

Contents list available at [Sinta](https://sinta)**ARMATUR**

: Artikel Teknik Mesin &amp; Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur>**Pengaruh Variasi Waktu *Sputtering* Terhadap Karakteristik Mekanik dan Evolusi Struktur Mikro Baja AISI 4140**Niki Agastia Mutaqin<sup>1\*</sup>, Amarulloh<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Prodi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi “Warga” Surakarta, Sukoharjo*ARTICLE INFO**Keywords:**AISI 4140 Steel**DC Sputtering**Titanium Nitride Coating**Surface Hardness**Microstructural Analysis**ABSTRACT*

*AISI 4140 steel is a high-strength, low-alloy material commonly used in mechanical components subjected to high load and friction. Although its bulk properties are favorable, surface modification is often required to enhance wear resistance and prolong service life. This study investigates the influence of DC sputtering Titanium Nitride (TiN) deposition time on the mechanical performance and microstructural evolution of AISI 4140 steel. The experimental procedure varied sputtering times at 30, 60, 90, 120, and 150 minutes while maintaining constant processing parameters. Characterization techniques included Vickers hardness testing, wear testing, and SEM analysis to evaluate coating morphology and coating–substrate interface quality. The results indicate that TiN deposition significantly enhances surface hardness compared to the uncoated substrate. The maximum hardness value of 186.66 VHN was achieved at 60 minutes of deposition, corresponding to a dense, uniform coating with strong adhesion. Prolonged deposition times, however, led to decreased hardness and increased wear rate, attributed to excessive coating thickness, microstructural non-uniformity, and the formation of micro-defects. SEM observations corroborate these findings by revealing notable variations in coating morphology and interface integrity across deposition durations. Overall, the study concludes that sputtering time is a critical parameter in optimizing TiN coatings to improve the surface performance of AISI 4140 steel for engineering applications.*

\*Corresponding author: [22niki.agastia@gmail.com](mailto:22niki.agastia@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.24127/armatur.v7i2.11127>

Received 26 February 2026; Received in revised form 10 March 2026; Accepted 22 April 2026

Available online 1 September 2026

## Pendahuluan

Pada penggunaan komponen mesin berbahan AISI 4140, gesekan dan beban tinggi membuat permukaan material tetap rentan aus. Pelapisan Titanium Nitride (TiN) diterapkan untuk meningkatkan ketahanan aus dan memperpanjang umur pakai komponen [1]. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan performa baja AISI 4140 tidak hanya bergantung pada sifat mekanik *bulk*, tetapi juga dapat dilakukan melalui modifikasi permukaan. Salah satu metode yang digunakan adalah pelapisan menggunakan teknik *sputtering*, yang mampu meningkatkan kekerasan permukaan, menurunkan koefisien gesek, serta meningkatkan ketahanan aus tanpa mengubah sifat dasar material. [2]. Secara khusus, proses pengerasan yang diikuti penahanan waktu tertentu pada media pendingin dapat mengurangi austenit sisa dan menghaluskan struktur martensit, sehingga meningkatkan kekerasan secara substansial [3]. Variasi temperatur penempaan juga terbukti memodifikasi sifat mekanik dan mikrostruktur baja ini, dengan peningkatan kekerasan dan kekuatan tarik pada temperatur penempaan yang lebih rendah [4]. Khususnya dalam konteks pelapisan permukaan untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan aus dan korosi yang lebih tinggi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi secara komprehensif pengaruh durasi *sputtering* terhadap sifat mekanik, meliputi kekerasan dan kekuatan adhesi, serta menganalisis evolusi mikrostruktur lapisan yang terbentuk pada permukaan baja AISI 4140.

Baja AISI 4140 sering digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan kekuatan dan ketahanan tinggi, seperti pada *sprocket* dan komponen as kendaraan [5]. Karakteristik unik ini menjadikan AISI 4140 pilihan utama dalam industri otomotif, permesinan umum, dan minyak dan gas. Meskipun demikian, peningkatan sifat permukaan baja ini melalui metode pelapisan masih menjadi area penelitian yang aktif untuk lebih mengoptimalkan performanya di lingkungan operasional

yang ekstrim [6]. Salah satu metode yang menjanjikan untuk mencapai tujuan ini adalah *sputtering*, sebuah teknik deposisi fisik uap yang memungkinkan pembentukan lapisan tipis dengan kontrol presisi terhadap ketebalan dan komposisi. Metode *sputtering* memungkinkan memodifikasi permukaan material untuk meningkatkan ketahanan aus, korosi, dan sifat tribologis tanpa mengubah sifat *bulk* secara signifikan [7]. Meskipun demikian, penelitian yang mengkaji pengaruh variasi waktu *sputtering* terhadap karakteristik mekanik dan evolusi struktur mikro baja AISI 4140 secara mendalam masih terbatas, khususnya dalam upaya optimalisasi durasi deposisi untuk mencapai kinerja permukaan yang superior. Penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa variasi suhu dan waktu proses pelapisan mempengaruhi ketebalan dan kekerasan lapisan pada material baja [8]. Sebagai contoh, pada baja ST37, durasi dan suhu proses pelapisan *hard chrome* berbanding lurus dengan peningkatan ketebalan serta kekerasan lapisan, yang keduanya memengaruhi masa pakai material [9]. Begitu pula pada baja AISI 1045, diketahui bahwa kekasaran permukaan substrat akibat proses *grinding* berdampak signifikan pada kualitas pelapisan, termasuk kekerasan, laju korosi, dan daya rekat lapisan kromium [10]. Studi lain menginvestigasi karakteristik mikrostruktur dan sifat adhesi lapisan AlFeCr yang dideposisikan pada baja paduan kerja panas W320 melalui *magnetron sputtering*, menunjukkan bahwa suhu substrat yang lebih tinggi selama deposisi meningkatkan adhesi, sementara penambahan *interlayer gradien* memperbaiki homogenitas lapisan [11]. Selain itu, terdapat pula penelitian yang menyoroti pentingnya pelapisan untuk meningkatkan ketahanan aus pada perkakas potong [12], dan komponen baja paduan berkekuatan tinggi seperti AISI 4340 yang digunakan dalam industri otomotif dan kedirgantaraan [13]. Tinjauan ini juga menyoroti bagaimana modifikasi permukaan, seperti deposisi lapisan komposit AlNiCrCu, dapat dilakukan pada

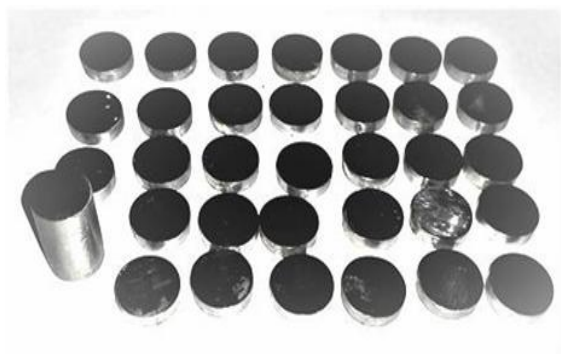
baja karbon rendah melalui metode paduan mekanis untuk meningkatkan karakteristik morfologi permukaan [14]. Lebih lanjut, metode *sputtering* telah terbukti menjadi teknik yang efisien untuk deposisi film tipis paduan entropi tinggi berbasis logam dan nitrida, di mana parameter seperti komposisi target, tegangan bias, daya *sputtering*, dan rasio aliran gas sangat mempengaruhi morfologi dan sifat mekanik film tipis yang dihasilkan [15]. Penelitian mengenai lapisan Ni-B pada baja 4150 menunjukkan bahwa perlakuan panas pasca-deposisi dapat meningkatkan kekerasan dan mengurangi koefisien gesek, menggaris bawahi potensi modifikasi sifat tribologis melalui kontrol parameter proses [16].

Namun, studi yang secara spesifik menguji dampak variasi waktu *sputtering* terhadap karakteristik mekanik dan struktur mikro pada baja AISI 4140, terutama terkait optimasi durasi deposisi untuk meningkatkan kekerasan dan kekuatan adhesi masih sangat terbatas. Penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan tersebut dengan menyelidiki secara mendalam bagaimana variasi waktu *sputtering* memengaruhi pembentukan mikrostruktur lapisan, kekerasan, serta kekuatan adhesi pada substrat baja AISI 4140, sehingga memberikan pemahaman yang lebih komprehensif untuk pengembangan aplikasi industri. Secara khusus, penelitian ini akan mengkaji parameter *sputtering* yang optimal untuk mencapai lapisan dengan kekerasan dan adhesi maksimum, serta menganalisis korelasi antara parameter deposisi, struktur mikro lapisan, dan sifat mekanik yang dihasilkan [17]. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan data empiris yang krusial untuk perancangan pelapisan *sputtering* yang efisien pada baja AISI 4140, membuka peluang bagi aplikasi baru yang membutuhkan ketahanan aus dan korosi yang superior [12][18]. Hal ini menjadi krusial mengingat aplikasi baja paduan tinggi seperti AISI 4140 dalam lingkungan operasional yang menuntut performa tinggi, seperti pada komponen pesawat terbang dan poros transmisi [19]. Peningkatan sifat

permukaan melalui *sputtering*, terutama dengan optimisasi waktu deposisi, berpotensi signifikan untuk memperpanjang umur pakai dan keandalan komponen-komponen tersebut.

## Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk mengkaji pengaruh variasi waktu proses *sputtering* terhadap kekerasan, keausan, dan struktur mikro baja AISI 4140. Sampel baja AISI 4140 paduan rendah dengan komposisi kimia 0,41%C, 0,30%Si, 0,75%Mn, 1,05%Cr, dan 0,25%Mo, diameter 14 mm dipreparasi melalui proses pemotongan dengan ketebalan 5 mm, kemudian dilakukan pengamplasan bertahap menggunakan kertas abrasif dengan variasi *grit* 240 hingga 2000, serta dilanjutkan dengan proses pemolesan untuk memperoleh permukaan yang halus dan bersih yang dapat dilihat pada Gambar 1. Selanjutnya, sampel dilapisi dengan lapisan TiN menggunakan mesin *DC sputtering* dengan tegangan 2,5 kV, arus 20 sampai dengan 40 mA, variasi waktu deposisi 30, 60, 90, 120, dan 150 menit. Selama proses *sputtering* dilakukan dalam kondisi vakum hingga mencapai tekanan operasi sekitar  $10^{-3}$  mbar dengan gas argon sebagai gas *sputter* dan nitrogen sebagai gas reaktor, perbandingan gas dijaga konstan 70:30 di semua pengujian. Setelah proses pelapisan selesai, sampel didinginkan dan dipersiapkan untuk pengujian karakterisasi.



Gambar 1. Substrat Baja AISI 4140

Karakterisasi material meliputi uji kekerasan *Vickers*, uji keausan, serta analisis

struktur mikro dan komposisi unsur menggunakan SEM. Uji kekerasan dilakukan pada 5 titik menggunakan beban 10 gf dengan waktu indentasi 5 detik. Kekerasan dapat dihitung menggunakan persamaan (1).

$$HV = 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

Dimana kekerasan *vickers* (HV), beban indentasi (F), dan panjang diagonal ( $d^2$ )

Uji keausan digunakan untuk mengevaluasi ketahanan permukaan terhadap gesekan, besar keausan dihitung dengan persamaan :

$$W_s = \frac{B \cdot bo^3}{8 \cdot r \cdot Po \cdot lo} \left[ \frac{mm^2}{kg} \right] \quad (2)$$

Dimana (B) adalah lebar piringan pengaus yaitu 3 mm, (bo) lebar keausan spesimen (mm), (r) jari jari pengaus (13,4 mm), (Po) gaya tekan pada proses keausan (2,12 kg) dan (lo) jarak tempuh pengausan (15 m).

sedangkan SEM digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dan distribusi unsur hasil pelapisan. Data hasil pengujian dianalisis secara komparatif untuk menilai pengaruh variasi waktu sputtering terhadap peningkatan sifat mekanik dan perubahan struktur mikro baja AISI 4140.

## Hasil dan Pembahasan

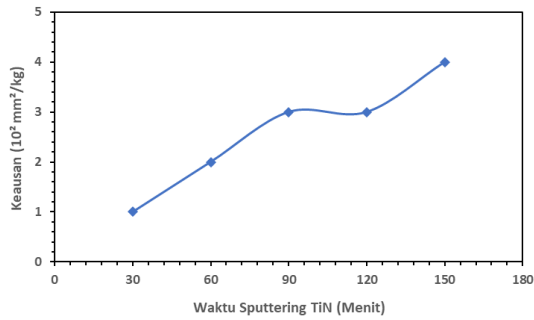
Berdasarkan data hasil pengujian, baja AISI 4140 sebelum proses pelapisan sputtering memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 129,12 HV. Setelah dilakukan pelapisan Titanium Nitride (TiN) menggunakan metode DC *sputtering*, terjadi peningkatan kekerasan permukaan pada seluruh variasi waktu deposisi. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan TiN yang terbentuk mampu memperbaiki sifat

mekanik permukaan substrat baja AISI 4140, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil kekerasan proses *DC Sputtering* TiN

No	Waktu (Menit)	Kekerasan n (HV)	Deviasi
1.	0	129,12	10,4
2.	30	136,84	2,2
3.	60	186,66	8,1
4.	90	143,06	3,8
5.	120	144,68	4,2
6.	150	143,08	1,7

Peningkatan kekerasan paling signifikan terjadi pada waktu *sputtering* 60 menit, dengan nilai kekerasan mencapai 186,66 HV. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pada waktu deposisi tersebut lapisan TiN terbentuk secara relatif seragam dan padat pada permukaan substrat. Struktur kristalannya yang keras dan stabil memungkinkan lapisan ini meningkatkan ketahanan permukaan material terhadap deformasi plastis [15]. Namun demikian, pada waktu *sputtering* yang lebih lama, yaitu 90, 120, dan 150 menit, nilai kekerasan justru mengalami penurunan dan cenderung stabil pada kisaran 143–145 HV. Penurunan ini karena semakin banyak gas nitrogen yang dialirkan mengakibatkan penumbukan atom N<sub>2</sub> yang berlebihan, maka perbandingan atom Ti menjadi tidak sesuai [20]. Kondisi tersebut dapat mengurangi efektivitas lapisan TiN dalam menahan beban indentasi selama pengujian kekerasan *Vickers*. Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa waktu sputtering memiliki pengaruh signifikan terhadap kekerasan permukaan, namun peningkatan waktu deposisi tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kekerasan. Oleh karena itu, terdapat waktu deposisi optimum, yaitu pada 60 menit, yang menghasilkan kekerasan permukaan tertinggi pada baja AISI 4140.

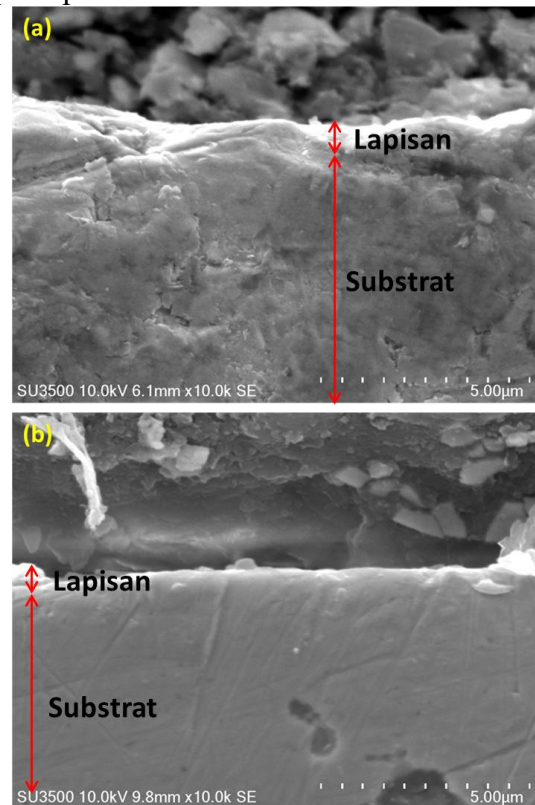


Gambar 2. Pengaruh waktu *sputtering* TiN terhadap keausan pada Baja karbon AISI 4140

Gambar 2. Menunjukkan hubungan antara waktu *sputtering* TiN terhadap nilai keausan menunjukkan bahwa nilai keausan meningkat seiring bertambahnya waktu deposisi. Pada waktu *sputtering* 30 menit, nilai keausan tercatat paling rendah, yaitu sekitar  $1 \times 10^2 \text{ mm}^2/\text{kg}$ , sedangkan nilai keausan tertinggi terjadi pada waktu 150 menit, yaitu sekitar  $4 \times 10^2 \text{ mm}^2/\text{kg}$ . Fenomena ini dapat dijelaskan bahwa pada waktu *sputtering* yang relatif singkat, lapisan TiN yang terbentuk masih cukup tipis namun memiliki adhesi yang baik terhadap substrat, sehingga mampu menahan gaya gesek selama pengujian keausan. Seiring bertambahnya waktu *sputtering*, ketebalan lapisan meningkat, namun diikuti dengan kemungkinan munculnya cacat mikro, retak halus, atau delaminasi parsial, yang justru mempercepat mekanisme keausan. Jika dikaitkan dengan hasil uji kekerasan, terlihat bahwa nilai kekerasan yang tinggi tidak selalu berbanding lurus dengan ketahanan keausan. Hal ini menunjukkan bahwa sifat keausan tidak hanya dipengaruhi oleh kekerasan, tetapi juga oleh struktur mikro lapisan, kualitas ikatan lapisan–substrat, serta homogenitas permukaan hasil *sputtering*. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa variasi waktu *sputtering* TiN berpengaruh nyata terhadap kekerasan dan keausan permukaan baja AISI 4140. Waktu *sputtering* 60 menit merupakan kondisi optimum untuk meningkatkan kekerasan permukaan, sedangkan waktu *sputtering* yang terlalu lama cenderung meningkatkan laju keausan

akibat degradasi kualitas lapisan [21]. Temuan ini menunjukkan pentingnya pengendalian parameter proses *sputtering* untuk memperoleh sifat permukaan yang optimal sesuai dengan aplikasi teknik yang diinginkan.

Berdasarkan hasil pengamatan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) pada penampang melintang (*Cross section*), terlihat dengan jelas terbentuknya lapisan tipis Titanium Nitride (TiN) hasil proses *sputtering* yang menutupi permukaan logam induk baja AISI 4140. Pada Gambar 3(a), lapisan TiN tampak sebagai zona terang yang kontinu di bagian permukaan, dengan batas antarmuka yang relatif jelas antara lapisan dan substrat baja. Keberadaan lapisan ini menunjukkan bahwa proses DC *sputtering* berhasil menghasilkan pelapisan TiN secara merata pada permukaan substrat.



Gambar 3. Hasil uji SEM pada lapisan TiN, (a) 30 menit, dan (b) 120 menit.

Lapisan TiN pada Gambar 3(a) tampak memiliki ketebalan yang relatif tipis dan cukup homogen, dengan indikasi ikatan yang baik terhadap logam induk. Kondisi ini sejalan dengan hasil uji kekerasan yang

menunjukkan peningkatan nilai kekerasan permukaan pada waktu *sputtering* tertentu, khususnya pada kondisi optimum. Struktur lapisan yang padat dan minim porositas berperan penting dalam meningkatkan ketahanan terhadap deformasi plastis saat dilakukan pengujian kekerasan *Vickers*.

Pada Gambar 3(b), terlihat perbedaan morfologi lapisan TiN dibandingkan Gambar 3(a). Lapisan hasil *sputtering* tampak lebih tebal, namun menunjukkan indikasi ketidakhomogenan struktur, seperti adanya bidang retak mikro atau ketidakrataan pada antarmuka lapisan–substrat. Fenomena ini mengindikasikan bahwa pada waktu deposisi yang lebih lama, pertumbuhan lapisan TiN tidak selalu diikuti oleh peningkatan kualitas struktur mikro. Akumulasi tegangan sisa (*residual stress*) selama proses *sputtering* berpotensi menyebabkan terbentuknya cacat mikro yang melemahkan performa mekanik lapisan [22][23]. Kondisi struktur mikro pada Gambar 3(b) memberikan penjelasan yang kuat terhadap hasil uji kekerasan dan keausan, di mana peningkatan waktu *sputtering* tidak selalu menghasilkan peningkatan sifat mekanik. Meskipun lapisan menjadi lebih tebal, keberadaan cacat mikro dan kemungkinan penurunan kualitas adhesi lapisan–substrat dapat menyebabkan penurunan kekerasan efektif serta peningkatan laju keausan. Hal ini menegaskan bahwa sifat tribologis permukaan tidak hanya ditentukan oleh ketebalan lapisan, tetapi juga oleh homogenitas struktur, kualitas ikatan antarmuka, dan kestabilan mikrostruktur lapisan TiN [24–27]. Secara keseluruhan, analisis SEM ini memperkuat hasil pengujian mekanik dengan menunjukkan bahwa waktu *sputtering* yang optimum menghasilkan lapisan TiN yang relatif seragam, padat, dan berikatan baik dengan substrat baja AISI 4140, sedangkan waktu *sputtering* yang berlebihan cenderung menghasilkan lapisan dengan kualitas struktur mikro yang menurun. Temuan ini menegaskan pentingnya pengendalian parameter waktu deposisi dalam proses *DC*

*sputtering* untuk memperoleh performa permukaan yang optimal.

## Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi waktu proses *DC sputtering* TiN memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik mekanik permukaan baja AISI 4140, khususnya pada nilai kekerasan dan keausan. Pelapisan TiN mampu meningkatkan kekerasan permukaan dibandingkan substrat tanpa pelapisan, dengan nilai kekerasan optimum dicapai pada waktu *sputtering* 60 menit sebesar 186,66 HV. Kondisi ini mengindikasikan terbentuknya lapisan TiN yang relatif seragam, padat. Sebaliknya, pada waktu *sputtering* yang lebih lama, peningkatan ketebalan lapisan cenderung diikuti oleh penurunan kekerasan dan peningkatan laju keausan, yang diduga berkaitan dengan munculnya cacat mikro, tegangan sisa, dan ketidak homogenan struktur lapisan. Ketahanan aus menunjukkan bahwa pada waktu *sputtering* 30 menit, memiliki nilai keausan paling rendah, yaitu sekitar  $1 \times 10^2 \text{ mm}^2/\text{kg}$ . Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa pengendalian waktu *sputtering* merupakan parameter kunci dalam optimasi pelapisan TiN pada baja AISI 4140 untuk memperoleh sifat permukaan yang optimal sesuai dengan kebutuhan aplikasi teknik.

## Referensi

- [1] Margono, Kozin M, Setiadhi D, et al. Development of Titanium Nitride-Based Coatings for Wear Resistant Materials : A Review. *Mech Explor Mater Innov* 2024;1. <https://doi.org/10.21776/ub.memi.2024.001.03.5>.
- [2] Priyambodo BH, Margono, Nugroho KC, et al. Effect of Oil Quenching and Shot Peening to Improve Hardness Behavior of S45C Carbon Steel. *Mater Sci Forum* 2022;1067:27–33. <https://doi.org/10.4028/p-dt2v5c>.

- [3] Mudda S, Hegde A, Sharma S, et al. Effect of various heat treatment methods and optimization of their parameters on mechanical properties of AISI 4140 steel 2025;1–9.
- [4] Margono M, Priyambodo BH, Nugroho KC. Pengaruh Laju Pendingin Pada Proses Heat Treatment Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja Karbon S45C. *Creat Res Eng* 2021;1:60. <https://doi.org/10.30595/serie.v1i2.10848>.
- [5] Susilo B, Nurroh kayati AS. Carbide Tool Wear Analysis for Manufacturing Aisi 4140 Alloy Steel with 2D / 3D Deform Simulation in PT Rejeki Sekawan Abadi Analisis Keausan Pahat Karbida Untuk Membubut Baja Paduan Aisi 4140 Dengan Simulasi Deform 2D / 3D di PT Rejeki Sekawan Abadi 2022;2.
- [6] Fedai Y. Exploring the Impact of the Turning of AISI 4340 Steel on Tool. *Lubricants* 2023;11:1–23.
- [7] Supriyanto A, Jamaldi A, Margono, et al. Analisis Mikrostruktur dan Performa Aus Baja S45C Dengan Perlakuan Panas pada Suhu 700 ° C , 750 ° C , dan 800 ° C 2025;14:532–8.
- [8] Riyadi TWB, Sarjito, Anggono AD, et al. Effect of Ni underlayer thickness on the hardness and specific wear rate of Cu in the laminated Ni/Cu coatings produced by electroplating. *AIP Conf Proc* 2018;1977. <https://doi.org/10.1063/1.5042970>.
- [9] Priyambodo BH, Margono M, Nugroho KC. Analisis Lapisan Hard Chrome dengan Heat Treatment terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro pada Permukaan Baja Karbon S45C. *Quantum Tek J Tek Mesin Terap* 2021;3. <https://doi.org/10.18196/jqt.v3i1.12284>.
- [10] Gugua EC, Ujah CO, Asadu CO, et al. Electroplating in the modern era, improvements and challenges: A review. *Hybrid Adv* 2024;7:100286. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100286>.
- [11] Aissani L, Alhussein A, Zia AW, et al. Magnetron Sputtering of Transition Metal Nitride Thin Films for Environmental Remediation. *Coatings* 2022;12:1–29. <https://doi.org/10.3390/coatings12111746>.
- [12] Bag R, Panda A, Sahoo AK, et al. Cutting tools characteristics and coating depositions for hard part turning of AISI 4340 martensitic steel : A review study. *Mater Today Proc* 2020;26:2073–8. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.448>.
- [13] Wagri NK, Jain NK, Petare A, et al. Investigation on the Performance of Coated Carbide Tool during Dry Turning of AISI 4340 Alloy Steel. *Materials (Basel)* 2023;16:1–19.
- [14] Hariyati, Aryanto D, Karo PK, et al. Pengaruh Penambahan MoO<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> pada Coating AlN iCrCu yang difabrikasikan dengan Metode Paduan Mekanik. *Artik Ris* 2016:20–4.
- [15] Margono, Darmadi DB, Gapsari F, et al. Optimized deposition parameters for titanium nitride coatings : Enhancing mechanical properties of Al 6011 substrates via DC sputtering. *Mech Eng Soc Ind* 2024;4:252–62. <https://doi.org/10.31603/mesi.12266>.
- [16] Riyadi TWB, Tjahjono T, Sarjito, et al. Wear and Corrosion Resistance of Aluminium Nitride Produced by DC Glow Discharge. *Adv Sci Lett* 2018;53:1689–99. <https://doi.org/10.1166/asl.2018.12080>.
- [17] Margono, Darmadi DB, Gapsari F, et al. Enhanced corrosion resistance of aluminum 6061 alloy using Ti-based thin films and plasma nitriding. *JCIS Open* 2025;18:100139. <https://doi.org/10.1016/j.jciso.2025.100139>.

- [18] Fu X, Shen Z, Chen X, et al. Influence of Element Penetration Region on Adhesion and Corrosion Performance of Ni-Base Coatings. *Coatings* 2020;10:1–18.
- [19] Sang Y, Sun G, Liu J. A 4340 Steel with Superior Strength and Toughness Achieved by Heterostructure via Intercritical Quenching and Tempering. *Metals (Basel)* 2023;13:1–11.
- [20] Margono, Darmadi DB, Widodo TD, et al. Hardness and Microstructure of TiN Coating on Aluminum Alloy with DC Sputtering 2024;1122:11–8. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1051.147>.
- [21] Margono, Darmadi DB, Gapsari F, et al. Enhancing surface properties of Al 6061 alloy using duplex TiNi films via plasma nitriding. *Results in Surfaces and Interfaces* 2025;18:100434. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2025.100434>.
- [22] Huff M. Review Paper: Residual Stresses in Deposited Thin-Film Material Layers for Micro- and Nano-Systems Manufacturing. *Micromachines* 2022;13:1–56.
- [23] Chason E, Su T. Understanding the Origins of Residual Stress in Thin Films Through Measurements and Modeling. *JOM* 2025;77:7540–58. <https://doi.org/10.1007/s11837-025-07698-0>.
- [24] Chavda MR, Dave DP, Chauhan K V, et al. Tribological Characterization of TiN Coatings prepared by Sputtering 2016;23:36–41. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.03.070>.
- [25] González-Carmona JM, Triviño JD, Gómez-Ovalle, et al. Wear mechanisms identification using Kelvin probe force microscopy in TiN, ZrN and TiN/ZrN hard ceramic multilayers coatings. *Ceram Int* 2020;46:24592–604. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.248>.
- [26] Shukla K, Rane R, Alphonsa J, et al. Structural, mechanical and corrosion resistance properties of Ti/TiN bilayers deposited by magnetron sputtering on AISI 316L. *Surf Coatings Technol* 2017;324:167–74. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.05.075>.
- [27] Terasaki N, Sakaguchi M, Chiba H, et al. Growth mechanism of TiN reaction layers produced on AlN via active metal bonding. *J Mater Sci* 2022;57:13300–13. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07472-6>.