

DOI: doi.org/10.21009/03.1301.FA29

RANCANG BANGUN SISTEM *PULSE GENERATOR* UNTUK PEMBENTUKAN DAN KARAKTERISASI LAPISAN KOMPOSIT Ni-TiN/Si₃N₄ DENGAN METODE ELEKTRODEPOSISI RAPAT ARUS PULSA

Arsyan Fadilah ^{a)}, Esmar Budi ^{b)}, Teguh Budi Prayitno ^{c)}

Program Studi Fisika, FMIPA Universitas Negeri Jakarta, Jl. Rawamangun Muka No. 01, Rawamangun Muka, Jakarta Timur 13220 Indonesia

Email: ^{a)}arsyanfadilah9@gmail.com, ^{b)}esmarbudi@unj.ac.id, ^{c)}teguh-budi@unj.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk membuat sistem *pulse generator* dan menguji hasil rancang bangun dalam proses elektrodeposisi dengan menganalisis komposisi dan morfologi permukaan lapisan komposit Ni-TiN/Si₃N₄ yang terbentuk. Lapisan Ni-TiN/Si₃N₄ digunakan karena dapat meningkatkan kekerasan, menutup difusi ke substrat, dan mencegah oksidasi pada suhu tinggi. Tungsten karbida (WC) dilapisi untuk mengurangi keausan, memperbaiki permukaan, meningkatkan daya rekat, dan kekuatan substrat tanpa mengubah sifat asli. Elektrodeposisi arus pulsa menggunakan rangkaian *Pulse Width Modulation* (PWM) dengan IC 555 sebagai *pulse generator*. Hasil dari rancang bangun sistem *Pulse Generator* ini berupa gelombang pulsa yang dapat diatur lebar pulsanya dengan mengatur nilai *duty cycle* menggunakan potensiometer dan dapat diamati menggunakan osiloskop, dan ketinggian pulsa atau arus keluaran dapat diatur sesuai kebutuhan dan dapat terukur menggunakan multimeter. Proses elektrodeposisi dilakukan selama 30 menit pada suhu 40°C dengan laju pengadukan 600 rpm. Pemindaian morfologi menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) menunjukkan permukaan yang kasar, distribusi sebaran ukuran partikel tidak merata, dan adanya aglomerasi pada lapisan yang terbentuk. Hasil pemindaian *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS) menunjukkan keberhasilan lapisan yang terbentuk dengan adanya kandungan unsur logam Ni, TiN, dan Si₃N₄ dengan ketebalan 2.7191 μm.

Kata-kata Kunci: lapisan komposit Ni-TiN/Si₃N₄, elektrodeposisi, rapat arus pulsa, morfologi permukaan.

Abstract

This research aims to make a pulse generator system and test the design results in the electrodeposition process by analyzing the composition and surface morphology of the Ni-TiN/Si₃N₄ composite layer formed. The Ni-TiN/Si₃N₄ coating is used because it can increase hardness, seal diffusion to the substrate, and prevent oxidation at high temperatures. Tungsten carbide (WC) is coated to reduce wear, improve the surface, increase adhesion, and strength of the substrate without changing the original properties. Pulse current electrodeposition uses Pulse Width Modulation (PWM) circuit with IC 555 as pulse generator. The result of the Pulse Generator system design is a pulse wave that can be adjusted by adjusting the duty cycle value using a potentiometer and can be observed using an oscilloscope, and the pulse height or output current can be adjusted as needed and can be measured using a multimeter. The electrodeposition process was carried out for 30 minutes at 40°C with a stirring rate of 600 rpm. Morphological scanning using a Scanning Electron Microscope (SEM) showed a rough surface, uneven particle size distribution, and agglomeration in the formed layer. Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) scanning results showed the success of the coating formed with the presence of Ni, TiN, and Si₃N₄ metal elements with a thickness of 2.7191 μm.

Translated with DeepL.com (free version)

Key Words: Ni-TiN/ Si₃N₄ composite layer, electrodeposition, pulse current density, surface morphology.

PENDAHULUAN

Dalam bidang industri, pelapisan material sangat penting untuk mengatasi kerusakan komponen dan telah digunakan selama bertahun-tahun untuk meningkatkan kinerja tribologis, memperpanjang masa pakai, daya tahan komponen, dan memungkinkan penggunaan bahan substrat dengan lebih mudah [1]. Logam umumnya digunakan sebagai matriks pada material komposit karena memiliki banyak sifat mekanik yang baik, seperti kekuatan, modulus elastisitas, kekerasan, daya konduksi listrik, panas yang tinggi [2], ketahanan aus, dimensi yang stabil, konduktivitas listrik yang baik, dan kemampuan untuk bertahan pada suhu tinggi [3]. Produk ini dirancang untuk menghasilkan kualitas atau sifat fisik terbaik. Komposit terdiri dari matriks dan penguat (*reinforcement*). Matriks memiliki karakteristik yang ulet dan berperan sebagai pengikat ketika mencapai titik bekunya, sedangkan penguat memiliki kekuatan tarik yang baik dan sifat elastis [1].

Untuk mengatasi kelemahan nikel yang dapat melunak pada suhu tinggi, lapisan nikel harus dilapisi dengan bahan aditif yang mengandung partikel nitrida [4]. Penggunaan bahan aditif berupa oksida, karbida, nitrida dan borida menghasilkan peningkatan sinterabilitas, sifat fisik dan mekanik [5]. Beberapa senyawa nitrida sebagai bahan aditif seperti TiN [6] dan Si₃N₄ [7]. Titanium Nitrida (TiN) berperan sebagai bahan aktif untuk elektroda dalam sel bahan bakar karena titik leleh super tinggi (3000°C), memiliki kekerasan, ketahanan aus, konduktivitas listrik yang tinggi, dan stabilitas kimia yang baik [8]. Silikon Nitrida (Si₃N₄) merupakan partikel keramik keras dengan kekuatan mekanik yang tinggi dan ketahanan aus yang baik [9], kestabilan kimia dan tahan pada temperatur tinggi [10].

Produksi pelapis komposit dengan elektrodeposisi memiliki keunggulan proses sintesis dengan metode yang mudah dan hemat biaya untuk pelapisan paduan [11-13]. Berbagai parameter harus dioptimasi dalam elektrodeposisi untuk mencapai kualitas material yang baik di antaranya adalah kerapatan arus katoda. Kerapatan arus pengendapan mempengaruhi ketebalan logam yang tumbuh dalam proses elektrodeposisi [14-15]. Elektrodeposisi arus pulsa menunjukkan keunggulan yang nyata dibandingkan elektrodeposisi arus searah dalam kontrol ukuran butiran endapan, morfologi permukaan, dan orientasi yang lebih baik. Hal ini disebabkan kepadatan arus yang lebih tinggi pada elektrodeposisi arus pulsa menghasilkan peningkatan laju nukleasi yang mengarah pada pembentukan butir yang lebih halus [16]. Rapat arus pulsa dihasilkan melalui teknik interseksi yang merupakan pendekatan paling sederhana untuk membangkitkan sinyal *pulse width modulation* (PWM), menggunakan gelombang gergaji atau segitiga dan komparator menggunakan IC 555. Dengan pengaturan waktu pada sirkuit elektronik, IC 555 ini digunakan sebagai pusat kontrol dari rangkaian *pulse generator* karena memiliki pengaturan waktu yang presisi sehingga mampu menghasilkan waktu penundaan (osilasi) yang akurat pada suatu rangkaian listrik dengan struktur output hingga 200 mA dan jenis multivibrator ini tidak memiliki keadaan keluaran yang stabil akibat dari pengisian dan pengosongan kapasitor. Dalam metode PWM, tegangan mengeluarkan peralihan pulsa secara cepat (HIGH dan LOW), tidak dalam bentuk tegangan analog yang diberikan secara kontinu [17-20]. Dalam penelitian ini akan dilakukan pembuatan sistem *pulse generator* dan menganalisis hasil sistem *pulse generator* pada proses elektrodeposisi rapat arus pulsa dengan rapat arus 0.4 mA/mm² pada substrat yang dilapisi Ni-TiN/Si₃N₄. Lapisan komposit yang terbentuk akan dianalisis dengan uji SEM-EDS untuk mengetahui struktur morfologi permukaan dan komposisi dari lapisan yang terbentuk.

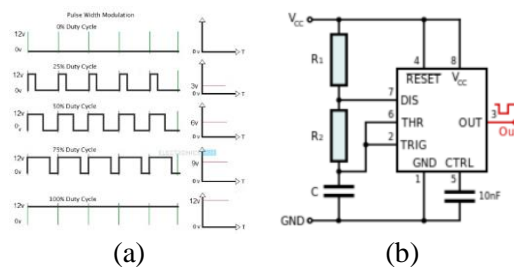
METODOLOGI

Metode penelitian yang digunakan yaitu metode eksperimen. Metode eksperimen dilakukan untuk membentuk lapisan tipis komposit Ni-TiN/Si₃N₄ dan mengidentifikasi hasil dari pelapisan dengan menganalisis pengaruh rapat arus 0,4 mA/mm² yang dilakukan selama proses elektrodeposisi berlangsung terhadap morfologi dan komposisi lapisan komposit yang telah terbentuk pada substrat Tungsten Karbida (WC).

Dalam penelitian ini substrat yang digunakan adalah tungsten karbida. Tungsten karbida akan dibersihkan dengan mengamplas bagian permukaan substrat sampai sisi-sisinya halus, setelah diamplas

dicuci terlebih dahulu untuk menghilangkan kotoran pada substrat menggunakan sabun dan dibilas dengan aquades serta disterilkan menggunakan alkohol 96% dengan *ultrasonic cleaner* selama 10 menit. Komposisi bahan larutan elektrolit yang digunakan yaitu: 0,03 gr Titanium Nitrida (TiN), 0,003 gr Silikon Nitrida (Si₃N₄), 0,2020 gr NiCl₂.6H₂O, 0,4994 gr NiSO₄.6H₂O, 0,1514 gr Asam Borat (H₃BO₄), dan 0,003 gr Sodium Dodecyl Sulfate (SDS). Semua bahan elektrolit ditambahkan aquades sebanyak 5ml kemudian diaduk menggunakan alat *magnetic stirrer* selama 1 jam hingga larutan tercampur secara merata (homogen). Substrat tungsten karbida bertindak sebagai elektroda kerja dan platina sebagai elektroda pembanding.

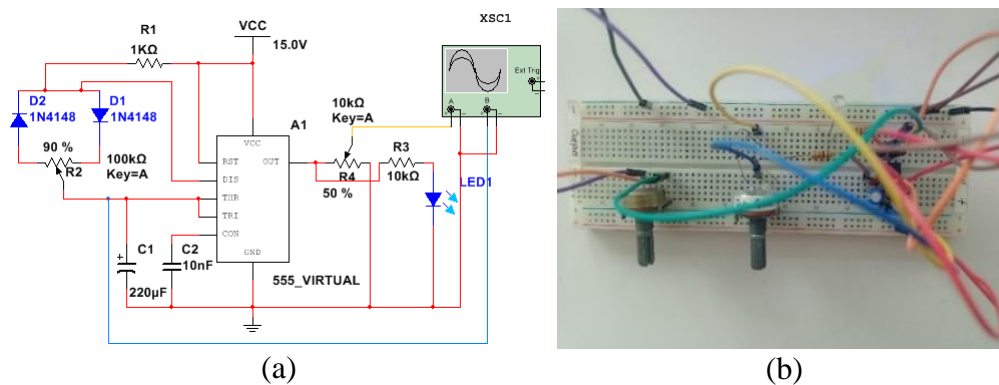
Pulse Width Modulation (PWM) merupakan salah satu cara untuk mendapatkan tegangan yang memiliki kondisi terbuka penuh (ON) atau tertutup penuh (OFF) [17]. Sistem *Pulse Generator* pada dasarnya menggunakan rangkaian multivibrator dengan pengontrol berupa IC 555. IC ini berbentuk *Dual Inline Package* (DIP) dengan 8 pin/kaki terminalnya dengan fungsi masing-masing pada setiap pin yang mempunyai tugas pengaturan waktu pada sirkuit elektronik. Dalam PWM hal yang menjadi utama ialah *Duty cycle*. *Duty Cycle* dan frekuensi pada sinyal PWM menyatakan suatu tegangan keluaran. *Duty cycle* pada sinyal PWM merupakan lama pulsa bernilai HIGH yang berada dalam 1 siklus dan ditentukan sebagai persentase [19].



GAMBAR 1. Dasar Pulse Generator, (a) Sinyal PWM dengan *Duty Cycle* yang berbeda, (b) Rangkaian multivibrator astabil dengan IC 555 (Wijaya dkk, 2022)

Perbandingan sinyal PWM dengan *duty cycle* yang berbeda akibat dari tegangan yang diberikan dapat dilihat pada GAMBAR 1 (a). Tegangan yang diberikan hanya mempengaruhi waktu HIGH dan tidak mengubah nilai frekuensi dan amplitudo [19]. Perlu diketahui *duty cycle* minimum yang dapat dicapai oleh IC 555 adalah 50%. Perhitungan ini didasarkan dari resistor yang terpasang pada rangkaian pembangkit pulsa yang dapat dilihat di Gambar 1 (b), yaitu $R1 \geq R2$.

Untuk memodifikasi nilai *duty cycle* yang kurang dari 50%, maka nilai R1 yang terpasang harus lebih kecil dibanding nilai R2 dan memasang dioda dari Vcc menuju kapasitor. Tanpa adanya pemasangan dioda, *duty cycle* yang dihasilkan tidak akan bisa kurang dari 50% meskipun nilai $R1 < R2$. Hal ini diakibatkan nilai $R1+R2$ akan selalu lebih besar dari nilai R1 itu sendiri.



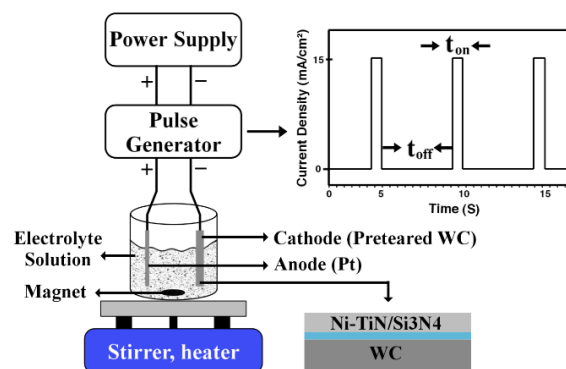
GAMBAR 2. Skema rangkaian *Pulse Weidth Modulation* (PWM) menggunakan IC 555 Timer, (a) Rangkaian Simulasi Multisim dan (b) Rangkaian yang dibuat pada *project board*

Pada GAMBAR 2 menunjukkan pemasangan dioda yang bertujuan mengisi tegangan kapasitor tanpa harus melewati R2. Dengan menggunakan potensiometer sebagai pengganti R2 dan penambahan

dioda untuk melakukan bypass terhadap potensiometer R2. Sistem *Pulse Generator* ini dapat di-supply dengan tegangan 9-15 Volt. Pada rangkaian ini dipasangkan sebuah LED pada output yang berfungsi sebagai lampu indikator bahwa pada output rangkaian ini berupa gelombang pulsa. Terdapat 2 buah potensiometer dimana pada potensiometer kiri bernilai 1K ohm yang berfungsi untuk mengatur nilai arus keluaran. Sedangkan pada potensiometer kanan bernilai 100K ohm yang berfungsi untuk mengatur nilai *duty cycle* dari 0 – 100%.

Untuk mengoperasikan rangkaian ini ialah cukup menghubungkan kabel input ke power supply, lalu atur nilai *duty cycle* menjadi 100% (potensiometer *duty cycle* diputar penuh ke kanan) agar selama penentuan nilai arus tidak ada arus yang terputus sehingga pembacaan pada multimeter menjadi lebih mudah (LED akan tetap menyala). Setelah itu dilanjutkan dengan mengatur nilai arus sesuai keinginan dengan memutar potensiometer arus (kiri) sesuai kebutuhan dengan kabel output dihubungkan ke multimeter pada selektor arus. Jika sudah diperoleh nilai arus yang dibutuhkan, maka pindahkan kabel output ke osiloskop dan atur kembali nilai *duty cycle* sesuai kebutuhan sehingga LED akan berkedip sesuai dengan nilai *duty cycle* yang ditetapkan yang menandakan bahwa outputnya sudah berbentuk gelombang pulsa dan siap digunakan. Jika semua tahapan tersebut sudah dilakukan maka langkah terakhir ialah tinggal melepaskan kabel output dan menghubungkannya ke rangkaian elektrodeposisi.

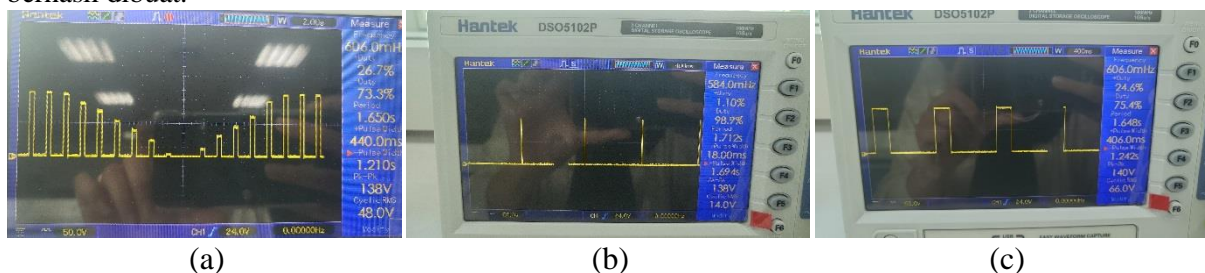
Proses elektrodeposisi lapisan komposit Ni-TiN/Si₃N₄ menggunakan rapat arus pulsa disajikan dalam GAMBAR 3. Selama proses elektrodeposisi, larutan diaduk di atas *magnetic stirrer* menggunakan *magnetic bar* dengan suhu konstan 40°C selama 30 menit dengan rapat arus 0,4 mA/mm², besar *duty cycle* 10%, periode 1,67 S dan frekuensi 598 mHz. Tungsten Karbida yang terlapis oleh lapisan komposit Ni-TiN/Si₃N₄, selanjutnya dilakukan karakterisasi morfologi permukaan lapisan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan menganalisis komposisi lapisan menggunakan *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS).



GAMBAR 3. Ilustrasi Proses Elektrodeposisi Lapisan Komposit Ni-TiN/Si₃N₄

HASIL DAN PEMBAHASAN

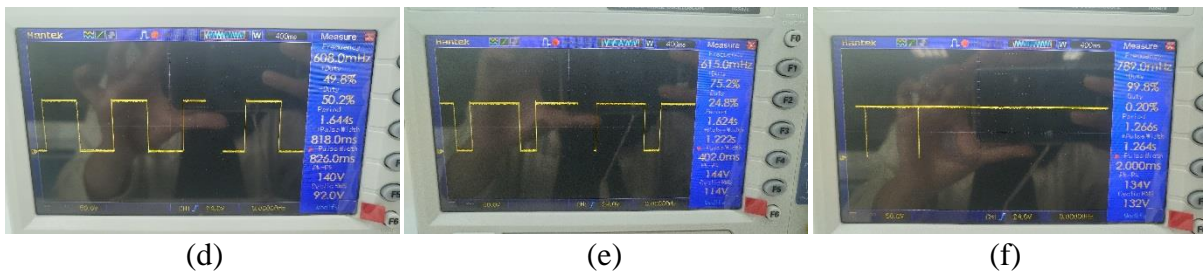
Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan sebelumnya, dengan menggunakan skema rangkaian PWM seperti pada GAMBAR 2, maka berikut hasil dari rancang bangun sistem *Pulse Generator* yang berhasil dibuat.



(a)

(b)

(c)



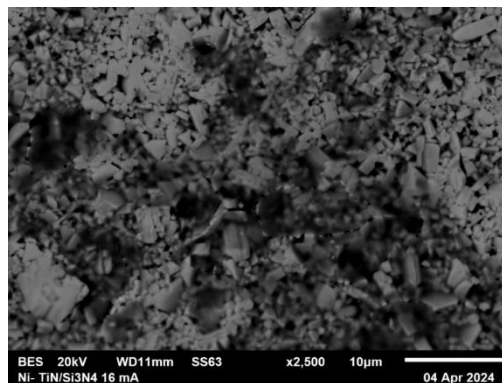
GAMBAR 4. Arus Keluaran atau ketinggian pulsa (a), *duty cycle*; (b) 1%, (c) 25%, (d) 50%, (e) 75%, dan (f) 100%

Dengan simulasi multisim, rangkaian *pulse width modulation* (PWM) menggunakan IC 555 dibentuk dan dianalisis gelombang output melalui osiloskop. GAMBAR 2 menunjukkan rangkaian PWM yang tidak memerlukan input pemicu eksternal. Pin TRI (*trigger*) merupakan input yang terhubung ke pin THR (*threshold*) melalui salah satu ujung kapasitor C1 dan terhubung dengan potensiometer (R2) untuk mengatur besaran *duty cycle* yang dibutuhkan dan potensiometer (R4) untuk mengatur besaran arus keluaran. GAMBAR 4 merupakan output dari pin OUT pada 555 timer. Bentuk gelombang yang dihasilkan pada osiloskop menunjukkan gelombang persegi panjang ketika tegangan melintasi kapasitor. Kapasitor mengisi nilai pada saat pulsa output ON, dan tegangan dilepaskan saat pulsa output OFF [20]. Pada GAMBAR 4 (a) menunjukkan bahwa dengan mengatur R4 maka ketinggian pulsa atau besar arus keluaran dapat disesuaikan dengan kebutuhan, dan pada GAMBAR 4 (b-f) menunjukkan bahwa dengan adanya dioda dan potensiometer R2, nilai *duty cycle* dapat diatur dari 0-100% sesuai dengan kebutuhan.

Dengan menggunakan sistem *pulse generator* tersebut, dilakukan proses elektrodeposisi dan didapatkan selisih massa elektrodeposisi 0,0017 gr dengan luas permukaan substrat Tungsten Karbida 0,4 cm². Ketebalan lapisan komposit dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [21]:

$$\text{Ketebalan } (\mu\text{m}) = \frac{\text{Massa Deposit (gr)} \times 10^4}{\text{Luas (cm}^2) \times \text{Densitas (gr/cm}^3)}$$

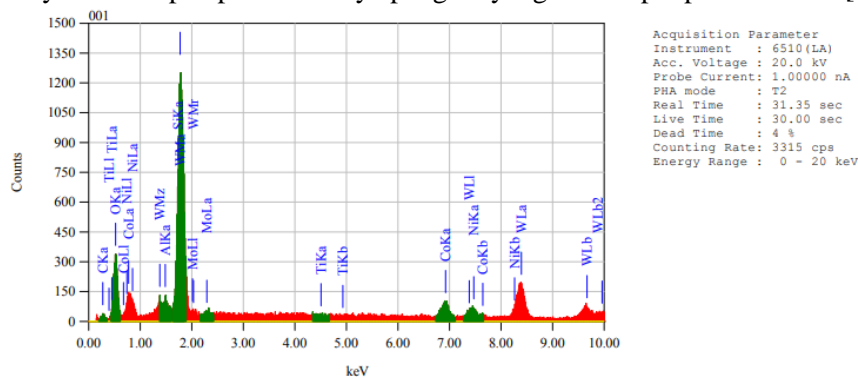
Sehingga dengan menggunakan rumus tersebut, diperoleh ketebalan lapisan pada studi ini sebesar 2.7191 μm .



GAMBAR 5. Morfologi SEM Lapisan Komposit Ni-TiN/Si₃N₄ pada substrat Tungsten Karbida dengan Perbesaran 2500x

GAMBAR 5 menunjukkan morfologi permukaan lapisan komposit Ni-TiN/Si₃N₄ elektrodeposisi dengan temperatur 40°C pada substrat Tungsten Karbida dengan perbesaran 2500x dan skala 10 μm . Hasil pemindaian SEM menunjukkan morfologi permukaan lapisan yang kasar serta banyaknya aglomerasi pada permukaan lapisan [22]. Dibandingkan dengan hasil kajian sebelumnya pada proses elektrodeposisi lapisan komposit Ni-TiN/Si₃N₄ dengan temperatur 40°C pada substrat Tungsten Karbida dengan rapat arus searah 2,5 mA/cm² [23]. Lapisan Ni-TiN/Si₃N₄ menggunakan elektrodeposisi rapat arus pulsa menghasilkan morfologi dengan tingkat aglomerasi yang lebih tinggi. Rangkaian PWM menyebabkan arus yang mengalir pada rangkaian tidak konstan sehingga menyebabkan aglomerasi. Aglomerat ini disebabkan karena penumpukan zat penguat atau unsur Ti dan Si pada lapisan permukaan. Aglomerat bisa timbul pada morfologi permukaan lapisan dikarenakan energi partikel yang

semakin tinggi akan menyebabkan laju elektrodeposisi semakin tinggi juga dan dengan dibantu rapat arus sehingga banyak bahan pelapis khususnya penguat yang menempel pada substrat [24].



GAMBAR 6. Analisis EDS Lapisan Komposit Ni-TiN/Si₃N₄ pada Substrat Tungsten Karbida

Analisis EDS kandungan unsur dalam lapisan komposit Ni-TiN/Si₃N₄ disajikan pada GAMBAR 6 dan dirangkum pada TABEL 1. Hasil pemindaian EDS menunjukkan bahwa unsur Ni, Ti dan Si terdeteksi pada lapisan. Kandungan unsur nikel yang lebih dominan menunjukkan perannya sebagai matriks komposit. Logam kandungan unsur komposit meningkat seiring dengan peningkatan temperatur elektrodeposisi yang memfasilitasi transfer muatan dan ion dalam elektrolit [25]. Sementara itu unsur N tidak terdeteksi pada lapisan yang terbentuk. Hal ini disebabkan karena N merupakan unsur yang ringan sehingga sulit terdeteksi oleh EDS [26]. Oksigen yang terdeteksi cukup banyak karena sifatnya yang reaktif pada semua bahan logam [27].

TABEL 1. Kandungan Lapisan Komposit Ni-TiN/Si₃N₄ pada Substrat Tungsten Karbida

Unsur	Komposisi Massa (%)	Komposisi Jumlah Atom (%)
C	3.57	12.62
O	21.49	57.09
Al	1.12	1.76
Si	4.03	6.10
Ti	0.09	0.08
Co	7.52	5.42
Ni	4.19	3.03
Mo	2.29	1.01
W	55.72	12.88
Total	100.00	100.00

SIMPULAN

Sistem *Pulse Generator* dengan rangkaian PWM untuk proses elektrodeposisi telah berhasil dibuat dan digunakan. Sistem *Pulse Generator* dengan rangkaian PWM ini mampu mengeluarkan nilai *duty cycle* yang dapat diatur dari 0-100% dan bisa disesuaikan ketinggian pulsanya. Pembentukan lapisan Ni-TiN/Si₃N₄ menggunakan metode elektrodeposisi dengan rapat arus pulsa sebesar 0,4 mA/mm² dengan *duty cycle* 10% menghasilkan morfologi permukaan yang kasar dan terjadi aglomerasi pada permukaan substrat. Hasil penelitian menunjukkan keberhasilan pembuatan sistem *pulse generator* untuk proses elektrodeposisi ditandai dengan adanya kandungan unsur logam Ni, Ti, dan Si serta tebal lapisan komposit yang terbentuk sebesar 2.7191 μm.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada semua pihak yang telah membantu dalam penelitian ini, yaitu Bapak Esmar Budi dan Bapak Teguh Budi Prayitno selaku pembimbing dari Program Studi Fisika UNJ, serta teman-teman Fisika UNJ 2020.

REFERENSI

- [1] Rajendran, P. R., Duraisamy, T., Chidambaram Seshadri, R., Mohankumar, A., Ranganathan, S., Balachandran, G., ... & Renjith, L. (2022). Optimisation of HVOF Spray Process Parameters to Achieve Minimum Porosity and Maximum Hardness in WC-10Ni-5Cr Coatings. *Coatings*, 12(3), 339.
- [2] Liu, S., Li, Y., Chen, P., Li, W., Gao, S., Zhang, B., & Ye, F. (2017). Residual stresses and mechanical properties of Si₃N₄/SiC multilayered composites with different SiC layers. *Boletín de la Sociedad Espanola de Ceramica y Vidrio*, 56(4), 147–154.
- [3] Sharma, A. K., Bhandari, R., Aherwar, A., Rimašauskienė, R., & Pinca-Bretotean, C. (2020). A Study of Advancement in Application Opportunities of Aluminum Metal Matrix Composites. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2419-2424.
- [4] Budi, E., Kusumawati, L., Assita, W. A., Indrasari, W., Sugihartono, I., & Teguh, B. P. (2020). Effect of Temperature on Electrodeposited Nickel Nitride Composite Coatings. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1428, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.
- [5] Alhosseini, S. H. N., & Mousavi, S. R. (2019). The Effect of Oxide, Carbide, Nitride and Boride Additives on Properties of Pressureless Sintered SiC: A Review. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(7), 2215-2231.
- [6] Aranzales, D., Wijenberg, J. H. O. J., & Koper, M. T. M. (2019). Voltammetric Study of TiN Electrodeposition on Polycrystalline Gold from Sulfuric and Methanesulfonic Acid. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(8), D283.
- [7] Fayomi, O. S. I., Ayodeji, S. A., Anyanwu, B. U., Nkiko, M. O., & Dauda, K. T. (2021). Effect of Electrodeposition Mechanism and α -Si₃N₄/ZrBr₂ Doped Composite Particle on the Physicochemical and Structural Properties of Processed NiPZn Coatings on Mild Steel for Advance Application. In *Key Engineering Materials* (Vol. 900, pp. 61-73). Trans Tech Publications Ltd.
- [8] Zhang, J., Hu, H., Liu, X., & Li, D. S. (2019). Development of The Applications of Titanium Nitride in Fuel Cells. *Materials today chemistry*, 11, 42-59.
- [9] Sharma, P., Sharma, S., & Khanduja, D. (2015). Production and Some Properties of Si₃N₄ Reinforced Aluminium Alloy Composites. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 3(3), 352-359.
- [10] Lu, X., Blawert, C., Scharnagl, N., & Kainer, K. U. (2013). Influence of incorporating Si₃N₄ particles into the oxide layer produced by plasma electrolytic oxidation on AM50 Mg alloy on coating morphology and corrosion properties. *Journal of Magnesium and Alloys*, 1(4), 267–274.
- [11] A. Karimzadeh, M. Aliofkhaezrai, F. C. Walsh, “A Review of Electrodeposited Ni-Co Alloy and Composite Coatings: Microstructure, properties and applications,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 372, pp. 463-498, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.079>.
- [12] B. Vanrenterghem et al., “Cutting the Gordian Knot of Electrodeposition via Controlled Cathodic Corrosion Enabling the Production of Supported Metal Nanoparticles below 5 nm,” vol. 226, pp. 396-402, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.12.080>.
- [13] V. Torabinejad et al., “Electrodeposition of Ni-Fe Alloys, Composites, and Nano Coatings—a Review,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 691, pp. 841-859, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.329>.
- [14] Ghosh, Swatilekha, “Electroless Copper Deposition: A Critical Review,” *Thin Solid Films*, vol. 669, pp. 641-658, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.11.016>

- [15] A. M. A. Mohamed, T. G. Golden, "Electrodeposition of Composite Materials," BoD- Books on Demand, 2016, [Online]. Available: <https://books.google.com/books?hl=id&lr=&id=QmQDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA187&dq=Cooke>
- [16] F. Xia et al., "Effect of Pulse Current Density on Microstructure and Wear Property of Ni-TiN Nanocoatings Deposited via Pulse Electrodeposition," *Applied Surface Science*, vol. 538, p. 148139, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148139>.
- [17] Saputro Y. dkk., "Model dan Pembuatan Sistem Pemberi Makan Ayam Petelur Otomatis Dengan Sistem Pengendali Timer", *Jurnal Cahaya BAGASKARA*, Vol. 4 No. 1, 2019, doi: https://jurnal.umpp.ac.id/index.php/cahaya_bagaskara/index.
- [18] Wijaya, H. T. dkk., "Simulasi Sistem Pengendali Motor Stepper dengan Metode *Pulse Width Modulation*", *Jurnal Elektro* Vol. 15 No. 1, 2022, doi: <https://ejournal.atmajaya.ac.id/index.php/JTE>.
- [19] Pauzan, M., "Rancang Bangun Bel Rumah Menggunakan IC 555 Sebagai *Monostable* dan *Astable Multivibrator*", *Jurnal Ilmu Komputer*, Vol. 10 No. 01, 2019, pp: 61-67, doi: <http://45.118.112.109/ojspasim/index.php/ilkom/article/view/151>.
- [20] M. M. Abrar, "Design and Implementation of Astable Multivibrator using 555 Timer," *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 22-29, 2017, doi: <https://doi.org/10.9790/1676-1201022229>.
- [21] P. Sivasakthi, M. V. Sangaranarayanan, "Influence of Pulse and Direct Current on Electrodeposition of Ni Gd₂O₃ Nanocomposite for Micro Hardness," *Wear Resistance and Corrosion Resistance Applications*, vol. 13, pp. 134-142, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2019.04.008>.
- [22] A. W. Andiani, E. Budi, I. Sugihartono, "Pembentukan Lapisan Komposit Ni-TiAlN/Si₃N₄ menggunakan Metode Elektrodeposisi dengan Variasi Temperatur," *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-JOURNAL)*, vol. 8, pp. SNF2019-145, 2019, doi: <https://doi.org/10.21009/03.SNF2019.02.PA.20>.
- [23] E. Budi et al., "Electrodepositing Ni-TiN/Si₃N₄ Composite Layer With Variation of Current Density", *Engineering Materials*, vol. 860, pp 320-326, 2019, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.860.320>.
- [24] Nafise Parhizkar et al., "Electrochemical Deposition of Ni-TiN Nanocomposite Coatings and the Effect of Sodium Dodecyl Sulphate Surfactant on the Coating Properties," vol. 39, no. 4, pp. 1021-1027, 2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s12034-016-1238-3>.
- [25] Esmar Budi et al., "Effect of Elevated Temperature on Composition and Morphology of Ni-TiN/Si₃N₄ Composite Coatings," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2320, no. 1, 2021, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0037553>.
- [26] P. Wang et al., "Novel Nitride Materials Synthesized at High Pressure," *Crystals*, vol. 11, no. 6, p. 614, May 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/cryst11060614>.
- [27] D. Tonelli, E. Scavetta, I. Gualandi, "Electrochemical Deposition of Nanomaterials for Electrochemical Sensing," *Sensors*, vol. 19, no. 5, p. 1186, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/s19051186>.