi tembok penghalang yang baik dalam menghalang pengoksidaan untuk jangka masa yang tertentu [51,52]. Ini memberikan indikasi bahawa Si memainkan peranan penting dalam mengekalkan sifat pelindung terhadap pengoksidaan dan secara tidak langsung mengukuhkan lagi lapisan Al_2O_3 . Ia seterusnya menghalang degradasi daripada berlaku secara berterusan. Oleh yang demikian, dapat dinyatakan di sini bahawa pertumbuhan oksida pada permukaan logam sampel, iaitu TLP 4043 dan STK 4043 menunjukkan sifat oksida pelindung walaupun didedahkan pada suhu 600°C . Penggunaan logam pengisi ER 4043 yang mengandungi elemen pengaloi sekunder yang tertinggi iaitu Si didapati membantu memperlambatkan proses tindak balas pengoksidaan yang berlaku pada logam terkimpal STK 4043. Secara tidak langsung ia juga dapat membantu mengukuhkan lapisan pelindung Al_2O_3 yang meliputi permukaan sampel dan menghalang pengoksidaan berterusan daripada berlaku.

4. Kesimpulan

Oleh yang demikian, dapat dinyatakan bahawa kandungan elemen pengaloi melalui penggunaan logam pengisi pada struktur terkimpal memainkan peranan penting dalam meningkatkan atau menurunkan prestasi dan tahap kerintangan struktur tersebut. Oleh itu, dapat dinyatakan bahawa penggunaan logam pengisi ER 4043 (Al-5% Si) untuk penyambungan logam Al-Mg-Si seperti STK 4043 adalah bersesuaian untuk aplikasi suhu tinggi sehingga suhu 400°C . Penggunaan logam pengisi ER 4043 (Al-5% Si) untuk penyambungan logam aloi Al-Mg-Si menunjukkan bahawa elemen pengaloi sekunder memainkan peranan penting ke atas kebolehrintang dan ketahanan struktur terkimpal terhadap pengoksidaan suhu tinggi. Penambahan 5% Si daripada logam pengisi dan pembentukan SiO_2 pada permukaan struktur terkimpal kesan pendedahan pengoksidaan didapati efektif dalam merendahkan tahap pengoksidaan dengan mengurangkan kemasukan oksigen ke dalam substrat aloi. SiO_2 juga membantu mengukuhkan lapisan pelindung Al_2O_3 . Kesimpulannya, penggunaan logam pengisi ER 4043 yang mengandungi elemen pengaloi sekunder tertinggi iaitu 5% Si pada struktur terkimpal Al-Mg-Si adalah bersesuaian untuk aplikasi sehingga suhu tinggi. Mekanisme pertumbuhan oksida untuk STK 4043 dan TLP 4043 telah dicadangkan dan dibentangkan.

Rujukan

- [1] Benka, O., and M. Steinbatz. "Oxidation of aluminum studied by secondary electron emission." *Surface Science* 525, no. 1-3 (2003): 207-214. [https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(02\)02561-X](https://doi.org/10.1016/S0039-6028(02)02561-X)
- [2] Chen, Xiaoguang, Jiuchun Yan, Fei Gao, Jinghui Wei, Zhiwu Xu, and Guohua Fan. "Interaction behaviors at the interface between liquid Al-Si and solid Ti-6Al-4V in ultrasonic-assisted brazing in air." *Ultrasonics Sonochemistry* 20, no. 1 (2013): 144-154. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.06.011>
- [3] Czerwinski, F. "Surface oxidation of magnesium alloys during liquid state processing." *Die Casting Engineer* 57, no. 5 (2013): 16-19.
- [4] Hamid, Nur Zarifah Abdul, Nor Fadzillah Mohd Mokhtar, Norihan Md Arifin, Mohammad Hasan, and Abdul Sathar. "Effect of Nonlinear Temperature Profile on Thermal Convection in a Binary Fluid Saturated an Anisotropic Porous Medium." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 56, no. 1 (2019): 43-58.

- [5] Aldoori, Wadhah Hussein, and Ahmed Hasan Ahmed. "The Effect of Varying Tube Diameters on Enhancement Heat Transfer by Forced Convection Through a Horizontal Tube." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 66, no. 1 (2020): 179-188.
- [6] Jabra, J., M. Romios, J. Lai, E. Lee, M. Setiawan, J. R. Ogren, R. Clark et al. "The effect of thermal exposure on the mechanical properties of 2099-T6 die forgings, 2099-T83 extrusions, 7075-T7651 plate, 7085-T7452 die forgings, 7085-T7651 plate, and 2397-T87 plate aluminum alloys." *Journal of Materials Engineering and Performance* 15, no. 5 (2006): 601-607. <https://doi.org/10.1361/105994906X136142>
- [7] Bhatia, Tania, K. Chattopadhyay, and Vikram Jayaram. "Segregation in the MgO-MgAl₂O₄ system processed from nitrate precursors." *Journal of Materials Research* 14, no. 8 (1999): 3319-3327. <https://doi.org/10.1557/JMR.1999.0449>
- [8] Alias, Hajar, Adnan Hameed Rasheed, and Sami D. Salman. "Enhancement of Nanofluid Heat Transfer in Elliptical Pipe and Helical Micro Tube Heat Exchanger." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 66, no. 1 (2020): 53-63.
- [9] Bash, Adel Mahmoud. "Numerical Simulation of Welding Influence on Tensile Strength and Residual Stress of AISI 304 Butt Joints." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 64, no. 1 (2019): 77-91.
- [10] Sherwood, Peter W. "Performance of aluminium in refineries." *Anti-Corrosion Methods and Materials* 6, no. 12 (1959): 375-378. <https://doi.org/10.1108/eb019666>
- [11] Bloch, Joseph, David J. Bottomley, James G. Mihaychuk, Henry M. van Driel, and Roland S. Timsit. "Magnesium surface segregation and its effect on the oxidation rate of the (111) surface of Al-1.45 at% Mg." *Surface Science* 322, no. 1-3 (1995): 168-176. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(95\)90027-6](https://doi.org/10.1016/0039-6028(95)90027-6)
- [12] Fry, A., S. Osgerby, and M. Wright. "Oxidation of alloys in steam environments-a review." *NPL Materials Centre* (2002).
- [13] Guan, K. S., Fubiao Xu, Z. W. Wang, and Hong Xu. "Failure analysis of hot corrosion of weldments in ethylene cracking tubes." *Engineering Failure Analysis* 12, no. 1 (2005): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.06.003>
- [14] Bergsmark, E., C. J. Simensen, and P. Kofstad. "The oxidation of molten aluminum." *Materials Science and Engineering: A* 120 (1989): 91-95. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(89\)90723-5](https://doi.org/10.1016/0921-5093(89)90723-5)
- [15] Daniel, B. S. S., and V. S. R. Murthy. "Directed melt oxidation and nitridation of aluminium alloys: a comparison." *Materials & Design* 16, no. 3 (1995): 155-161. [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(95\)00035-6](https://doi.org/10.1016/0261-3069(95)00035-6)
- [16] Li, H-T., Y. Wang, and Z. Fan. "Mechanisms of enhanced heterogeneous nucleation during solidification in binary Al-Mg alloys." *Acta Materialia* 60, no. 4 (2012): 1528-1537. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.11.044>
- [17] Tillous, K., T. Toll-Duchanoy, E. Bauer-Grosse, L. Hericher, and G. Geandier. "Microstructure and phase composition of microarc oxidation surface layers formed on aluminium and its alloys 2214-T6 and 7050-T74." *Surface and Coatings Technology* 203, no. 19 (2009): 2969-2973. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.03.021>
- [18] Darmadi, Djarot B., Lingga P. Setiawan, and Shahrudin Mahzan. "Evaluating the GMAW joint with a constant heat input." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 54, no. 2 (2019): 142-149.
- [19] Fung, Chang Kai, and Mohd Fadhil Majnis. "Computational Fluid Dynamic Simulation Analysis of Effect of Microchannel Geometry on Thermal and Hydraulic Performances of Micro Channel Heat Exchanger." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 62, no. 2 (2019): 198-208.
- [20] Jumaidin, Ridhwan, Iffa Marina Jopri, Rafidah Hasan, and Muhammad Ilman Hakimi Chua. "Effect of Cooling Medium and Tempering on Microstructures and Hardness of SK3 High Carbon Steel." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 63, no. 2 (2019): 199-209.
- [21] Rahman, ABM Mujibur, Sunil Kumar, and Andrea R. Gerson. "The role of silicon in the corrosion of AA6061 aluminium alloy laser weldments." *Corrosion Science* 52, no. 6 (2010): 1969-1975. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.02.012>
- [22] Kareem, Rabiha Saleem, and Ahmed M. Abdulhadi. "Effect of MHD and Porous Media on Nanofluid Flow with Heat Transfer: Numerical Treatment." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 63, no. 2 (2019): 317-328.
- [23] Nor, Fazrul Mohd, Abd Rahman Tamuri, and Abd Khamim Ismail. "New Development in Determination of Metal Volume Thermal Expansion Measurement Using Hydrostatic Weighing System (HWS)." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 58, no. 1 (2019): 78-83.
- [24] He, J., Q. Z. Cai, H. H. Luo, L. Yu, and B. K. Wei. "Influence of silicon on growth process of plasma electrolytic oxidation coating on Al-Si alloy." *Journal of Alloys and Compounds* 471, no. 1-2 (2009): 395-399. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.03.114>
- [25] Hwang, In Jun, Duck Young Hwang, Yong Min Kim, Bongyoung Yoo, and Dong Hyuk Shin. "Formation of uniform passive oxide layers on high Si content Al alloy by plasma electrolytic oxidation." *Journal of Alloys and Compounds* 504 (2010): S527-S530. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.02.074>

- [26] Moon, Jaehyun, Yong-Hae Kim, Choong-Heui Chung, Su-Jae Lee, Dong-Jin Park, and Yoon-Ho Song. "Growth of thin Si oxide in a cyclic oxygen plasma environment below 200°C." *Applied surface science* 254, no. 20 (2008): 6422-6427. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.04.029>
- [27] Kofstad, Per. "High temperature corrosion." Elsevier Applied Science Publishers, Crown House, Linton Road, Barking, Essex IG 11 8 JU, UK, 1988. (1988).
- [28] Chęćmanowski, J. G., and B. Szczygieł. "High temperature oxidation resistance of FeCrAl alloys covered with ceramic SiO₂-Al₂O₃ coatings deposited by sol-gel method." *Corrosion Science* 50, no. 12 (2008): 3581-3589. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.09.012>
- [29] Wood, G. C., and F. H. Stott. "Oxidation of alloys." *Materials Science and Technology* 3, no. 7 (1987): 519-530. <https://doi.org/10.1080/02670836.1987.11782263>
- [30] Sukamta, and Sudarja. "Pressure gradient on gas-liquid two-phase flow with high viscosity in capillary pipe with the slope of 5 degrees of horizontal pipe." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 63, no. 2 (2019): 210-217.
- [31] Tanasta, Zaimi, Pauziah Muhamad, Noriyuki Kuwano, Mohd Hishamuddin Unuh, and Mohd Hafiz. "Effect of High-Temperature Annealing Heat Treatment to Microstructure of Aluminium Nitride on Sapphire Substrate." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 56, no. 2 (2019): 267-275.
- [32] Nylund, Anders, Kaoru Mizuno, and Ingemar Olefjord. "Influence of Mg and Si on the oxidation of aluminum." *Oxidation of Metals* 50, no. 3-4 (1998): 309-325. <https://doi.org/10.1023/A:1018844506192>
- [33] Bandaru, Narendra, Darshan Ajmera, Krishna Manwani, Sasmita Majhi, and Emila Panda. "Microstructural Analysis of Multi-phase Ultra-Thin Oxide Overgrowth on Al-Mg Alloy by High Resolution Transmission Electron Microscopy." *Transactions of the Indian Institute of Metals* 70, no. 5 (2017): 1269-1275. <https://doi.org/10.1007/s12666-016-0920-x>
- [34] Panda, E., L. P. H. Jeurgens, and E. J. Mittemeijer. "Interface thermodynamics of ultra-thin, amorphous oxide overgrowths on AlMg alloys." *Acta Materialia* 58, no. 5 (2010): 1770-1781. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.11.019>
- [35] Funderburk, R. S. "Selecting Filler Metals: Electrodes for Stress Relieved Applications, Key Concepts in Welding Engineering." *Welding Innovation* 18, no. 2 (2001).
- [36] Günster, J., J. Stultz, S. Krischok, D. W. Goodman, P. Stracke, and V. Kempter. "Mg clusters on MgO surfaces: Characterization with metastable impact electron spectroscopy, ultraviolet photoelectron spectroscopy (HeI), and temperature programmed desorption." *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 17, no. 4 (1999): 1657-1662. <https://doi.org/10.1116/1.581868>
- [37] Davies, G. J., and J. G. Garland. "Solidification structures and properties of fusion welds." *International Metallurgical Reviews* 20, no. 1 (1975): 83-108. <https://doi.org/10.1179/imttr.1975.20.1.83>
- [38] Hanabe, Murali, Vikram Jayaram, and T. A. Bhaskaran. "Growth of Al₂O₃Al composites from Al-Zn alloys." *Acta Materialia* 44, no. 2 (1996): 819-829. [https://doi.org/10.1016/1359-6454\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/1359-6454(95)00185-9)
- [39] Hasani, S., M. Panjepour, and M. Shamanian. "Oxidation and kinetic analysis of pure aluminum powder under nonisothermal condition." *Open Access Scientific Reports* 1, no. 8 (2012): 1-8.
- [40] Meyer, Dirk C., Alexandr A. Levin, and Peter Paufler. "Crystalline coatings of aluminosilicate Al₂SiO₅ polymorphs formed by solid state reaction of alumina layers with silicon/silica substrates." *Thin Solid Films* 489, no. 1-2 (2005): 5-16. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.04.105>
- [41] Han, Susan, and David John Young. "Oxidation-Nitridation of Ni-Cr-Al alloys." *Materials Research* 7, no. 1 (2004): 11-16. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392004000100003>
- [42] Novák, P., V. Knotek, J. Šerák, A. Michalčová, and D. Vojtěch. "Synthesis of Fe-Al-Si intermediary phases by reactive sintering." *Powder Metallurgy* 54, no. 2 (2011): 167-171. <https://doi.org/10.1179/174329009X449314>
- [43] Frutos, E., D. Alvarez, L. Fernandez, and José Luis González-Carrasco. "Effects of bath composition and processing conditions on the microstructure and mechanical properties of coatings developed on 316 LVM by hot dipping in melted AlSi alloys." *Journal of Alloys and Compounds* 617 (2014): 646-653. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.08.020>
- [44] Jiang, Hui-Ren, Zhong-Lei Wang, Xiao-ran Feng, Zi-qiang Dong, Liang Zhang, and L. I. U. Yong. "Effects of Nb and Si on high temperature oxidation of TiAl." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 18, no. 3 (2008): 512-517. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60090-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60090-4)
- [45] Afoegba, S. C. "An investigation to improve the mechanical properties of A36 weldment." *Pyrex Journal of Engineering and Manufacturing Technology* 3, no. 1 (2018): 1-9.
- [46] Al-Saraireh, Falah Mustafa. "The effect of current and voltage on mechanical properties of low carbon steel products." *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)* 9, no. 3 (2018): 134-142.

- [47] Budiarto, Kimar Turnip, and Hantariksa. "The effect of current gouging arc welding analysis of A283 Gr C steel to the tensile strength, hardness and microstructure." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 420, no. 1, p. 012055. IOP Publishing, 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/420/1/012055>
- [48] Imurai, Suttawan, Julatep Kajornchaiyakul, Chachana Thanachayanont, John TH Pearce, and Torranin Chairuangstri. "Age Hardening and Precipitation Behavior of an Experimental Cast Al-Mg-Si Alloy Treated by T6 and T616 Heat Treatments." *Chiang Mai Journal Science* 37, no. 2 (2010): 269-281.
- [49] Kiyohara, Pedro K., Helena Souza Santos, Antonio C. Vieira Coelho, and Pécio De Souza Santos. "Structure, surface area and morphology of aluminas from thermal decomposition of Al (OH)(CH₃COO) 2 crystals." *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 72, no. 4 (2000): 471-495. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652000000400003>
- [50] Kolawole, F. O., S. K. Kolawole, J. O. Agunsoye, J. A. Adebisi, S. A. Bello, and S. B. Hassan. "Mitigation of corrosion problems in API 5L steel pipeline-a review." *Journal of Materials and Environmental Sciences* 9, no. 8 (2018): 2397-2410.
- [51] Melchers, Robert E. "A review of trends for corrosion loss and pit depth in longer-term exposures." *Corrosion and Materials Degradation* 1, no. 1 (2020): 42-58. <https://doi.org/10.3390/cmd1010004>
- [52] Gupta, S., S. V. Datla, C. Sekhar, and N. Ali Shareef. "An experimental investigation on A36 carbon steel in submerged arc welded joints." *International Journal of Mechanical Engineering and Technology* 9, no. 4 (2018): 302-311.