

ANODISASI PADUAN Al 2024 T3 DENGAN METODE *PULSE CURRENT* DALAM LARUTAN ASAM TARTARAT-SULFAT (TSA)

M. Zaki Mubarak^{a,*}, Fitriani M. Odang^a, Sutarno^b, Soleh Wahyudi^c

^aStaf pengajar dan alumnus Program Studi Teknik Metalurgi, FTTM-ITB, Jl. Ganesa 10 Bandung, 40312

^bMahasiswa Program Doktor, Program Magister dan Doktor Rekayasa Pertambangan, FTTM-ITB
Jl. Ganesa 10 Bandung, 40312

^cPT. Rekayasa Plating, Pondok Rancabelut, 8-9, Cimahi, 40526

E-Mail : *zaki@mining.itb.ac.id

Masuk Tanggal : 28-07-2015, revisi tanggal : 03-12-2015, diterima untuk diterbitkan tanggal 15-12-2015

Intisari

Sebagai alternatif terhadap proses anodisasi konvensional dalam larutan asam sulfat dan asam kromat, telah dikembangkan proses anodisasi dalam larutan asam tartarat-sulfat (TSA) untuk mendapatkan proses yang lebih ramah lingkungan dengan durasi yang lebih singkat dan menghasilkan morfologi lapisan *anodize* serta ketahanan korosi yang lebih baik pada paduan aluminium. Pada tulisan ini dipresentasikan hasil-hasil percobaan anodisasi paduan Al 2024 T3 dalam larutan asam tartarat-sulfat dengan metode *pulse current* dan didiskusikan pengaruh temperatur, tegangan, dan lama waktu anodisasi terhadap berat dan ketebalan lapisan *anodize* serta ketahanan korosi lapisan *anodize*. Hasil analisis variansi (ANOVA) 3 faktor menunjukkan urutan faktor yang paling berpengaruh terhadap tebal dan berat lapisan *anodize* setelah *sealing* secara berurutan adalah temperatur, tegangan sel, dan lama waktu anodisasi. Ketebalan lapisan *anodize* sebanding dengan rapat arus dan waktu anodisasi yang dipengaruhi oleh temperatur dan tegangan. Berdasarkan hasil *response surface* dan *contour plot* pengaruh temperatur dan tegangan terhadap rapat arus, ketebalan dan berat lapisan *anodize* serta jumlah pit yang terbentuk setelah uji sembur garam selama 336 jam, kondisi proses anodisasi Al 2024 T3 dengan metode *pulse current* yang disarankan adalah pada selang temperatur 23-30 °C dengan tegangan sel 7,3 - 10 V dan waktu proses selama 30 menit.

Kata Kunci: Al 2024 T3, Anodisasi, Pulse current, Asam tartarat-sulfat, ANOVA

Abstract

As an alternative to conventional anodization process in sulfuric acid and chromic acid, anodization method in a solution of tartaric-sulfuric acid (TSA) has been developed to obtain more environmentally-friendly process with shorter duration and producing a better morphology of the anodize layer for improving corrosion resistance of aluminium alloy. In the present paper, results of anodization tests of Al 2024 T3 aluminium alloy in tartaric-sulphuric acid solution using pulse current method is presented and the effects of temperature, voltage and duration of anodization process on the weight and thickness of anodize layer as well as its corrosion resistance is discussed. The results of 3 factors analysis of variance (ANOVA) reveals that the sequence of the most influencing factors that affects the weight and thickness of anodize layer after sealing is temperature, cell voltage and duration of anodization. The thickness of anodize layer is proportional to the current density and duration of anodization which are influenced by temperature and anodization voltage. Based on the result of response surface and contour plot of the influences of temperature and voltage on current density, weight and thickness of anodize layer as well as the number of pit formed after 336 hour salt spray test, conditions suggested for Al 2024 T3 anodizing in TSA solution with pulse rectifier is at temperature range of 23-30 °C under cell voltage of 7.3 to 10 V for 30 minutes.

Keywords: Al 2024 T3, Anodization, Pulse current, Tartaric-sulphuric acid, ANOVA

1. PENDAHULUAN

Sekitar 70% dari badan pesawat tersusun dari paduan aluminium karena kelebihan dibandingkan paduan logam lainnya. Beberapa

kelebihan paduan aluminium sebagai penyusun struktur pesawat terbang adalah memiliki kekuatan tinggi, densitas rendah, ketahanan korosi yang baik, dan memiliki kekuatan spesifik yang tinggi^[1,2]. Paduan aluminium

banyak digunakan pada aplikasi kedirgantaraan terutama paduan seri 2XXX dan seri 7XXX. Salah satu jenis paduan seri 2XXX yang banyak digunakan dalam industri kedirgantaraan adalah Al 2024-T3.

Paduan aluminium seri 2XXX mempunyai kelemahan yaitu ketahanannya terhadap korosi setempat yang lebih rendah dibanding dengan paduan aluminium seri lainnya^[3]. Oleh karena itu, perlu dilakukan upaya-upaya peningkatan ketahanan korosi paduan seri 2XXX ini, dimana metode proteksi korosi yang banyak digunakan dalam industri pesawat terbang adalah anodisasi. Anodisasi merupakan proses pelapisan permukaan secara elektrokimia dimana benda kerja dijadikan sebagai anoda yang akan dilapisi dengan oksidanya.

Chromic acid anodizing (CAA) adalah metode yang sudah terbukti efektif menghasilkan lapisan *anodize* dengan ketahanan korosi paling baik dibandingkan proses anodisasi dengan larutan elektrolit lainnya^[4,5]. Sifat ketahanan korosi yang baik ini disebabkan oleh kemampuan spesi ion kromat sebagai inhibitor korosi pada daerah anodik dan/atau katodik dalam paduan. Namun demikian, spesi ion Cr (VI) dalam elektrolit proses CAA bersifat beracun (*toxic*) sehingga saat ini penggunaan asam kromat pada industri pelapisan logam sangat dibatasi. Penggunaan asam tartarat ($C_4H_6O_6$), *tartaric-sulphuric acid* (TSA) sebagai aditif organik pada asam sulfat (H_2SO_4) untuk proses anodisasi aluminium dan paduannya merupakan salah satu alternatif proses anodisasi untuk menggantikan larutan kromat yang dewasa ini banyak diteliti. Proses anodisasi dalam larutan asam tartarat-asam sulfat (*tartaric-sulphuric acid*), yang disingkat TSAA ini selain lebih ramah lingkungan juga dilaporkan menawarkan kualitas lapisan yang lebih baik serta mempunyai konsumsi energi yang lebih rendah dibandingkan proses SAA dan CAA^[6]. Konsumsi energi TSAA lebih rendah dibanding CAA karena dapat dilakukan pada temperatur ruangan atau lebih rendah dibanding temperatur proses CAA yang mencapai 40 °C.

Pada umumnya proses anodisasi dilakukan menggunakan arus DC konstan. Seiring dengan pertumbuhan lapisan *anodize* terjadi pula peningkatan tegangan akibat peningkatan tahanan lapisan *anodize*. Kondisi ini mendorong peningkatan rapat arus proses dimana produktivitas pembentukan atau laju pertumbuhan lapisan *anodize* berbanding lurus terhadap peningkatan rapat arus tersebut. Peningkatan rapat arus dengan naiknya tegangan

ini juga diikuti oleh terjadinya peningkatan temperatur pada permukaan anoda akibat terbentuknya *joule heats* dimana nilai *joule heats* per satuan luas ini berbanding lurus dengan tahanan lapisan *anodize* (R), kuadrat rapat arus (i^2), dan waktu (t) sesuai dengan persamaan^[7],

$$Q=i^2R.t \quad (1)$$

Dengan adanya ketidakseragaman kontur permukaan, peningkatan *joule heats* akan meningkatkan temperatur lokal di beberapa tempat pada permukaan anoda sehingga dapat mendorong terjadinya pelarutan lapisan *anodize* secara berlebih dan *local burning* pada beberapa permukaan anoda. Pelarutan lapisan *anodize* akibat tingginya konsentrasi medan elektrik dikenal dengan fenomena *field assisted dissolution*. *Field assisted dissolution* kemudian dapat mendorong terjadinya *burning effect* pada lapisan *anodize*, yaitu fenomena dimana lapisan *anodize* tumbuh secara tidak merata dengan retak-retak permukaan akibat *overheating* pada daerah-daerah tertentu karena distribusi rapat arus yang tidak merata^[8].

Berbagai penelitian telah dilakukan agar proses anodisasi dapat dilakukan pada kondisi rapat arus yang tinggi tanpa mengakibatkan terjadinya pelarutan berlebih dan *burning effect* pada lapisan *anodize*. Penelitian tersebut dilakukan dengan mengkombinasikan antara proses anodisasi pada rapat arus rendah, *mild anodization* (MA), dengan proses anodisasi pada rapat arus tinggi, *hard anodization* (HA). Kombinasi ini dapat diperoleh salah satunya dengan melakukan proses anodisasi menggunakan metode *pulse current*^[8].

Secara umum pembentukan lapisan *anodize* yang terjadi pada proses *pulse current anodizing* mengikuti mekanisme yang sama seperti proses *constant current anodizing*, yang membedakan adalah adanya periode dimana tidak terjadi pertumbuhan butiran saat arus mati. Pertumbuhan butiran yang tidak terjadi saat periode *off* ini dapat menghasilkan lapisan yang lebih halus dengan ukuran butiran yang lebih kecil. Metode *pulse current anodizing* dilaporkan juga dapat mereduksi waktu proses dan konsumsi energi hingga 50% dan 30% secara berurutan untuk menghasilkan ketebalan lapisan *anodize* yang sama dengan proses anodisasi konvensional^[8]. Proses anodisasi dalam larutan asam tartarat-asam sulfat dengan metode *pulse current* menarik untuk diteliti sebagai alternatif proses anodisasi yang lebih ramah dibandingkan proses CAA.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

Percobaan diawali dengan preparasi permukaan benda kerja menggunakan kertas abrasif dari 1000 grid hingga 2000 grid, pencucian dengan alkohol dalam *ultrasonic cleaner* selama 2 menit, *alkaline cleaning* dalam larutan Turco 4215 NCLT (*Non-chromated-Low Temperature*) pada suhu 50 °C selama 7,5 menit, diikuti proses *deoxidizing* dengan Turco SMUT-Go#4 selama 5 menit. Campuran larutan asam tartarat-asam sulfat masing-masing dengan konsentrasi 80 g/L C₄H₆O₆ dan 40g/L H₂SO₄ digunakan sebagai elektrolit. Paduan Al 2024 T3 *bare* berukuran 100 x 30 x 1,2 mm³ yang diperoleh dari PT. Dirgantara Indonesia (PT DI) digunakan sebagai benda kerja (anoda) sementara pelat timbal (Pb) digunakan sebagai katoda. Benda kerja yang digunakan adalah paduan aluminium seri 2024 T3 *bare* yang biasa digunakan pada struktur badan pesawat terbang. Berdasarkan UNS A92024^[9], komposisi paduan ditunjukkan dalam Tabel 1. Energi listrik diberikan melalui sebuah *DC pulse rectifier*. Tegangan sel (tegangan antara anoda-katoda) diatur melalui *DC pulse rectifier* ini dengan kenaikan tegangan sebesar 2V per menit hingga diperoleh tegangan konstan sebesar 5, 7,5 dan 10 V masing-masing pada suhu 20, 25 dan 30 °C selama 10, 20 dan 30 menit. Setelah proses anodisasi selesai, dilakukan *sealing* dalam larutan kromat encer pada suhu 95 °C selama 1,5 menit.

Ketebalan lapisan *anodize* diukur menggunakan *elcometer* pada 3 titik pengukuran yang berbeda. Berat lapisan *anodize* diukur dengan prosedur mengikuti ASTM B137-*acid dissolution* yaitu dengan melarutkan lapisan *anodize* dalam larutan yang mengandung 20 g/L asam kromat dan 35 g/L asam fosfat pada suhu 100°C selama 10 menit. Uji sembur garam (*salt spray test*) dilakukan mengacu pada ASTM B117 dengan menempatkan benda kerja pada kemiringan 15° dalam ruang tertutup dengan atmosfer uap larutan NaCl 5% pada suhu 35 °C selama 336 jam. Pengukuran polarisasi anodik dilakukan mengacu pada ASTM G5 dalam larutan NaCl 3,56 %berat dengan menggunakan potensiostat dari Gamry. Analisis dengan SEM dan EDX dilakukan untuk mengevaluasi morfologi lapisan *anodize* dan kandungan unsurnya.

Analysis of variance (ANOVA) 3 faktor digunakan untuk mengetahui urutan variabel-variabel percobaan anodisasi (suhu, tegangan dan lama waktu anodisasi) yang paling berpengaruh terhadap rapat arus, ketebalan dan

berat lapisan *anodize* serta jumlah pitting yang terbentuk setelah uji sembur garam.

Tabel 1. Komposisi paduan Al 2024 berdasarkan UNS A92024^[9]

Unsur	%Berat
Al	91,6
Cu	4,35
Mg	1,5
Mn	0,64
Si	0,5
Fe	0,5
Zn	0,25
Ti	0,15
Cr	0,25

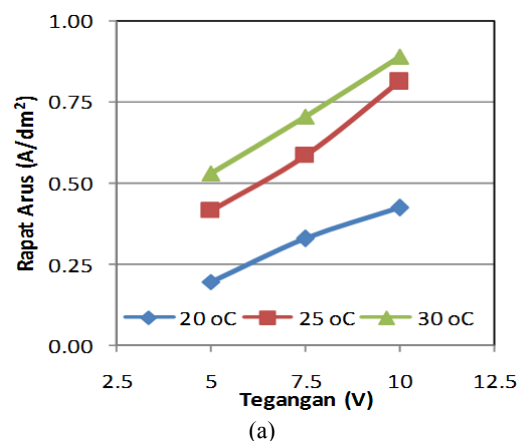
3. HASIL DAN DISKUSI

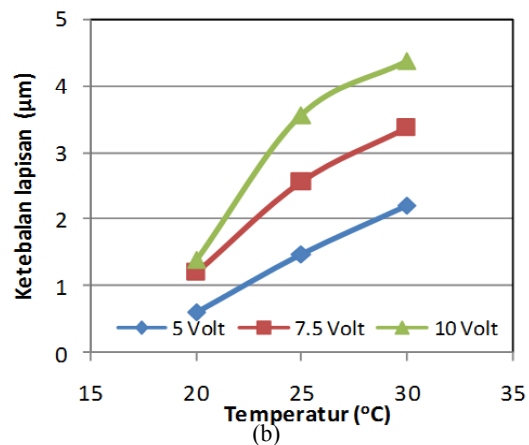
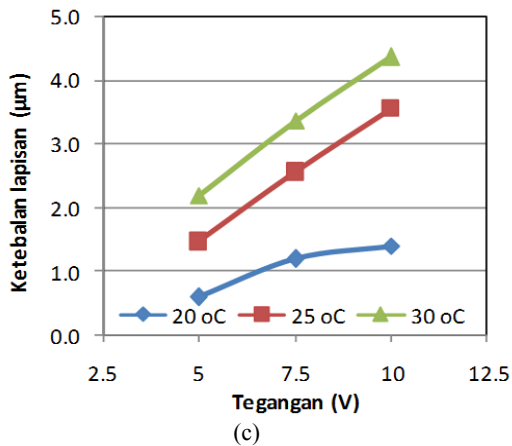
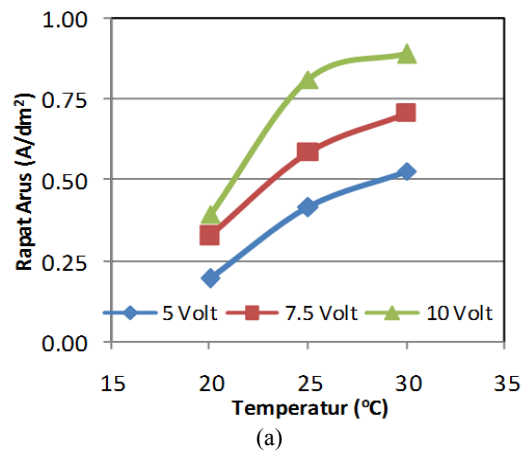
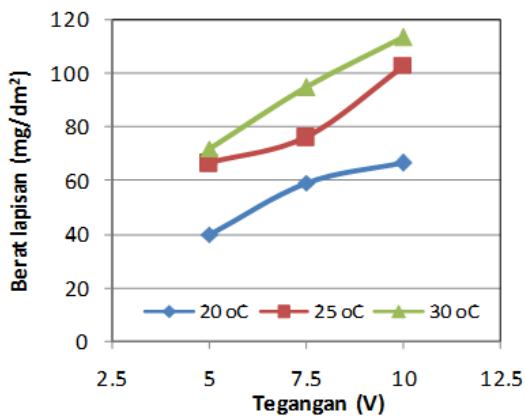
A. Perilaku Rapat Arus, Tebal, dan Berat Lapisan *Anodize* sebagai Fungsi Tegangan Anodisasi, Temperatur dan Waktu Anodisasi

Hubungan antara rapat arus, berat lapisan *anodize* dan ketebalan lapisan *anodize* (setelah *sealing*) terhadap tegangan sel proses anodisasi ditunjukkan pada Gambar 1a-1c. Rapat arus yang terukur, ketebalan dan berat lapisan *anodize* semakin meningkat dengan naiknya tegangan anodisasi. Menurut Qin^[10], 2007, hubungan antara rapat arus sirkuit (I_s) dan tegangan (V) adalah eksponensial seperti ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$I_s = A \exp(B(V/l)) \quad (2)$$

dimana besarnya rapat arus dipengaruhi oleh besar tegangan secara eksponensial, B merupakan koefisien yang bergantung pada temperatur ($B \approx -1/T$) dan l merupakan ketebalan dari lapisan oksida *barrier*. Berdasarkan persamaan tersebut dapat dijelaskan bahwa semakin tinggi tegangan maka semakin tinggi pula rapat arus yang dihasilkan.

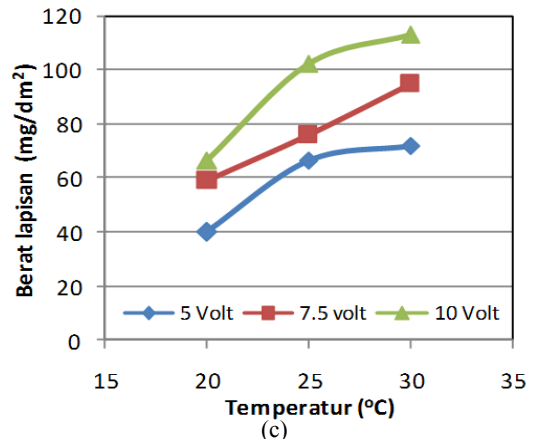




Gambar 1. Perilaku (a) rapat arus rata-rata, (b) tebal lapisan *anodize*, dan (c) berat lapisan *anodize* sebagai fungsi tegangan anodisasi

Semakin tinggi rapat arus yang dihasilkan pada tegangan tertentu, semakin cepat laju pembentukan dan pertumbuhan lapisan *anodize* sehingga dihasilkan lapisan *anodize* yang lebih tebal, dimana ketebalan lapisan *anodize* juga berbanding lurus terhadap beratnya. Perilaku arus, berat dan ketebalan lapisan *anodize* sebagai fungsi tegangan sel tersebut ditunjukkan oleh hasil-hasil pengukuran yang disajikan pada Gambar 1a-1c. Rapat arus, berat dan ketebalan lapisan *anodize* tertinggi didapatkan pada tegangan proses anodisasi paling tinggi yaitu 10 V.

Grafik hubungan antara rapat arus, tebal lapisan *anodize* setelah *sealing*, dan berat lapisan *anodize* sebagai fungsi temperatur anodisasi ditunjukkan pada Gambar 2. Hasil percobaan menunjukkan bahwa peningkatan temperatur meningkatkan rapat arus pada tegangan tertentu. Peningkatan rapat arus meningkatkan ketebalan dan berat lapisan *anodize*. Pada Persamaan (2), pengaruh temperatur direpresentasikan oleh harga koefisien B. Selain meningkatkan laju pertumbuhan lapisan *anodize*, peningkatan rapat arus pada temperatur yang lebih tinggi juga meningkatkan laju pelarutan lapisan *anodize*.



Gambar 2. Perilaku (a) rapat arus rata-rata, (b) tebal lapisan *anodize*, dan (c) berat lapisan *anodize* sebagai fungsi temperatur anodisasi

Hubungan antara rapat arus, ketebalan lapisan *anodize* setelah *sealing* dan berat lapisan *anodize* terhadap waktu anodisasi ditunjukkan pada Gambar 3. Terlihat bahwa peningkatan waktu meningkatkan ketebalan dan berat lapisan *anodize*, sementara peningkatan pada rapat arus rata-rata akibat peningkatan waktu 10, 20, dan 30 menit tidak terlalu signifikan. Kecenderungan serupa dapat dilihat pada harga rapat arus yang cenderung konstan dengan peningkatan waktu anodisasi pada saat tegangan sudah konstan. Namun demikian, peningkatan waktu anodisasi tetap meningkatkan ketebalan lapisan *anodize* yang sebanding dengan besar

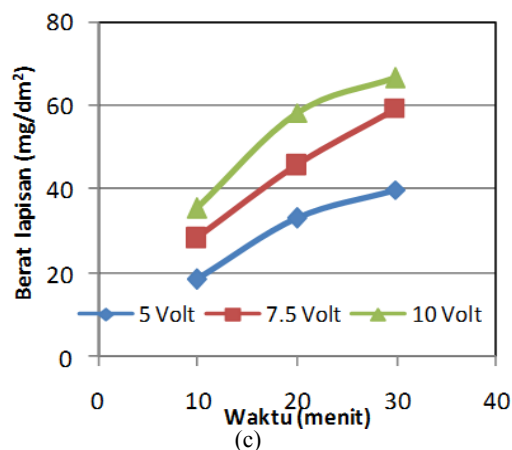
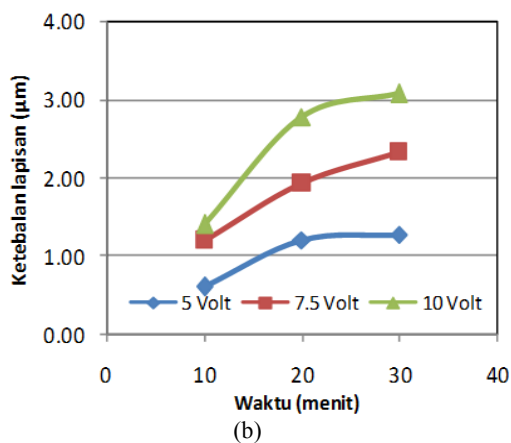
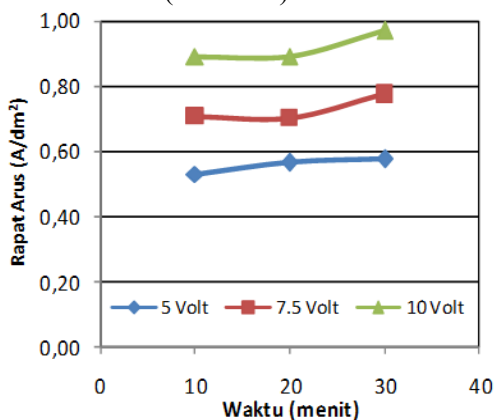
muatan listrik seperti ditunjukkan oleh persamaan berikut :

$$d_{pf} = k \times i_a \times t_a \quad (3)$$

dimana d_{pf} adalah ketebalan lapisan *anodize* yang *porous*, k adalah konstanta yang merupakan perbandingan antara berat molekul Al_2O_3 dengan jumlah elektron yang terlibat reaksi elektrokimia pembentukan lapisan *anodize* dan konstanta Farady, i_a rapat arus anodisasi, dan t_a waktu proses anodisasi.

B. ANOVA 3 Faktor untuk Menganalisa Pengaruh Tegangan, Temperatur dan Waktu Anodisasi terhadap Rapat Arus, Ketebalan dan Berat Lapisan *Anodize*

Secara umum, nilai rapat arus rata-rata, ketebalan dan berat lapisan *anodize* meningkat terhadap peningkatan temperatur (A), tegangan (B), dan lama waktu anodisasi (C). Dari data-data yang disajikan pada Tabel 1-3, terlihat bahwa terdapat perubahan yang kecil terhadap data nilai rapat arus rata-rata, ketebalan dan berat lapisan *anodize* untuk beberapa percobaan, sehingga untuk melihat pengaruh variabel-variabel percobaan secara kuantitatif dilakukan analisis variansi (ANOVA) 3 faktor.



Gambar 3. Perilaku (a) rapat arus rata-rata, (b) tebal lapisan *anodize*, dan (c) berat lapisan *anodize* sebagai fungsi waktu anodisasi

Hasil perhitungan ANOVA 3 faktor untuk data nilai rapat arus rata-rata, ketebalan dan berat lapisan *anodize* digunakan untuk menentukan urutan faktor yang paling berpengaruh terhadap kualitas lapisan *anodize* dan rumusan model matematikanya. Parameter H_0 dinyatakan diterima jika nilai $F_0 < F(\alpha, v_1, v_2)$ yang menunjukkan tidak ada pengaruh signifikan suatu variabel terhadap hasil percobaan. Parameter H_0 dinyatakan ditolak jika nilai $F_0 > F(\alpha, v_1, v_2)$ yang menunjukkan terdapat pengaruh signifikan suatu variabel terhadap hasil percobaan. Urutan variabel yang paling berpengaruh terhadap hasil percobaan ditentukan berdasarkan selisih antara F_0 dengan $F(\alpha, v_1, v_2)$ yang paling besar.

Perhitungan ANOVA dengan Software Minitab (lisensi Institut Teknologi Bandung) menunjukkan bahwa urutan variabel yang paling berpengaruh terhadap nilai rapat arus rata-rata percobaan adalah temperatur (A), tegangan (B), interaksi temperatur-tegangan (AB), interaksi temperatur-waktu (AC), dan waktu (C). Interaksi tegangan-waktu (BC) dan interaksi ketiga faktor temperatur-tegangan-waktu (ABC) tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai rapat arus rata-rata yang dapat dilihat dari diterimanya $H_{0,BC}$ dan $H_{0,ABC}$. Hasil perhitungan ANOVA 3 faktor terhadap data ketebalan lapisan *anodize* menunjukkan urutan variabel yang paling berpengaruh adalah temperatur (A), tegangan (B), waktu (C), interaksi temperatur-tegangan (AB), interaksi temperatur-waktu (AC), interaksi tegangan-waktu (BC), dan interaksi temperatur-tegangan-waktu (ABC). Hasil perhitungan ANOVA 3 faktor terhadap data berat lapisan *anodize* setelah *sealing* menunjukkan urutan variabel yang paling berpengaruh adalah temperatur (A), tegangan (B), waktu (C), interaksi temperatur-tegangan

(AB), interaksi temperatur-waktu (AC), interaksi temperatur-tegangan-waktu (ABC), dan interaksi tegangan-waktu (BC).

Model matematis hubungan variabel-variabel yang berpengaruh pada proses anodisasi paduan aluminium Al 2024-T3 dengan metode *pulse current* dalam larutan asam tartarat-sulfat dibuat dalam bentuk persamaan regresi linear dari hasil ANOVA 3 faktor. Model regresi linear dari faktor yang berpengaruh signifikan terhadap rapat arus adalah sebagai berikut:

$$y = 0,55377 + 0,19856x_1 + 0,16282x_2 + 0,01128x_3 + 0,0430x_1x_2 + 0,0108x_1x_3$$

dimana x_1 , x_2 , dan x_3 berturut-turut adalah temperatur, tegangan dan waktu. Sementara, model regresi linier dari faktor yang berpengaruh signifikan terhadap ketebalan lapisan *anodize* adalah sebagai berikut:

$$y = 3,0846 + 1,2472x_1 + 0,9954x_2 + 0,7611x_3 + 0,2403x_1x_2 + 0,1403x_1x_3 + 0,1292x_2x_3 - 0,1229x_1x_2x_3$$

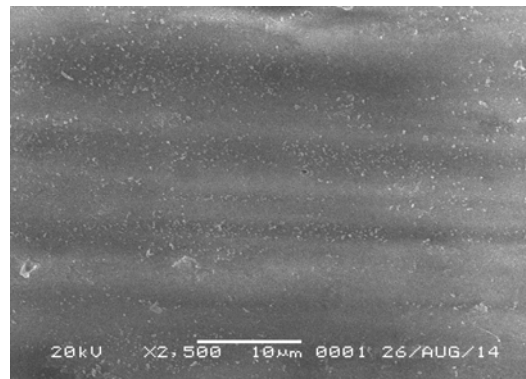
Dengan metode yang sama, didapatkan model regresi linear dari faktor yang berpengaruh signifikan terhadap berat lapisan *anodize* setelah *sealing* sebagai berikut:

$$y = 87,57 + 34,60x_1 + 28,58x_2 + 21,02x_3 + 6,42x_1x_2 + 3,32x_1x_3 + 3,16x_2x_3 - 4,52x_1x_2x_3$$

C. Kualitas Permukaan Lapisan Anodize

Foto SEM pada Gambar 4 memperlihatkan tipikal kenampakan mikro permukaan lapisan *anodize* hasil proses anodisasi *pulse current* dalam larutan asam tartarat-sulfat pada tegangan 10 V dan temperatur 30 °C selama 30 menit. Hasil analisis SEM ini menunjukkan bahwa permukaan lapisan *anodize* yang terbentuk relatif homogen dan tidak terdapat cacat berupa retakan. Kualitas permukaan lapisan *anodize* ini cukup baik, karena dengan metode *pulse current* ini tidak terjadi *local burning* sebagai salah satu akibat dari terbentuknya *joule heating*. Penggunaan *pulse rectifier* dapat mendisipasi pembentukan *joule heat* tersebut selama periode *recovery (off time)* sehingga morfologi permukaan lapisan *anodize* yang dihasilkan lebih homogen tanpa adanya cacat permukaan berupa retakan. Pada metode konvensional, terjadinya konsentrasi rapat arus yang terlalu tinggi pada lokasi-lokasi tertentu dapat mendorong laju pembentukan dan pertumbuhan lapisan *anodize* yang masif pada lokasi tersebut sehingga permukaan lapisan *anodize* pada

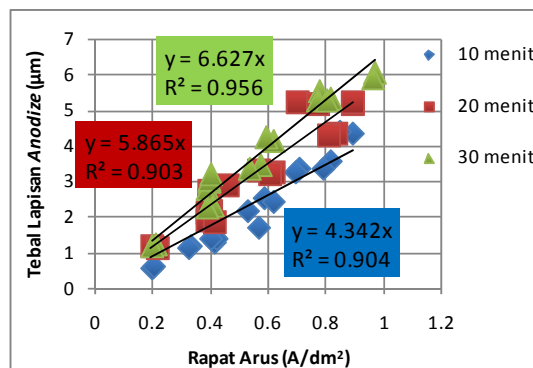
antarmuka oksida-elektrolit tak mampu menahan tegangan mekanik dari gaya ekspansi yang timbul akibat pertumbuhan lapisan *anodize* pada antarmuka logam-oksida dan hal ini dapat memicu timbulnya retakan-retakan pada permukaan lapisan *anodize*^[11].



Gambar 4. Foto SEM permukaan lapisan *anodize* dari proses dianodisasi pada tegangan 10 V dan temperatur 30 °C selama 30 menit

D. Hubungan Antara Ketebalan Lapisan Anodize Terhadap Ketahanan Korosi Lapisan Anodize

Hubungan antara nilai rapat arus rata-rata dengan ketebalan lapisan *anodize* untuk tiga level faktor yaitu lama waktu anodisasi (10, 20, dan 30 menit) ditunjukkan dalam Gambar 5. Persamaan regresi hubungan antara tebal lapisan *anodize* (y) dengan rapat arus rata-rata (x) dalam selang rapat arus 0,1961 – 0,9690 A/dm² masing-masing adalah $y = 4,342x$ (y dalam μm), $y = 5,865x$ dan $y = 6,627x$ masing-masing untuk lama waktu proses anodisasi 10, 20, dan 30 menit. Hubungan ini sesuai dengan penjelasan sebelumnya bahwa ketebalan lapisan *anodize* berpori (d_{pf}) akan berbanding lurus terhadap rapat arus (i_a) dan lama waktu anodisasi (t_a) mengikuti persamaan $d_{pf} = k \times i_a \times t_a$.



Gambar 5. Grafik hubungan antara rapat arus terhadap ketebalan lapisan *anodize* dan persamaan regresi liniernya

Pengukuran kurva polarisasi dengan potentiostat dilakukan untuk memperoleh data

rapat arus dan potensial korosi benda kerja yang sudah dianodisasi pada 3 temperatur yang berbeda (20, 25 dan 30 °C) selama 30 menit dan dibandingkan dengan benda kerja yang tidak dianodisasi. Data rapat arus dan potensial korosi disajikan pada Tabel 2 (pengukuran dilakukan secara triplo). Hasil pengukuran polarisasi Tafel menunjukkan bahwa laju korosi (yang direpresentasikan oleh rapat arus korosi) benda kerja yang dianodisasi signifikan lebih rendah dibandingkan benda kerja yang tidak dianodisasi. Proses anodisasi pada temperatur 20 °C cenderung menghasilkan lapisan *anodize* yang mempunyai laju korosi lebih tinggi dari lapisan *anodize* yang dihasilkan dari proses anodisasi pada temperatur 25 °C dan 30 °C.

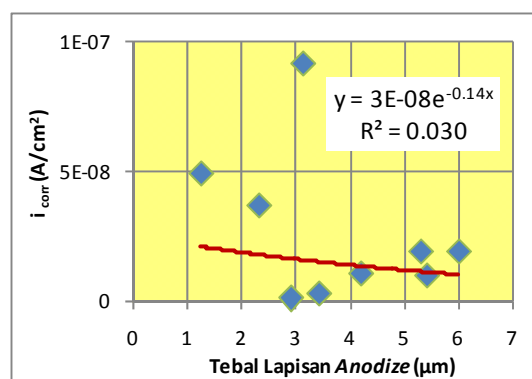
Tabel 2. Data rapat arus dan potensial korosi (mV) hasil pengukuran polarisasi benda kerja yang dianodisasi pada 3 suhu yang berbeda dan yang tidak dianodisasi

Temperatur (°C)	Waktu (menit)	i_{kor} (A/cm ²)	E_{kor} (mV vs SHE)
Tanpa anodisasi		$0,98 \times 10^{-6}$	-632
20	30	$4,94 \times 10^{-8}$	-605
25	30	$0,16 \times 10^{-8}$	-520
30	30	$0,32 \times 10^{-8}$	-572
20	30	$3,69 \times 10^{-7}$	-662
25	30	$1,11 \times 10^{-8}$	-687
30	30	$1,01 \times 10^{-8}$	-602
20	30	$9,2 \times 10^{-8}$	-550
25	30	$1,90 \times 10^{-8}$	-561
30	30	$1,94 \times 10^{-8}$	-586

Data-data pengukuran rapat arus korosi pada Tabel 2, kemudian dikorelasikan terhadap ketebalan lapisan *anodize* seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Pengolahan data yang disajikan pada Gambar 6 menunjukkan tidak ada kecenderungan korelasi yang kuat antara ketebalan lapisan *anodize* terhadap rapat arus dan potensial korosi lapisan *anodize* yang diindikasikan oleh harga R^2 yang kecil ($\ll 1$). Hasil analisis ini menunjukkan bahwa parameter kuantitatif ketahanan korosi, yaitu rapat arus korosi, tidak semata-mata bergantung pada ketebalan lapisan *anodize*. Parameter kuantitatif ketahanan korosi yang direpresentasikan oleh rapat arus korosi juga dipengaruhi oleh kualitas lapisan *anodize* yang terbentuk, seperti porositas, keberadaan cacat permukaan dan kesempurnaan *sealing*^[10].

Selain pengukuran laju korosi dengan metode ekstrapolasi tafel, dilakukan juga pengukuran ketahanan lapisan *anodize* terhadap korosi

sumuran (*pitting corrosion*) dengan uji sembur garam (*salt spray test*) selama 336 jam. Data yang diperoleh adalah jumlah *pit* yang terbentuk pada setiap benda kerja sebagai fungsi tegangan, temperatur dan lama waktu anodisasi. Untuk mengetahui variabel proses anodisasi yang paling berpengaruh terhadap ketahanan korosi lapisan *anodize* (berdasarkan data jumlah *pit* yang terbentuk setelah uji sembur garam selesai) dilakukan juga ANOVA 3 faktor.



Gambar 6. Grafik hubungan antara rapat arus korosi lapisan *anodize* terhadap ketebalan dan berat lapisan *anodize*

Jumlah *pit* yang terbentuk pada setiap benda kerja sebagai fungsi tegangan, temperatur dan lama waktu anodisasi disajikan pada Tabel 3 (pengukuran dilakukan secara duplo). Sebagaimana hasil pengukuran laju korosi dengan potensiostat, hasil uji sembur garam menunjukkan bahwa proses anodisasi pada temperatur 20 °C cenderung memberikan ketahanan korosi yang lebih rendah dibandingkan lapisan *anodize* hasil anodisasi pada temperatur 25 °C dan 30 °C dengan jumlah *pit* lebih banyak. Hasil perhitungan ANOVA 3 faktor terhadap jumlah *pit* yang terbentuk setelah uji sembur garam selama 336 jam pada benda kerja yang dianodisasi pada berbagai variabel, menunjukkan urutan faktor yang paling berpengaruh terhadap jumlah *pit* adalah temperatur (A) > tegangan (B) > interaksi temperatur-tegangan (AB) > waktu (C) > interaksi temperatur-waktu (AC) > interaksi tegangan-waktu (BC) > interaksi temperatur-tegangan-waktu (ABC).

Model regresi linear dari faktor yang berpengaruh signifikan terhadap jumlah *pit* adalah sebagai berikut:

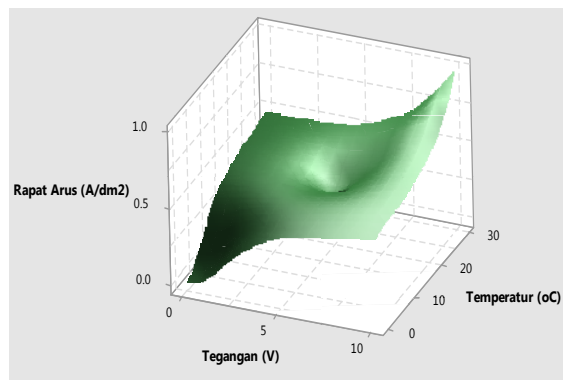
$$y = 0,574 - 0,750x_1 - 0,750x_2 - 0,389x_3 + 1,042x_1x_2 + 0,583x_1x_3 + 0,5x_2x_3 - 0,625x_1x_2x_3$$

dimana x_1 , x_2 , dan x_3 berturut-turut adalah temperatur, tegangan dan waktu.

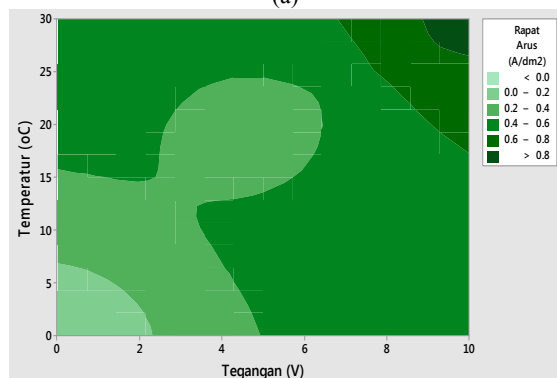
Tabel 3. Jumlah *pit* yang terbentuk pada setiap benda kerja sebagai fungsi tegangan, temperatur dan lama waktu anodisasi

T	Replika	V = 5 V		
		t = 10'	t = 20'	t = 30'
20 °C	1	7	5	2
	2	6	4	1
25 °C	1	-	-	-
	2	2	-	-
30 °C	1	-	-	-
	2	-	-	-
T	Replika	V = 7,5 V		
20 °C	1	1	-	-
	2	-	-	-
25 °C	1	-	-	-
	2	-	-	-
30 °C	1	-	-	-
	2	-	-	-
T	Replika	V = 10 V		
20 °C	1	-	-	-
	2	-	-	1
25 °C	1	-	-	-
	2	-	-	-
	1	-	-	-
	2	-	-	-

Response surface dan *contour plot* pengaruh temperatur dan tegangan terhadap rapat arus, ketebalan dan berat lapisan *anodize* serta jumlah *pit* secara berurutan ditunjukkan pada Gambar 7-10. *Response surface* dan *contour plot* dapat digunakan sebagai prediktor nilai rapat arus, ketebalan dan berat lapisan *anodize* serta jumlah *pit* pada kondisi temperatur dan tegangan tertentu. Sebagai contoh, dari *contour plot* pengaruh temperatur dan tegangan terhadap jumlah *pitting* yang disajikan pada Gambar 10, dapat diketahui bahwa tidak terjadi *pitting* pada benda kerja yang dianodisasi pada temperatur 30 °C, tegangan 10 V dan lama waktu anodisasi 30 menit. Pada kondisi tersebut nilai rapat arus, tebal, dan berat lapisan *anodize* yang terbentuk secara berurutan diprediksi sebesar 0,98 A/dm², 6,48 μm dan 180,15 mg/dm². Berdasarkan pengamatan tersebut maka kondisi proses anodisasi dengan *pulse rectifier* dalam larutan asam tartarat-sulfat (TSA) yang disarankan adalah pada temperatur 30 ± 2 °C dengan tegangan 10 ± 2 V dan waktu proses selama 30 menit.

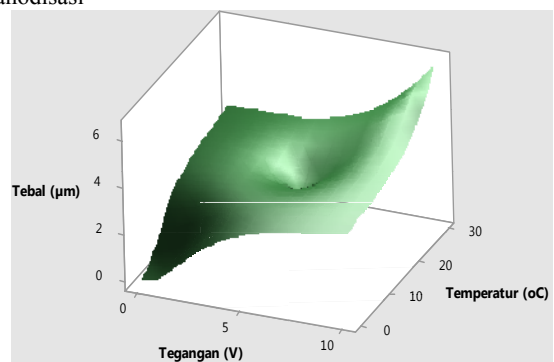


(a)

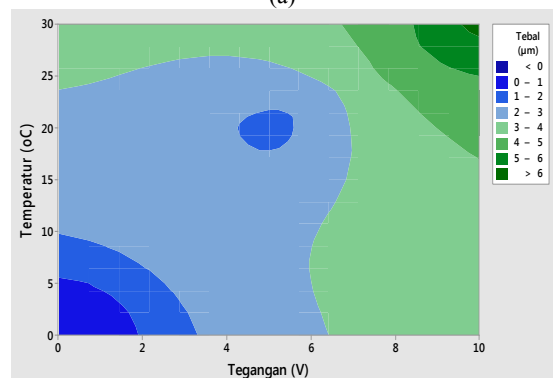


(b)

Gambar 7. (a) *Response surface* dan (b) *contour plot* pengaruh temperatur dan tegangan terhadap rapat arus anodisasi

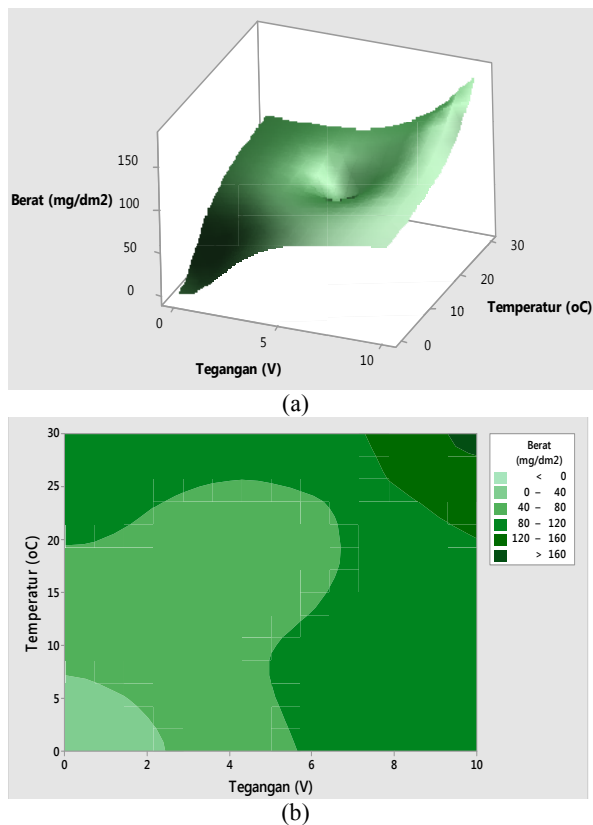


(a)

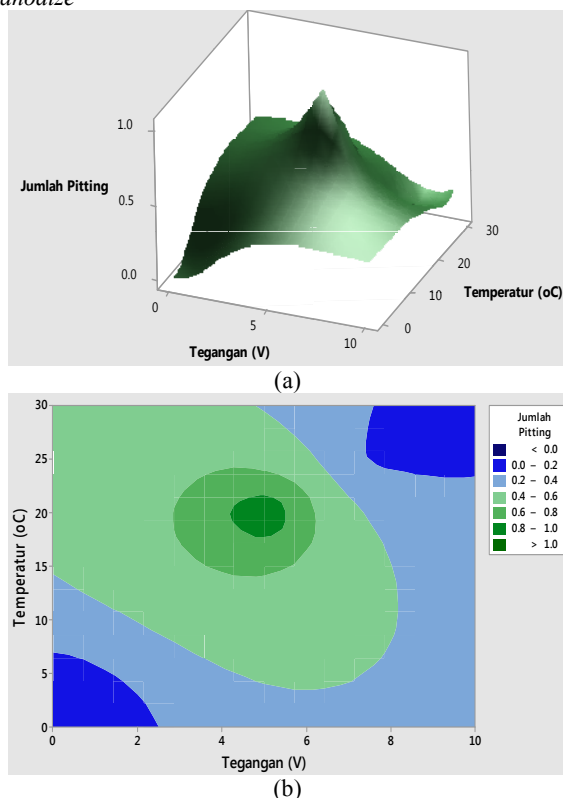


(b)

Gambar 8. (a) *Response surface*, dan (b) *contour plot* pengaruh temperatur dan tegangan terhadap ketebalan lapisan *anodize*



Gambar 9. (a) *response surface* dan (b) *contour plot* pengaruh temperatur dan tegangan terhadap berat lapisan *anodize*



Gambar 10. (a) *Response surface*, dan (b) *contour plot* pengaruh temperatur dan tegangan terhadap jumlah *pitting* setelah uji sembur garam selama 336 jam

4. KESIMPULAN

Anodisasi paduan aluminium Al 2024 T3 dalam larutan asam tartarat-sulfat dengan metode *pulse current* menghasilkan kualitas lapisan *anodize* yang baik dengan morfologi permukaan yang halus tanpa adanya retakan mikro dan *local burning*. Ketebalan dan berat lapisan *anodize* sebanding terhadap peningkatan tegangan dan rapat arus. Berdasarkan *hasil analysis of variance* (ANOVA) 3 faktor variabel yang paling berpengaruh terhadap berat dan ketebalan lapisan *anodize* adalah temperatur yang diikuti oleh tegangan sel dan lama waktu proses. Laju korosi benda kerja yang dianodisasi signifikan lebih rendah dibandingkan benda kerja yang tidak dianodisasi. Proses anodisasi pada temperatur 20 °C menghasilkan ketahanan lapisan *anodize* yang lebih baik dari lapisan hasil proses anodisasi pada temperatur 25 °C dan 30 °C. Dari hasil *response surface* dan *contour plot* terhadap faktor-faktor yang paling berpengaruh terhadap proses *pulse current anodizing* dalam larutan TSA, disarankan agar proses dilakukan pada temperatur 23-30 °C dengan tegangan 7,3 -10 volt dan waktu proses selama 30 menit. Pada kondisi tersebut rentang rapat arus dan ketebalan lapisan *anodize* yang terbentuk diprediksi masing-masing 0,48 - 0,98 A/dm² dan 3,25 – 6,48 μm.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PT. Dirgantara Indonesia (PT DI) yang telah memberikan sampel paduan aluminium Al 2024 T3 yang digunakan sebagai benda kerja pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Callister, W.D., Retwisch, D.G, "Material Science and Engineering, 8th Edition," *John Wiley & Sons.*, New York, p. 408-409, 2011.
- [2] Rubio, G. et.al, "Influence of Molybdate Species on the Tartaric Acid/Sulphuric Acid Anodic Films Grown on AA2024 T3 Aerospace Alloy," *Corrosion Science.*, Vol. 51, pp. 2034-2042, 2009.
- [3] Gazapo, L. and Gea, J, "Anodizing of Aluminium," *TALAT Lecture 520.*, 1994.
- [4] Pébère, B.G. et.al, "FESEM and EIS Study of Sealed AA2024 T3 Anodized in Sulfuric Acid Electrolytes: Influence of Tartaric Acid," *Journal of The Electrochemical Society (JES).*, Vol. 155, 2008.
- [5] Augros, M. and Viola, A, "Environmentally Friendly Aluminum Anodizing Processes

- for Aerospace Application: A Comparative Study,” *Messier-Bugatti.*, Molsheim, France, pp. 1-4, 2013.
- [6] Takahashi, H, “Aluminum Anodizing, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, ASM Handbook,” *ASM International.*, Vol 13A, p. 736–740, 2003.
- [7] Mirzaei, M. and Bahrololoom, M.E, “Influence of Pulse Currents on the Nanostructure and Color Absorption Ability of Colored Anodized Aluminum,” *Vacuum.*, Vol. 99, pp. 277-283, 2014.
- [8] Juhl, D.A, “A New Approach to Pulse Anodising - Decreasing Energy Consumption – Increasing Productivity,” *AAC*, Atlanta, 2006.
- [9] Society of Automotive Engineers (SAE), “Metals and Alloys in the Unified Numbering System,” *SAE International and ASTM.*, 2008.
- [10] Qin, Z.N and Xue, J.X, “Effects of Anodizing Condition on Anodic Alumina Structure,” *Springer Science Journal.*, Vol. 42, pp. 3878-3882, 2007.
- [11] Aerts, T., Iris, D.G., Terryn, H, “Study of Initiation and Development of Local Burning Phenomena During Anodizing of Aluminium Under Controlled Convection,” *Electrochimica Acta.*, Vol. 54, pp. 270-279, 2008.