



## Kesan Logam Pengisi Terhadap Struktur Terkimpal Al 6061 Yang Teroksida Pada 600°C *Effects of Filler Metal Towards Oxidation of Al 6061 Welded Joint at 600°C*

Open  
Access

Nur Azida Che Lah<sup>1,\*</sup>, Muhamad Hellmy Hussin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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 20 July 2020

Accepted 25 July 2020

Available online 19 November 2020

### ABSTRACT

Sampel struktur terkimpal iaitu STK 6061 ER 4043 dan STK 6061 ER 5356 masing-masing dikimpal dengan logam pengisi ER 4043 (Al-5%Si) dan ER 5356 (Al-5%Mg) telah dioksidakan dalam persekitaran udara biasa pada suhu 600°C selama 40 jam. Fokus analisis adalah pada logam terkimpal di mana logam asas dan logam pengisi melebur bersama menghasilkan komposisi kimia yang berlainan. Analisis merangkumi pengoksidaan kinetik, ujian kecacatan bahan, pencirian morfologi permukaan menggunakan SEM-EDX, keratan rentas, pemetaan elemen dan fasa oksida lapisan kerak yang terbentuk pada permukaan aloi tersebut. Keputusan kajian menunjukkan logam terkimpal yang mengandungi Mg cenderung meningkatkan dan mempercepatkan proses pengoksidaan, manakala logam terkimpal yang mengandungi Si berpotensi meningkatkan tahap rintangan terhadap pengoksidaan.

*Samples of STK 6061 ER 4043 and STK 6061 ER 5356 were welded respectively using ER 4043 (Al-5%Si) and ER 5356 (Al-5%Mg) filler metal and were oxidized in air environment at 600°C for 40 hours. The focus of the analysis is on the welded metal where the base metal and the filler metal melt together to produce different chemical compositions. The analysis includes kinetic oxidation, material defect testing, surface morphology characterization using SEM-EDX, cross sectioning, elemental mapping and the oxide phases formed on the alloy surface. The results show that welded metal containing Mg tends to accelerate and accelerate the oxidation process, whereas welded metal containing Si may increase the resistance to oxidation.*

#### Keywords:

Struktur terkimpal; Al 6061; MgO; SiO<sub>2</sub>;  
pengoksidaan; suhu tinggi

*Welded joint; Al 6061; MgO; SiO<sub>2</sub>;  
oxidation; high temperature*

Copyright © 2021 PENERBIT AKADEMIA BARU - All rights reserved

\* Corresponding author.

E-mail address: [nurazida@unikl.edu.my](mailto:nurazida@unikl.edu.my)

<https://doi.org/10.37934/arfmts.78.1.4859>

## 1. Pengenalan

Pemilihan dan rekabentuk sesuatu produk berasaskan aluminium (Al) merupakan asas utama dan penting untuk difahami disebabkan oleh sifatnya yang unik [1-3]. Penggunaan Al tulen secara komersial adalah terhad terutamanya apabila melibatkan struktur terkimpal. Oleh yang demikian, pembangunan dan pembaharuan struktur terkimpal aloi Al dengan penambahbaikan dalam sifat mekanikal, rintangan kakisan dan kebolehkimpalan amat diperlukan terutamanya dalam pelbagai bidang industri seperti perkapalan dan automotif [4]. Selain daripada rawatan haba, penggunaan elemen pengaloian daripada penambahan logam pengisi seperti magnesium (Mg), silikon (Si), mangan (Mn), zink (Zn) dan kuprum (Cu) memainkan peranan penting dalam meningkatkan prestasi bahan kepada tahap yang optimum [5,6]. Apabila melibatkan kimpalan yang merupakan salah satu teknologi pembuatan penting dalam industri aloi Al, fokus masalah adalah berpunca daripada transformasi fasa dan fenomena pelembutan yang disebabkan oleh haba semasa proses kimpalan dijalankan [7-9].

Selain itu, semasa proses solidifikasi atau pemejalan, faktor seperti pertumbuhan fasa, halaju pertumbuhan, komposisi kimia, dan struktur mikro fasa merupakan fungsi kepada pembentukan keadaan antaramuka pepejal-cecair, contohnya suhu, komposisi, orientasi dan struktur kristal [1,10]. Apabila struktur terkimpal Al ini terdedah kepada pengoksidaan yang melibatkan suhu tinggi, elemen-elemen pengaloian dan bendasing memberi kesan kepada pertumbuhan dan komposisi oksida yang berpotensi untuk mengurangkan atau meningkatkan kadar pengoksidaan [11]. Pada dasarnya, kesan pengoksidaan suhu tinggi pada logam asas Al-Mg atau siri 6000 telah dikaji dan dibincangkan dalam kajian-kajian terdahulu [12-17]. Walaubagaimanapun, apabila ia melibatkan struktur terkimpal, sifat dan prestasi aloi akan mengalami perubahan hasil daripada kesan pengaruh suhu dan elemen pengaloian yang digunakan. Keadaan ini juga seterusnya akan mempengaruhi pertumbuhan dan morfologi logam oksida. Kajian menunjukkan bahawa walaupun kepekatan elemen pengaloian rendah, didapati ia berpotensi untuk mengurangkan atau meningkatkan kadar pengoksidaan [2,17-19]. Pengaloian Mg dan Al meningkatkan sifat mekanikal tetapi mengurangkan tahap rintangan terhadap kakisan. Bloch *et al.*, [3] mendapati apabila aloi Al-Mg dioksidakan pada suhu melebihi 377°C, lapisan tebal MgO didapati terbentuk pada permukaan substrat logam. Selain itu, didapati di bawah suhu pengkristalan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> iaitu 400°C, Mg<sup>2+</sup> diperkaya pada bahagian dalaman logam oksida aloi Al-Mg. Laporan juga menyatakan pada suhu melebihi 400°C, MgO terbentuk sebagai fasa berasingan pada permukaan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [20]. Selain itu, penambahan Si dilaporkan dapat memperlambatkan tindakbalas kinetik pengoksidaan [21-24].

Kajian-kajian terdahulu yang melibatkan proses pengoksidaan pada logam asas Al-Mg dan Al-Si dalam persekitaran udara suhu tinggi merupakan asas utama kepada kajian ini. Evolusi mikrostruktur pada logam asas Al-Mg dan Al-Si yang terlibat setelah melalui pendedahan kepada proses pengoksidaan memberi indikasi berbeza seperti bentuk butiran, saiz butiran, perubahan fasa dan komposisi bahan tersebut [12-24]. Walaubagaimanapun, kebanyakan kajian-kajian terdahulu membincangkan fokus kajian terhadap tindak balas pengoksidaan pada logam asas dan mempunyai pendekatan yang berbeza. Manakala kajian yang dijalankan ini melibatkan logam asas yang telah dikimpal dengan menggunakan logam pengisi dan struktur terkimpal ini mempunyai mikrostruktur dan fasa bahan yang berbeza jika dibandingkan dengan logam asas Al-Mg dan Al-Si. Bentuk geometrik dan perubahan mikrostruktur pada struktur terkimpal kesan daripada proses kimpalan dan tindak balas pengoksidaan yang dialami memberikan indikasi kompleks yang sukar untuk difahami. Oleh yang demikian, hubungkait di antara peranan elemen pengaloian kesan daripada penambahan logam pengisi semasa proses kimpalan dijalankan yang membentuk struktur terkimpal perlu difahami terlebih dahulu. Seterusnya, proses tindak balas kompleks yang dialami oleh struktur terkimpal Al

6061 terhadap pengoksidaan pada suhu tinggi akan dibincangkan dengan lebih terperinci dengan pendekatan signifikan yang berbeza. Oleh itu, kajian ini dapat memberikan pemahaman yang lebih terperinci dan faktor-faktor penting yang dibincangkan berpotensi untuk membantu meningkatkan asas pembelajaran dalam bidang kakisan. Selain itu, kajian ini juga merangkumi pemahaman terhadap analisis morfologi pertumbuhan oksida, fasa oksida, pemetaan elemen dan komposisi bahan pada struktur terkimpal. Keputusan kajian kesan pengoksidaan yang dibincangkan juga dicadangkan agar dapat menyumbang kepada interpretasi dan asas pemahaman kesan logam pengisi terhadap pengoksidaan pada struktur terkimpal dan juga terhadap tahap rintangan lapisan oksida yang terbentuk.

## 2. Kaedah Ujikaji

Sampel yang digunakan dalam ujian pengoksidaan ini adalah struktur terkimpal (STK) aloi Al 6061 yang disediakan menggunakan mesin kimpalan gas arka (GMAW) dengan voltan 22-25V dan arus 185-200A. Proses kimpalan logam ini menggunakan dua jenis logam pengisi iaitu, ER 4043 (Al-5%Si) dan ER 5356 (Al-5%Mg). Jadual 1 menunjukkan komposisi kimia struktur terkimpal STK 6061 ER 4043 dan STK 6061 ER 5356. Sampel dengan dimensi 58mm x 12mm x 5mm disediakan dan dicanai serta dilicinkan sehingga grit 1200. Setelah itu, sampel dicanai dengan menggunakan cairan berlian 3  $\mu\text{m}$  dan 1  $\mu\text{m}$ . Kemudian, sampel tersebut dibersihkan menggunakan cecair etanol sebelum didedahkan pada pengoksidaan suhu tinggi. Kemudian, sampel tersebut didedahkan pada pengoksidaan suhu 600°C di dalam persekitaran udara panas selama 40 jam. Sampel struktur terkimpal yang telah teroksida, dianalisis dan dicirikan menggunakan mikroskop imbasan elektron (SEM) yang dilengkapi dengan spektroskopi penyerakan tenaga sinar-X (EDS). Ini merangkumi analisis morfologi permukaan, dan keratan rentas bahan. Ujian kecacatan bahan dijalankan menggunakan imbasan tomografi berkomputer sinar-X (CT Scan) dan fasa oksida yang terbentuk ditentukan menggunakan teknik pembelauan sinar-X (XRD) model Bruker AXS:D8.

**Jadual 1**

Komposisi kimia dalam peratus berat (bt %) untuk logam terkimpal STK 4043 dan STK 5356 yang digunakan dalam ujian pengoksidaan suhu tinggi

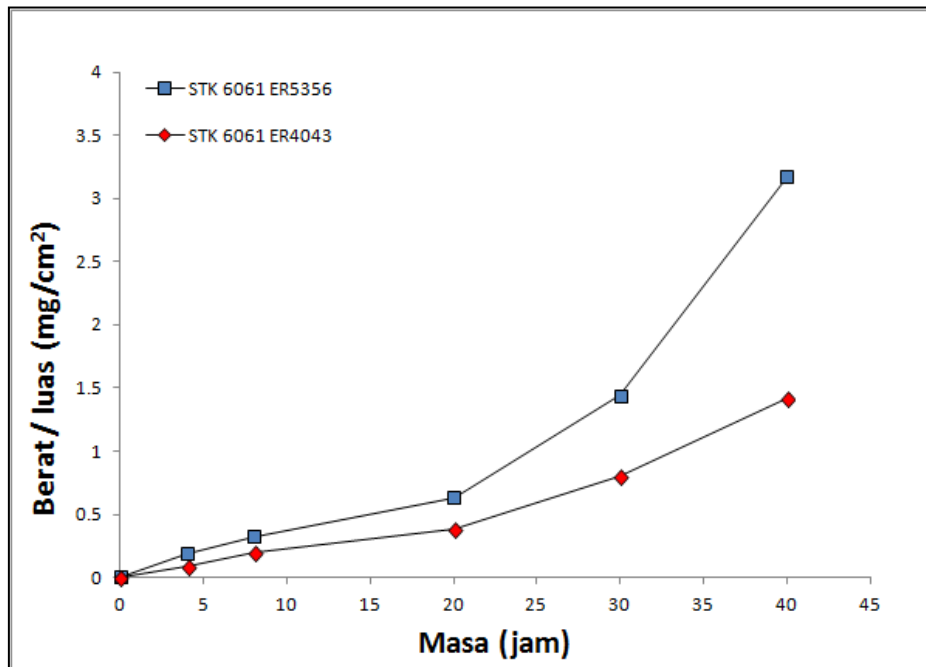
| Logam Terkimpal  | Si    | Fe    | Cu    | Mn    | Mg    | Cr    | Zn   | Ti    | V     | Al |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|----|
| STK 6061 ER 5356 | 0.134 | 0.157 | 0.024 | 0.09  | 4.37  | 0.09  | 0.01 | 0.109 | -     | 95 |
| STK 6061 ER 4043 | 2.06  | 0.183 | 0.146 | 0.003 | 0.501 | 0.054 | -    | 0.007 | 0.005 | 97 |

## 3. Keputusan dan Perbincangan

### 3.1 Pengosidaan Kinetik

Sampel STK 6061 4043 dan STK 6061 5356 telah melalui ujian pengoksidaan suhu tinggi pada suhu 600°C dalam medium udara biasa untuk jangkamasa pengoksidaan selama 4, 8, 20, 30, dan 40 jam. Rajah 1 menunjukkan graf kinetik pengoksidaan iaitu peningkatan berat per unit luas untuk kedua-dua sampel struktur terkimpal. Berdasarkan gambarajah tersebut, kedua-dua sampel menunjukkan peningkatan berat per unit luas terhadap masa setelah melalui proses pengoksidaan pada suhu 600°C. Tiada pengurangan berat direkodkan. Peningkatan berat sampel untuk kedua-dua jenis sampel struktur terkimpal menunjukkan peningkatan berterusan. Peningkatan berat yang drastik direkodkan selepas 20 jam iaitu titik di mana dicadangkan berlakunya kinetik pemecahan

pengoksidaan. Corak kedua-dua graf menunjukkan kehadiran lekuk pemisah pada titik 20 jam. Lekuk ini merupakan lekuk transisi di mana berlakunya perubahan daripada peningkatan berat yang rendah kepada drastik. Secara keseluruhan didapati sampel STK 6061 ER 5356 menunjukkan peningkatan berat yang lebih tinggi berbanding sampel STK 6061 ER 4043. Seterusnya, analisis perincian difokuskan untuk sampel yang teroksida selama 40 jam.



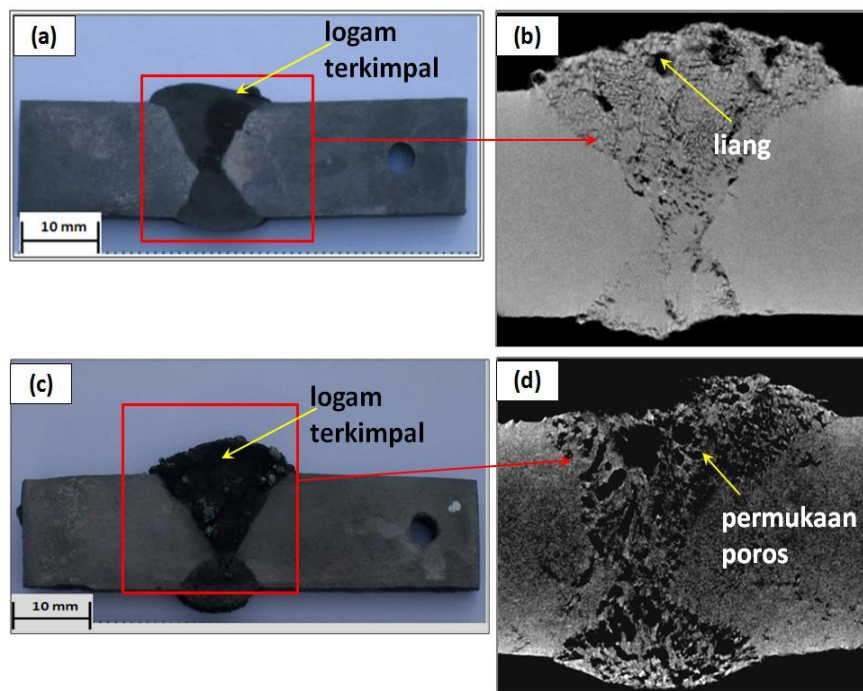
**Rajah 1.** Graf peningkatan berat sampel STK 6061 ER 4043 dan STK 6061 ER 5356 yang teroksida pada suhu 600°C selama 40 jam

### 3.2 Analisis Kecacatan Bahan

Rajah 2(a) hingga Rajah 2(d) menunjukkan sampel STK 6061 ER 4043 dan STK 6061 ER 5356 yang telah teroksida pada suhu 600°C selama 40 jam. Imej optikal dan mikrograf ujian tidak musnah sinar-X disertakan untuk analisis kecacatan sampel kesan daripada proses pengoksidaan yang dijalankan. Berdasarkan rajah tersebut, kedua-dua jenis sampel menunjukkan perubahan permukaan yang jelas selari dengan peningkatan berat yang telah direkodkan.

Kedua-dua sampel struktur terkimpal didapati teroksida dengan bahagian logam terkimpal menunjukkan perubahan yang lebih jelas berbanding logam asas. Sampel STK 6061 ER 4043 menunjukkan perubahan warna kepada kelabu kehitaman dengan permukaan berbutir halus (Rajah 2(a)) setelah dioksidakan pada suhu 600°C. Keadaan ini diperincikan lagi dengan imej mikrograf sampel STK 6061 ER 4043 yang menunjukkan bahagian dalaman logam terkimpal yang mempunyai kecacatan keliangan (Rajah 2(b)). Liang-liang yang didapati bersambungan di antara satu sama lain ini menyebabkan keadaan permukaan menjadi porous. Manakala, bahagian logam asas hanya menunjukkan perubahan warna iaitu dari kelabu cerah kepada kelabu dengan tompokan gelap yang tidak sekata dan tiada sebarang kecacatan dalaman direkodkan. Seterusnya, sampel STK 6061 ER5356 yang teroksida pada suhu 600°C menyebabkan bahagian logam terkimpal berubah warna kepada kehitaman dengan permukaan berbutir kasar dan berpasir (Rajah 2(c)). Selain itu, logam asas menunjukkan keadaan berbeza dan berwarna kelabu gelap. Imej mikrograf sampel STK 6061 ER 5356 menunjukkan kesan degradasi yang lebih tinggi dan lebih porous berbanding STK 6061 ER 4043 (Rajah 2(d)). Imej juga menunjukkan sampel teroksida tersebut mempunyai lurah-lurah halus yang

bersambung di antara satu sama lain membentuk keadaan fizikal permukaan yang lebih porous. Bentuk logam terkimpal juga didapati berubah dengan permukaan yang kasar dan seakan terpecah-pecah.



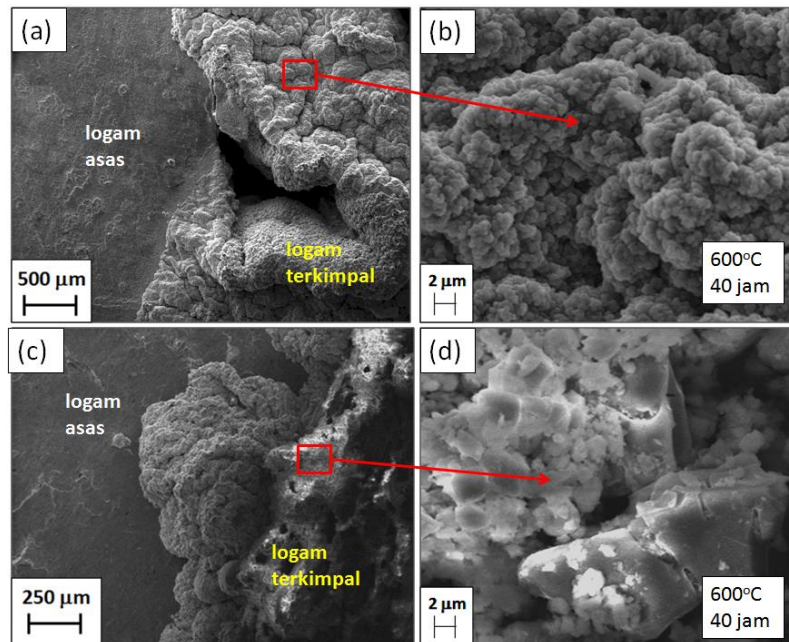
**Rajah 2.** Imej optikal dan mikrograf ujian tidak musnah sinar-X untuk sampel struktur terkimpal yang teroksida pada suhu 600°C selama 40 jam, (a)-(b) STK 6061 ER 4043, dan (c)-(d) STK 6061 ER 5356

### 3.3 Analisis Morfologi dan Keratan Rentas

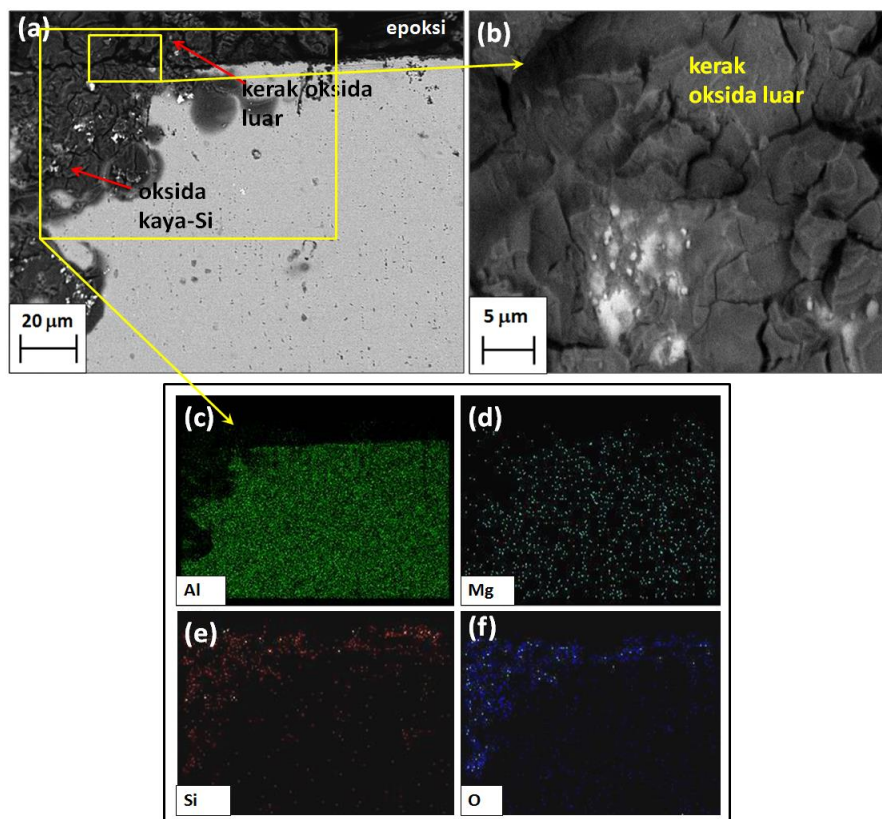
Rajah 3(a) dan Rajah 3(b), menunjukkan imej mikrograf SEM untuk permukaan luar bahagian logam terkimpal STK 6061 ER 4043. Berdasarkan rajah tersebut, morfologi permukaan sampel didapati diliputi dan diselaputi dengan butiran-butiran halus yang tumbuh dan didapati bersambung di antara satu sama lain setelah didedahkan pada suhu 600°C selama 40 jam. Butiran yang bersambungan ini didapati membentuk kumpulan butiran kasar seperti bentuk bunga kobis. Manakala, Rajah 3(c) dan Rajah 3(d) adalah imej mikrograf untuk permukaan luar sampel struktur terkimpal STK 6061 ER 5356. Sampel yang didedahkan selama 40 jam ini didapati menunjukkan kesan pengoksidaan dengan lapisan kerak oksida luaran yang lebih tebal. Ia juga didapati terbentuk dengan ciri-ciri kerak oksida yang porous pada permukaan atas substrat sampel.

Lapisan kerak oksida yang terbentuk pada permukaan sampel struktur terkimpal STK 6061 ER 5356 menunjukkan kehadiran kepingan-kepingan oksida putih dan kasar. Ia juga kelihatan bersambungan antara satu sama lain membentuk permukaan yang lebih porous berbanding STK 6061 ER 4043. Kepingan-kepingan oksida putih didapati bertindihan antara satu sama lain dengan struktur permukaan yang tidak rata (Rajah 3(d)). Rajah 4(a) hingga Rajah 4(f) menunjukkan lapisan kerak oksida luaran yang tumbuh pada permukaan sampel STK 6061 ER 4043 yang dikimpal menggunakan logam pengisi ER 4043 (Al-5%Si) dan analisis pemetaan elemen untuk sampel tersebut. Lapisan kerak oksida luar menunjukkan kesan pecah dan retak kepingan berwarna kelabu gelap (Rajah 4(b)). Ketebalan lapisan juga didapati tidak sekata. Pada lokasi tertentu, sampel menunjukkan kehadiran kerak oksida kaya -Si yang didapati tertular ke bahagian dalaman substrat (Rajah 4(a)). Berdasarkan pemetaan elemen, kerak oksida ini mengandungi elemen Si. Manakala dan bahagian yang substrat

dengan tahap degradasi yang rendah didapati mempunyai permukaan yang licin dan bahagian ini didapati mempunyai kandungan Al yang tinggi (Rajah 4(a) dan Rajah 4(c)).

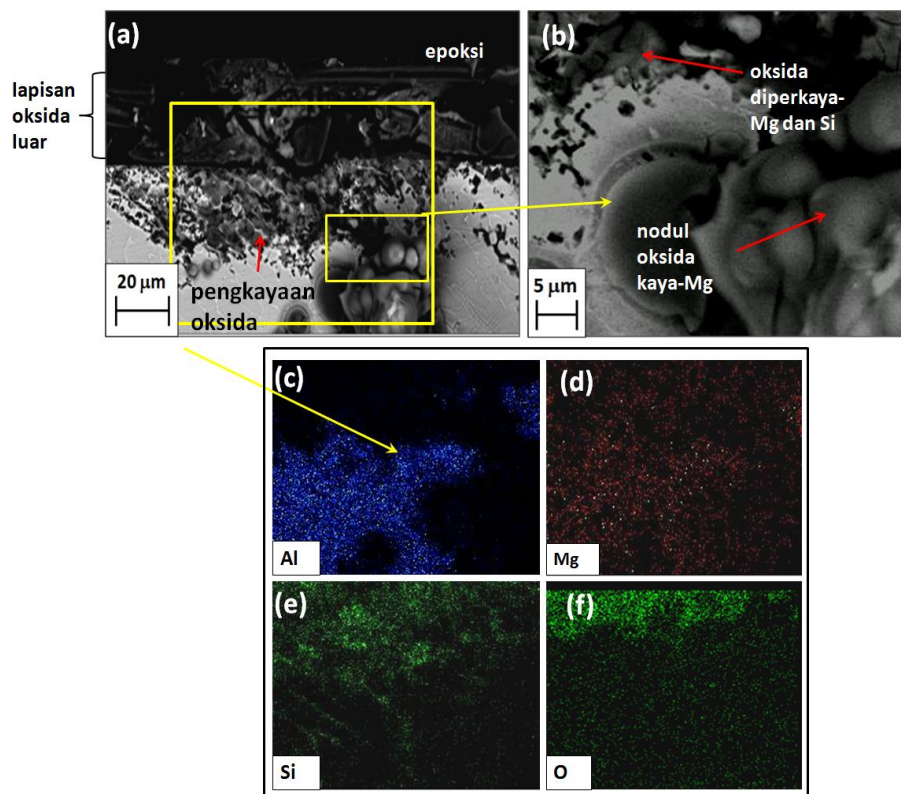


**Rajah 3.** Imej mikrograf SEM untuk morfologi permukaan sampel struktur terkimpal yang teroksida pada suhu 600°C selama 40 jam, (a)-(b) STK 6061 ER 4043, dan (c)-(d) STK 6061 ER 5356



**Rajah 4.** Keratan rentas dan analisis pemetaan elemen sampel STK 6061 ER 4043 yang teroksida dalam udara biasa 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 (f) O

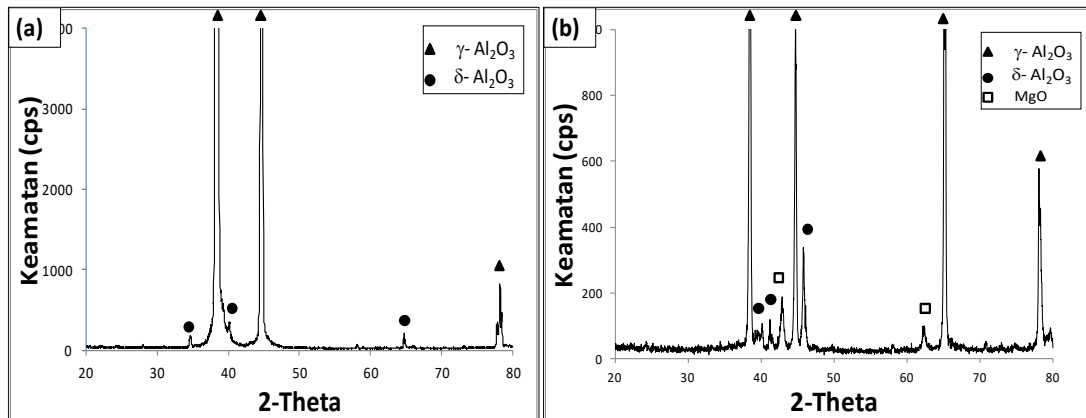
Rajah 5(a) dan Rajah 5(b) menunjukkan lapisan kerak oksida luar yang terbentuk pada permukaan atas substrat sampel STK 6061 ER 5356. Kerak oksida ini mempunyai permukaan tidak rata dan terpecah-pecah dengan anggaran ketebalan di antara 30 - 35 $\mu\text{m}$ . Pemerhatian tahap degradasi sampel STK 6061 ER 5356 yang teroksidasi menunjukkan kesan pengoksidaan yang tinggi. Kerak oksida yang terpecah-pecah tersebut memberikan indikasi kerapuhan yang tinggi. Ruang-ruang kosong yang halus pada permukaan lapisan kerak oksida tersebut memberikan kelebihan untuk kemasukan anion oksigen dengan lebih mudah dan seterusnya meningkatkan degradasi sampel tersebut. Manakala, berdasarkan analisis pemetaan elemen, didapati pengkayaan oksida yang mengandungi Mg dan Si yang terbentuk di bawah lapisan kerak oksida (Rajah 5(c) hingga Rajah 5(f)). Selain daripada itu, bahagian dalaman substrat menunjukkan kehadiran nodul-nodul oksida yang bersambungan antara satu sama lain. Nodul oksida yang bertindihan ini didapati diperkaya dengan oksida kaya-Mg.



**Rajah 5.** Keratan rentas dan analisis pemetaan elemen sampel STK 6061 ER 5356 yang teroksidasi dalam udara biasa 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 (f) O

### 3.4 Fasa Oksida

Spektrum XRD dengan keamatan yang tertinggi untuk kedua-dua jenis sampel direkodkan untuk fasa oksida  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  pada ketiga-tiga bacaan 2-theta iaitu 37.539°, 45.668°, dan 66.602° (Rajah 6(a) dan Rajah 6(b)). Selain itu, sampel STK 6061 ER 4043 menunjukkan puncak keamatan spektrum  $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$  pada bacaan 2-theta 27.688°. Seterusnya, STK 6061 ER 5356 didapati mengandungi fasa  $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$  dan MgO direkodkan pada bacaan 2-theta 42.917°. Kehadiran spektrum ini jelas menunjukkan perbezaan fasa yang terbentuk berbanding STK 6061 ER 4043.



**Rajah 6.** Spektrum XRD fasa oksida yang terbentuk pada struktur terkimpal yang teroksidasi pada suhu 600°C selama 40 jam, (a) STK 6061 ER 4043, dan (b) STK 6061 ER 5356

Secara dasarnya, penggunaan dan penambahan logam pengisi semasa proses menyambung logam asas menunjukkan kesan berbeza apabila struktur penyambungan tersebut terdedah kepada pengoksidaan suhu tinggi [25,26]. Secara tidak langsung, kaedah dan proses penyambungan kimpalan memainkan peranan penting. Ini adalah kerana ia melibatkan proses pemanasan suhu tinggi, peleburan logam dan seterusnya cairan logam tersebut akan memejal dan menghasilkan komposisi kimia yang tidak seragam [25-27]. Bahagian logam terkimpal merupakan zon di mana logam asas dan logam pengisi melebur bersama menghasilkan komposisi kimia yang berlainan dan perbezaan ini mempengaruhi proses pengoksidaan dan kakisan logam [28-31]. Selain itu, mikrostruktur logam terkimpal yang terbentuk dan kehalusan butiran memberi kesan secara langsung terhadap formasi keliangan, dan pengasingan mikro [20,32-35]. Ini menunjukkan bahawa mikrostruktur yang tidak homogen pada sempadan kimpalan juga memberikan kesan yang ketara dan merupakan penyebab kepada kegagalan struktur terkimpal tersebut seperti keretakan hidrogen, kakisan dan keretakan kakisan tegasan [36-40]. Kopp *et al.*, [41] juga mendapati bahawa kesan daripada morfologi permukaan liang-liang akan tumbuh dalam bentuk satah, cekung, dan cembung pada substrat yang sama.

Berdasarkan keputusan morfologi, SEM-EDX dan pencirian fasa oksida menggunakan XRD, apabila aloi STK 6061 ER 5356 ini dipanaskan pada suhu tinggi iaitu 600°C, lapisan oksida pelindung  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang wujud pada asalnya, terdegradasi secara pantas dan membentuk MgO. Kajian telah membuktikan apabila suhu pengoksidaan ditingkatkan, fasa-fasa yang berlainan akan terbentuk seperti MgO dan  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  [40,41]. Berbeza dengan aloi STK 6061 ER 4043 yang tidak menunjukkan pembentukan fasa MgO disebabkan oleh kandungan Mg yang rendah. Secara perbandingan, STK 6061 ER 5356 menunjukkan tahap degradasi yang lebih tinggi berbanding STK 6061 ER 4043 disebabkan oleh perbezaan kandungan elemen hasil daripada penambahan logam pengisi [42-44]. Ini menjurus kepada pembentukan fasa oksida yang berbeza kesan daripada unsur pengaloi semasa proses kimpalan dijalankan [45,46]. Ini juga telah dicadangkan bahawa fasa formasi pembentukan dan fasa keterlarutan dalam proses pengoksidaan menyebabkan perubahan komposisi pada bahagian dalaman aloi [11,30,31]. Berdasarkan perubahan komposisi dan mikrostruktur struktur terkimpal yang telah mengalami proses solidifikasi dan penyejukan secara pantas semasa proses kimpalan dan juga pertumbuhan logam oksida yang berbeza dapat dinyatakan bahawa kandungan Mg memainkan peranan penting dalam mengurangi tahap rintangan terhadap pengoksidaan pada suhu tinggi berbanding Si. Ini juga dibuktikan oleh Van Agterveld *et al.*, [19] bahawa pengasingan Mg ke permukaan substrat aloi dapat mengurangkan sifat mekanikal bahan kerana ia menjurus kepada pembentukan lapisan oksida permukaan yang tebal dan rapuh. Ini juga memberi kesan kepada tahap rintangan kakisan.



Daya lekatan lapisan oksida juga akan berkurangan disebabkan oleh kerapuhan lapisan oksida yang terbentuk [28,32,47]. Kehadiran Mg juga didapati meningkatkan tahap pengoksidaan selari dengan hakikat bahawa Mg mempunyai ikatan yang kuat dengan O berbanding Al. Fakta menunjukkan bahawa haba formasi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  adalah 1113.6 kJ/mol, manakala MgO adalah 1202.2 kJ/mol iaitu lebih tinggi berbanding  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [3,5]. Keputusan XRD dan pemetaan EDX juga selari dengan penemuan Panda *et al.*, [17] yang menyatakan bahawa apabila suhu pendedahan  $> 127^\circ\text{C}$ , pengasingan Mg ke arah antaramuka aloi – oksida daripada substrat berasaskan Al menunjukkan kehadiran  $\text{Mg}^{2+}$ . Selain daripada peranan Mg yang lebih menjurus kepada penurunan sifat kerintangan bahan terhadap pengoksidaan, perbincangan ini juga memfokuskan kepada peranan Si yang menjadi elemen pengalioian utama untuk STK 6061 ER 4043 [48]. Nylund *et al.*, [11] menyatakan perbezaan antara  $\text{Mg}^{2+}$  dan  $\text{Si}^{4+}$  ialah pengkayaan Mg adalah lebih tinggi berbanding Si. Ini adalah kerana ikatan Si yang lemah terikat dengan O berbanding Al, dan tiada pengangkutan  $\text{Si}^{4+}$  yang berlaku melalui sempadan butiran dalam kristal oksida. Beliau juga mendapati tiada pengkayaan  $\text{Si}^{4+}$  pada lapisan oksida luar pada suhu melebihi  $400^\circ\text{C}$ . Ren *et al.*, [49] menyatakan bahawa peningkatan Si dalam substrat Al akan meningkatkan modulus kekenyalan, kestabilan dimensi terma, kekonduksian terma dan dapat mengurangkan pengembangan terma pada komposit berasaskan Al. Beliau juga mendapati bahawa apabila kandungan Mg melebihi 8%, potensi terbentuknya kecacatan keliangan adalah tinggi. Selain itu juga, kandungan Si yang berlebihan, berpotensi untuk pembentukan fasa intermetalik  $\text{Mg}_2\text{Si}$  yang mana akan meningkatkan kekuatan mekanikal bahan, dan sifat rintangan yang tinggi terhadap kakisan antara butiran [4].

Oleh yang demikian, berdasarkan keputusan ujian yang diperolehi menunjukkan bahawa Mg dan Si mempunyai peranan yang berbeza dalam meningkatkan atau mengurangkan tahap rintangan terhadap pengoksidaan struktur terkimpal. Selain daripada sifat logam terkimpal yang mempunyai kecacatan, morfologi permukaan dan komposisi kimia yang berbeza dengan logam asas, pengkayaan oksida pada permukaan substrat sampel juga memainkan peranan penting. Perbezaan menunjukkan faktor pengkayaan oksida kaya-Mg lebih tertumpu pada antaramuka aloi-oksida berbanding oksida kaya-Si. Ini menunjukkan STK 6061 ER 5356 yang mengandungi elemen pengalioian Mg dioksidakan pada suhu  $600^\circ\text{C}$  menunjukkan tahap pengoksidaan yang lebih tinggi berbanding STK 6061 ER 4043. Justeru itu, kandungan elemen pengalioian sekunder Si berpotensi untuk meningkatkan tahap rintangan bahan dan seterusnya dapat memperlahankan proses pengoksidaan berbanding elemen pengalioian Mg yang lebih menjurus kepada penurunan tahap rintangan logam terkimpal.

#### 4. Kesimpulan

Bahagian logam terkimpal daripada sampel struktur terkimpal STK 6061 ER 4043 dan STK 6061 ER 5356 yang teroksida pada suhu  $600^\circ\text{C}$  selama 40 jam dalam persekitaran udara biasa dikaji dan dibentangkan. STK 6061 ER 5356 menunjukkan tahap pengoksidaan yang tinggi berbanding STK 6061 ER 4043. Fasa oksida  $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$  dan  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  didapati terbentuk pada permukaan kedua-dua sampel tersebut. Manakala STK 6061 ER 5356 menunjukkan perbezaan dengan kehadiran fasa MgO selari dengan keputusan EDX dan XRD. Faktor pengkayaan oksida kaya-Mg pada STK 6061 ER 5356 yang mengandungi elemen pengalioian Mg kesan penambahan logam pengisi semasa proses kimpalan dijalankan menunjukkan tahap degradasi yang lebih tinggi berbanding STK 6061 ER 4043. Oleh yang demikian, kajian ini mencadangkan penambahan logam pengisi yang mengandungi Si berpotensi untuk meningkatkan tahap rintangan terhadap pengoksidaan pada struktur terkimpal terutamanya dalam aplikasi suhu tinggi dan seterusnya dapat memperlahankan proses tindakbalas pengoksidaan. Manakala, penggunaan logam pengisi yang mengandungi Mg lebih menjurus kepada penurunan tahap rintangan terhadap pengoksidaan pada zon logam terkimpal.

## Rujukan

- [1] Aziz, Michael J. "Interface attachment kinetics in alloy solidification." *Metallurgical and Materials Transactions A* 27, no. 3 (1996): 671-686.  
<https://doi.org/10.1007/BF02648954>
- [2] Bergsmark, E., C. J. Simensen, and P. Kofstad. "The oxidation of molten aluminum." *Materials Science and Engineering: A* 120 (1989): 91-95.
- [3] 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)
- [4] Eckermann, Fabian, Thomas Suter, Peter J. Uggowitzer, Andreas Afseth, and Patrik Schmutz. "The influence of MgSi particle reactivity and dissolution processes on corrosion in Al-Mg-Si alloys." *Electrochimica Acta* 54, no. 2 (2008): 844-855.  
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.05.078>
- [5] Palasantzas, G., D. T. L. Van Agterveld, and J. Th M. De Hosson. "Electron beam induced oxidation of Al-Mg alloy surfaces." *Applied Surface Science* 191, no. 1-4 (2002): 266-272.  
[https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(02\)00217-9](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(02)00217-9)
- [6] Liu, Fei, Zhaodong Zhang, and Liming Liu. "Microstructure evolution of Al/Mg butt joints welded by gas tungsten arc with Zn filler metal." *Materials Characterization* 69 (2012): 84-89.  
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.04.012>
- [7] Nikseresht, Z., F. Karimzadeh, M. A. Golozar, and M. Heidarbeigy. "Effect of heat treatment on microstructure and corrosion behavior of Al6061 alloy weldment." *Materials & Design* (1980-2015) 31, no. 5 (2010): 2643-2648.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.12.001>
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Eckermann, Fabian, Thomas Suter, Peter J. Uggowitzer, Andreas Afseth, and Patrik Schmutz. "Investigation of the exfoliation-like attack mechanism in relation to Al-Mg-Si alloy microstructure." *Corrosion Science* 50, no. 7 (2008): 2085-2093.  
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.04.003>
- [11] 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>
- [12] Venugopalan, H., and Tarasankar DebRoy. "Kinetics of directed oxidation of Al-Mg alloys into Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> preforms." *Materials Science and Engineering: A* 232, no. 1-2 (1997): 39-46.  
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00088-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00088-9)
- [13] Czerwinski, F. "The early stage oxidation and evaporation of Mg-9% Al-1% Zn alloy." *Corrosion Science* 46, no. 2 (2004): 377-386.  
[https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(03\)00151-3](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(03)00151-3)
- [14] Frerichs, M., F. Voigts, and W. Maus-Friedrichs. "Fundamental processes of aluminium corrosion studied under ultra high vacuum conditions." *Applied Surface Science* 253, no. 2 (2006): 950-958.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.01.039>
- [15] Zheng, L., D. Petry, H. Rapp, and T. Wierzbicki. "Characterization of material and fracture of AA6061 butt weld." *Thin-Walled Structures* 47, no. 4 (2009): 431-441.  
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.08.008>
- [16] Panda, E., L. P. H. Jeurgens, and E. J. Mittemeijer. "Growth kinetics and mechanism of the initial oxidation of Al-based Al-Mg alloys." *Corrosion Science* 52, no. 8 (2010): 2556-2564.  
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.03.028>
- [17] 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>

- [18] Hanabe, Murali, Vikram Jayaram, and T. A. Bhaskaran. "Growth of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 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)
- [19] Van Agterveld, D. T. L., G. Palasantzas, and J. Th M. De Hosson. "Magnesium surface segregation and oxidation in Al-Mg alloys studied with local probe scanning Auger-scanning electron microscopy." *Applied Surface Science* 152, no. 3-4 (1999): 250-258.  
[https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(99\)00323-2](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(99)00323-2)
- [20] Wang, Juan, Yajiang Li, Peng Liu, and Haoran Geng. "Microstructure and XRD analysis in the interface zone of Mg/Al diffusion bonding." *Journal of Materials Processing Technology* 205, no. 1-3 (2008): 146-150.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.096>
- [21] Venugopalan, H., K. Tankala, and Tarasankar DebRoy. "Kinetics of directed oxidation of Al-Mg alloys in the initial and final stages of synthesis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al composites." *Materials Science and Engineering: A* 210, no. 1-2 (1996): 64-75.  
[https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)10072-5](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)10072-5)
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Amil, M. A., M. Gaafar, M. D. A. Rahman, and M. R. CheRose. "Optimization of Surface Roughness on 6061-T6 Aluminium Alloy in CNC Milling Machine Using Response Surface Methodology." *Journal of Advanced Research in Materials Science* 46, no. 1 (2018): 1-9.
- [28] Angst, Ueli M. "Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete." *Materials and Structures* 51, no. 4 (2018): 1-20.  
<https://doi.org/10.1617/s11527-017-1131-6>
- [29] 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>
- [30] Olson, D. L., A. N. Lasseigne, M. Marya, and B. Mishra. "Weld features that differentiate weld and plate corrosion." *Practical Failure Analysis* 3, no. 5 (2003): 43-57.  
<https://doi.org/10.1007/BF02717486>
- [31] 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.
- [32] Ebell, Gino, Andreas Burkert, and Jürgen Mietz. "Detection of reinforcement corrosion in reinforced concrete structures by potential mapping: Theory and practice." *International Journal of Corrosion* 2018 (2018).  
<https://doi.org/10.1155/2018/3027825>
- [33] Kenéz, Attila Zsolt, and Gyula Bagyinszki. "Pressure Welding Processes of Tubular Parts and Pipe Segments." *Műszaki Tudományos Közlemények* 11, no. 1 (2019): 109-112.  
<https://doi.org/10.33894/mtk-2019.11.23>
- [34] 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.
- [35] Lin, Guangyi, Minfang Chen, Yun Zhao, Yesudass Sasikumar, and Di Tie. "The mechanical properties and corrosion resistance of magnesium alloys with different alloying elements for bone repair." *Crystals* 8, no. 271 (2018): 1-17.  
<https://doi.org/10.3390/cryst8070271>
- [36] 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>
- [37] Khalid, Norfadhlina, Puteri Zirwatul Nadila Megat Zamanhuri, and Faisal Ahmad Shaiful Baharin. "A Study Of Weld Defects Of Gas Metal Arc Welding With Different Shielding Gasses." *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences* 12, no. 6 (2017): 2006-2011.
- [38] Vargel, Christian. *Corrosion of aluminium*. Elsevier, 2004.  
<https://doi.org/10.1016/B978-008044495-6/50012-4>
- [39] Taie, Ihsan, Abdullah Al-Shahrani, Nada Qari, Aziz Fihri, Waleed Al-Obaid, and Gasan Alabedi. "High temperature corrosion resistant coatings for gas flare systems." *Ceramics International* 44, no. 5 (2018): 5124-5130.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.114>
- [40] 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.
- [41] Kopp, Olga, Monika Lelonek, and Meinhard Knoll. "Influence of surface morphology on oxide growth in porous alumina." *Electrochimica Acta* 54, no. 26 (2009): 6594-6597.  
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.06.014>
- [42] Shimizu, K., G. M. Brown, K. Kobayashi, P. Skeldon, G. E. Thompson, and G. C. Wood. "The early stages of high temperature oxidation of an Al-0.5 wt% Mg alloy." *Corrosion Science* 40, no. 4-5 (1998): 557-575.  
[https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(97\)00153-4](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(97)00153-4)
- [43] Toda, Hiroyuki, Zul Azri Bin Shamsudin, Kazuyuki Shimizu, Kentaro Uesugi, Akihisa Takeuchi, Yoshio Suzuki, Mitsuru Nakazawa, Yoshimitsu Aoki, and Masakazu Kobayashi. "Cavitation during high-temperature deformation in Al-Mg alloys." *Acta Materialia* 61, no. 7 (2013): 2403-2413.  
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.01.012>
- [44] Rahman, A. B. M. 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>
- [45] Thakur, Ashish, Hagos Gebrelibanos, and Tadesse Gabrey. "Arc Welding Process Selection through a Quality and Costs." *International Journal of Current Engineering and Technology* 9 (2019): 383-394.  
<https://doi.org/10.14741/ijcet/v.9.3.6>
- [46] Vempati, Srinivasareddy, K. Venkata Subbaiah, and K. Brahma Raju. "Effect of Residual Stresses on The Ti-6Al-4V Cruciform Shape Welded Joints by Xrd Technique and Influence of Hardness-An Experiment Approach." *Journal of Engineering Science and Technology* 14, no. 5 (2019): 2928-2946.
- [47] 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.
- [48] Raveh, A., Z. K. Tsameret, and E. Grossman. "Surface characterization of thin layers of aluminium oxide." *Surface and Coatings Technology* 88, no. 1-3 (1997): 103-111.  
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(95\)02757-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(95)02757-2)
- [49] Ren, Shubin, Xinbo He, Xuanhui Qu, Islam S. Humail, and Yan Li. "Effect of Mg and Si in the aluminum on the thermo-mechanical properties of pressureless infiltrated SiCp/Al composites." *Composites Science and Technology* 67, no. 10 (2007): 2103-2113.  
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.11.006>