

KAJIAN PUSTAKA APLIKASI PHYSICAL VAPOR DEPOSITION (PVD) KROMIUM SEBAGAI PELAPIS BAJA UNTUK MENINGKATKAN SIFAT MEKANIK LARAS SENJATA

Anung Nugroho, Yayat Ruyat, Marsono

Program Studi Magister Teknologi Persenjataan, Fakultas Sains dan Teknologi Pertahanan, Universitas
Pertahanan RI, Kawasan IPSC Sentul, Bogor, Jawa Barat
E-mail: anungnugroho2010@gmail.com

Abstrak

Perkembangan teknologi dalam industri, termasuk teknologi pelapisan, mengalami kemajuan yang pesat. Pelapisan bertujuan untuk meningkatkan nilai guna material yang dilapisi untuk tujuan tertentu. Kromium, yang melimpah di alam semesta, menjadi fokus penelitian untuk menganalisis pelapisannya menggunakan metode *physical vapor deposition* (PVD) dan sifat mekanik hasilnya. Penelitian ini menggunakan *systematic literature review* (SLR) dengan model *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), menghasilkan artikel rujukan dari sumber-sumber reputabel seperti PubMed, ScienceDirect, dan DOAJ. Proses PVD melibatkan deposisi lapisan tipis dari bahan dasar ke bentuk uap, yang kemudian mengendap pada permukaan benda kerja untuk membentuk lapisan yang diinginkan. Pelapisan kromium menggunakan PVD lebih efektif daripada *hardchrome* pada pelapisan laras senjata, memberikan perlindungan permukaan, meningkatkan ketahanan aus, dan meningkatkan sifat fungsional lainnya. Potensi ini menjadikan PVD sebagai alternatif yang ramah lingkungan untuk menggantikan *hardchrome*.

Kata kunci: *physical vapor deposition* (PVD); kromium; pelapisan baja; sifat mekanik; laras senjata

Abstract

Technological developments in industry, including coating technology, are progressing rapidly. Coatings aim to increase the use value of the coated material for a specific purpose. Chromium, which is abundant in the universe, is the focus of research to analyze its coating using the *Physical Vapor Deposition* (PVD) method and the mechanical properties of the results. This research utilized a *systematic literature review* (SLR) with the *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) model, generating reference articles from reputable sources such as PubMed, ScienceDirect, and DOAJ. The PVD process involves the deposition of a thin film from a base material to a vapor form, which then deposits on the surface of the workpiece to form the desired coating. Chromium plating using PVD is more effective than *hardchrome* at gun barrel plating, providing surface protection, improving wear resistance, and enhancing other functional properties. This potential makes PVD an environmentally friendly alternative to replace *hardchrome*.

Keywords: *physical vapor deposition* (PVD); chromium; steel coating; mechanical properties; gun barrel

PENDAHULUAN

Dalam pembuatan komponen dan peralatan untuk industri dan mesin, material yang diperlukan harus memiliki tingkat kekerasan dan ketahanan terhadap karat yang tinggi. Salah satunya baja tahan karat yang memiliki keuletan yang tinggi dan mudah dalam *machining*. Selain itu, baja karbon rendah memiliki sifat kekerasan yang baik, tetapi sifat tahan karatnya relatif kurang baik [1]. Untuk itu diperlukan langkah-langkah

tertentu untuk meningkatkan ketahanan karat baja karbon rendah. Berbagai metode dapat digunakan, salah satunya adalah melalui proses pelapisan listrik menggunakan bahan tahan karat seperti nikel, tembaga, seng, krom, dan sejenisnya. [1,2].

Dalam industri pertahanan khususnya material persenjataan, sangat dominan penggunaan baja, dengan semua sifat mekanik yang menguntungkan. Hal tersebut berdasarkan surat keputusan Menteri Pertahanan RI Nomor

Kep/1282/XI/2014 tentang Standar Militer Indonesia yang salah satu poinnya berkaitan dengan material senjata, antara lain: memiliki ketahanan terhadap karat, memiliki usia pakai yang lama sesuai kemampuan dan berat relatif ringan dengan beban tempur. Oleh karena itu diperlukan teknologi untuk meningkatkan mutu senjata, khususnya bagian laras sebagai komponen penting tempat dimana peluru ditembakkan yang berkaitan dengan sifat mekanik (ketahanan korosi, ketahanan keausan, ketahanan termal, dan lain sebagainya) untuk meningkatkan performa dari material utamanya yaitu baja karbon ataupun baja paduan nikel dan kromium [3].

Selam aini teknologi pelapisan pada material senjata umumnya menggunakan metode yang tidak ramah lingkungan dan menghasilkan bahan berbahaya yaitu melalui proses *hardchrome*.

Dari berbagai uraikan tersebutlah yang melatarbelakangi penulisan artikel ini dengan judul “Kajian Pustaka Aplikasi *Physical Vapor Deposition (PVD)* Kromium Sebagai Pelapis Baja untuk Meningkatkan Sifat Mekanik Laras Senjata”.

METODE

Dalam penulisan artikel ini, digunakan metode *systematic literature review (SLR)* yang melibatkan identifikasi, evaluasi, dan interpretasi semua bukti penelitian yang ada untuk memberikan jawaban yang spesifik terhadap pertanyaan penelitian [4], dengan berupa artikel-artikel yang relevan bersumber dari PubMed, ScienceDirect, dan DOAJ sebagai database bereputasi yang berkaitan dekat dengan objek kajian aplikasi *Physical Vapor Deposition (PVD)* pada material kromium sebagai coating laras senjata.

Tahapan dalam penelitian *systematic literature review* melibatkan beberapa langkah, termasuk menetapkan tujuan, mencari literatur, mengevaluasi studi, menggabungkan temuan, dan merumuskan kesimpulan [4]. Kata kunci dan *boolean* operator yang digunakan untuk pencarian literatur; “Physical Vapor Deposition” OR “Coating” AND “Kromium Nitrat” OR “Material Weapon” AND “Barrel Weapon”.

Kriteria kelayakan dalam penelitian ini terdiri dari kriteria inklusi dan eksklusi. Kriteria inklusi yang harus dipenuhi meliputi: 1) artikel ilmiah dalam bahasa Inggris, 2) literatur berupa

artikel ilmiah atau prosiding konferensi, 3) artikel dari jurnal internasional ternama, 4) berbentuk artikel ilmiah atau prosiding konferensi, 5) publikasi antara tahun 2002 hingga 2022, 6) menggunakan data primer, 7) membahas penerapan pelapisan kromium pada baja, dan 8) menggunakan metode PVD dalam konteks penelitian. [5]. Sedangkan kriteria eksklusi atau yang dikecualikan adalah: 1) karya ilmiah hanya dalam format abstrak; 2) artikel Blogspot, Wikipedia, dan media sosial; 3) artikel dengan desain cross-section. Untuk menyempitkan cakupan penelitian, peneliti menerapkan metode PICO (*Population* atau *Problem, Intervention, Comparison, Outcomes*) dengan mengidentifikasi pengelompokan yang relevan sesuai dalam Tabel 1 [5].

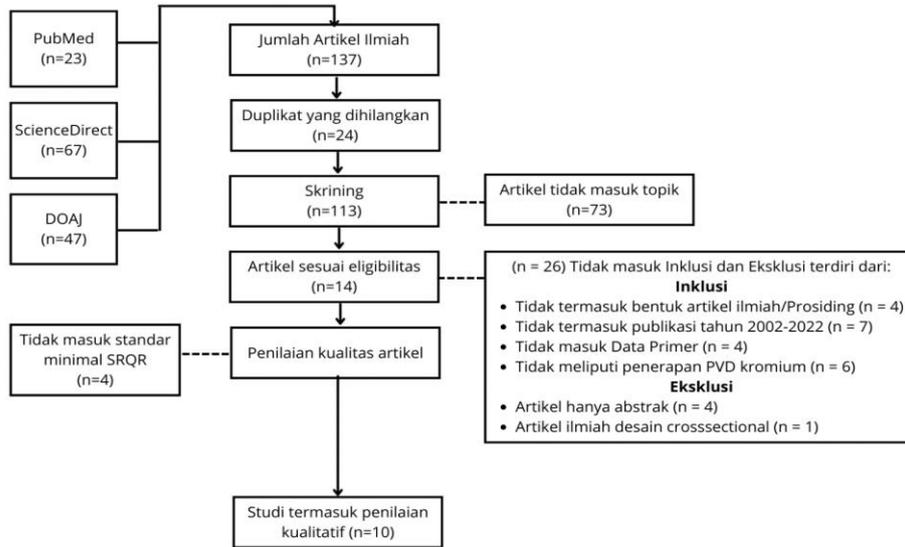
Tabel 1. Identifikasi PICO

Kategori	Deskripsi
<i>Population/Problem</i>	Pelapisan PVD Evaluasi PVD
<i>Intervention</i>	kromium pada baja
<i>Comparison</i>	n/a Kelebihan dan kekurangan pelapisan kromium dengan PVD
<i>Outcomes</i>	pada baja untuk laras

Dari literatur yang dipilih menggunakan metode PRISMA, didapatkan 137 artikel ilmiah. Dari jumlah tersebut, terdapat 24 artikel yang merupakan duplikasi data. Sebanyak 73 artikel tidak relevan dengan topik penelitian, sementara 27 artikel tidak memenuhi kriteria inklusi dan eksklusi. Proses seleksi literatur dilakukan dengan metode PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) sesuai dalam Gambar 1.

Langkah selanjutnya melibatkan penilaian kualitas artikel untuk menentukan apakah artikel ilmiah tersebut memenuhi standar minimum komponen yang telah ditetapkan. [5]. Dalam studi ini, peneliti memanfaatkan instrumen Standards for Reporting Qualitative Research (SRQR) yang terdiri dari 21 komponen evaluasi kualitas. Peneliti kemudian menetapkan standar minimal sebanyak 12 komponen agar artikel dapat diikutsertakan sebagai sumber literatur dalam penelitian ini. Dari 14 artikel yang diperiksa, 10 artikel memenuhi standar minimal yang ditetapkan. Sementara itu, 4 artikel lainnya

tidak memenuhi standar yang sama, sehingga didapatkan artikel sebagaimana dalam Tabel 2.



Gambar 1. Diagram PRISMA

Tabel 2. Penelitian berdasarkan pelapisan kromium pada baja

No	Nama Peneliti (Tahun)	Metode PVD	Material	Hasil Penelitian
1.	R. Bayon, dkk (2009)	<i>Evaporator PVD (semi-industrial machine METAPLAS MZR323)</i>	Cr/CrN pada baja F1272	Semua pelapis Cr/CrN memiliki sifat tribologi yang lebih baik daripada substrat baja tanpa pelapisan
2.	E. Bozyaz, dkk (2004)	Arc-PVD	CrN pada baja	CrN memiliki sifat mekanik lebih baik daripada pelapisan hardchrome normal
3.	J.L. Daure, dkk (2018)	EBPVD (<i>electron beam PVD</i>) dan UMS (<i>unbalanced magnetron sputtering</i>)	Cr pada baja	PVD Cr dalam penelitian ini menunjukkan tingkat kristalinitas yang tinggi dengan orientasi kristalografi (tekstur) yang jelas
4.	F. Hakami, dkk (2011)	Nitridasi plasma	CrN dan Cr pada baja AISI 1045	Lapisan CrN menunjukkan ketahanan aus yang lebih baik dan koefisien gesekan yang lebih rendah dibandingkan dengan lapisan kromium tunggal.
5.	Jianjun Hu, dkk (2018)	<i>High-frequency IHC (induction heating chromizing)</i>	Cr pada baja AISI 5140	Perbedaan kerapatan dislokasi antar lapisan dan substrat berubah secara mendasar dengan meningkatnya suhu kromisasi.

- | | | | | |
|-----|----------------------------------|--|-----------------------------------|---|
| 6. | Ozkan Ozdemir, dkk (2007) | <i>Nitro-chromizing dengan teknik thermo-reactive deposition</i> | CrN pada AISI 1010 | Perlakuan ini terbukti sangat efisien dalam produksi pelapis dasar nitrida. |
| 7. | Lei Shan, dkk (2016) | Arc-PVD | CrN pada baja 316L | Dengan peningkatan potensial kontribusi keausan mekanis menurun dan kontribusi keausan yang dipercepat oleh korosi meningkat. Pada potensial anodik tinggi (0,5 V) korosi sumuran terjadi pada lintasan keausan dan pada bagian luar lintasan keausan pada 316L dan 316L yang dilapisi CrN. |
| 8. | Wolfgang Tillmann, dkk (2016) | <i>Reactive magnetron sputtering</i> | Cr pada baja ASP 2023 (AISI M3:2) | Ketahanan aus struktur meningkat dengan material keras berbasis Cr sedangkan struktur yang tidak dilapisi akan hancur. |
| 9. | Y.L. Chipatecua, dkk (2012) | <i>Magnetron Sputtering</i> | Cr/CrN pada baja AISI 304 | Percobaan menunjukkan bahwa lapisan CrN/Cr yang memiliki periode bilayer yang lebih rendah dan ketebalan yang lebih rendah meningkatkan efisiensinya sebagai penghalang dan meningkatkan ketahanan korosi pada semua lapisan yang dievaluasi. |
| 10. | J.A. Alegri'a-Ortega, dkk (2012) | <i>Magnetron Sputtering</i> | Cr/CrN pada baja AISI 304 | Menggunakan lapisan multilayer Cr/CrN memungkinkan pengurangan yang signifikan dalam efek sinergi yang terjadi pada permukaan baja tahan karat polos. Hal ini juga mengurangi efek murni erosi dan korosi. Permukaan baja tahan karat AISI-304 yang dilapisi dengan Cr/CrN memiliki ketahanan aus yang lebih tinggi daripada permukaan tanpa pelapisan. |

Berdasarkan evaluasi kualitas artikel ilmiah dan ekstraksi data yang telah dilakukan, hanya 10 artikel ilmiah (sebagaimana tercantum dalam tabel 2 di atas) yang akan dijadikan fokus literatur dalam penelitian ini untuk analisis lebih lanjut. [6–15].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Physical Vapor Deposisi Kromium

Pelapisan kromium secara tradisional melibatkan paparan komponen pada rendaman kromium yang mengandung kromium trioksida (heks-krom) dan asam sulfat. Namun perlu diketahui bahwa kromium heksavalen dan asam

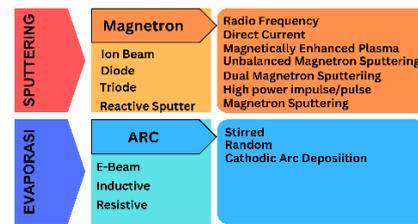
pekat bersifat toksik dan sehingga perlu diatur untuk melindungi keselamatan pekerja dan lingkungan. Peraturan industri yang ada mengharuskan produsen untuk mempertahankan kontrol keselamatan yang ekstensif dan perizinan dalam penggunaannya.

Produsen mencari alternatif untuk menghindari dampak lingkungan, meningkatkan keselamatan pekerja, dan mengurangi biaya. Maka dari itu, lapisan deposisi uap fisik atau *physical vapor deposition* (PVD) mulai diperkenalkan. Proses PVD dapat memberikan alternatif pelapisan yang sederhana dan dapat diandalkan yang indah, tahan lama, dan aman.

PVD dapat menyimpan lapisan kromium murni yang tahan lama/dekoratif. Menambahkan elemen seperti nitrogen dapat menghasilkan alternatif krom yang lebih tahan lama seperti kromium nitrida (CrN), yang sangat meningkatkan kinerja dalam aplikasi dengan keausan tinggi.

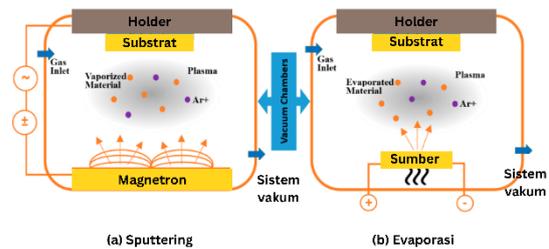
PVD adalah teknik pelapisan vakum yang sangat baik untuk meningkatkan ketahanan aus dan korosi yang sangat dibutuhkan untuk aplikasi fungsional, seperti perkakas, potongan dekoratif, peningkatan optik, dan peningkatan mekanik. Dalam penggunaan ini, butiran yang rendah dan proses yang ramah lingkungan sangat diperlukan. Manfaat pelapisan PVD sangat banyak, termasuk memberikan keuntungan yang nyata dan unik yang menambah daya tahan dan nilai pada produk. Teknik deposisi memiliki peran penting dalam proses pemesinan yang membutuhkan karakteristik, seperti kekerasan pada suhu tinggi, ketahanan abrasi yang tinggi, stabilitas kimia, ketangguhan, dan kekakuan. Selain itu, PVD juga mampu menghasilkan lapisan dengan adhesi sangat baik, lapisan homogen, struktur dan sifat bertingkat, morfologi yang terkontrol, keragaman material dan sifat yang tinggi, dan lain sebagainya. [16].

Proses PVD memungkinkan pengendapan dalam sistem pelapisan satu lapis, berlapis-lapis, dan bertingkat, serta komposisi dan struktur paduan khusus [17]. Fleksibilitas dan kemampuan tersebut menjadikan PVD mengalami pengembangan dan peningkatan teknik untuk berbagai proses dan beberapa jenis telah muncul, dalam gambar 2 [17,18].



Gambar 2. Jenis teknik PVD saat ini untuk pelapisan lanjut

Teknik-teknik diatas terus berkembang pesat. Banyak buku dan artikel yang menyebarkan informasi tentang jenis-jenis PVD. *Sputtering* (penyemprotan katodik) dan evaporasi (penguapan) adalah yang paling umum metode PVD digunakan untuk deposisi film tipis [17].



Gambar 3. Skema proses PVD (a) sputtering dan (b) evaporasi

Kromium merupakan salah satu bahan pelapis yang sering digunakan dalam PVD karena sifat-sifatnya seperti kekerasan, ketahanan aus, dan kekuatan yang harus dimiliki sebuah konstruksi mesin. Proses PVD dengan menggunakan kromium melibatkan proses yaitu: 1) deposisi penguapan vakum (material kromium diuapkan); 2) Deposisi *sputtering* vakum (partikel kromium diionisasi); 3) Deposisi ion vakum (partikel kromium diuapkan dan ionisasi) [17].

Untuk penjelasan lebih detail, berikut perbandingan antara teknik evaporasi dan sputtering terkait kondisi hampa udara, laju deposisi, daya lekat, daya serap, energi yang tersimpan, homogenitas, ukuran butir, dan atomisasi yang dirangkum dalam Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan jenis PVD

Parameter	Sputtering	Evaporasi
Hampa udara	Rendah	Tinggi
Laju deposisi	Rendah	Tinggi
Daya lekat	Tinggi	Rendah
Daya serap	Tinggi	Rendah
Energi tersimpan	Tinggi	Rendah
Homogenitas	Banyak	Sedikit
Ukuran butir	Kecil	Besar
Atomisasi	Lebih Tersebar	Terarah

Logam Baja

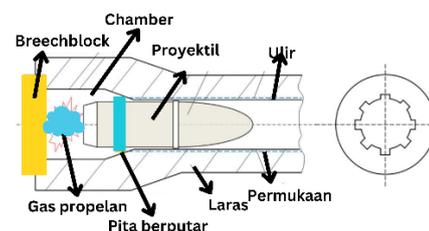
Baja adalah jenis logam paduan yang terdiri dari besi sebagai komponen utama dan karbon sebagai unsur paduannya. Kandungan karbon dalam baja bervariasi antara 0,2% hingga 2,1% berat sesuai dengan jenisnya. Peran karbon dalam baja adalah sebagai elemen penguat yang menghambat pergeseran dislokasi pada struktur kristal atom besi. Selain karbon, baja juga dapat mengandung unsur paduan lain seperti mangan, krom, vanadium, dan tungsten. [19].

Baja yang digunakan untuk pembuatan laras senjata merupakan baja paduan khusus yang memiliki sifat-sifat tertentu yang diperlukan untuk menahan tekanan, panas, dan tekanan internal yang dihasilkan oleh ledakan propelan. Jenis baja yang umum digunakan dalam pembuatan laras, antara lain yaitu: 1) Baja kromium-molibdenum (memiliki kekuatan yang tinggi, tahan terhadap korosi, dan dapat menahan suhu tinggi yang dihasilkan selama tembakan berulang [20]). Contohnya adalah AISI 4140 dan AISI 4340); 2) Baja kromium-vanadium (memiliki kekuatan yang tinggi dan daya tahan terhadap suhu tinggi. Beberapa contoh termasuk AISI 4150 dan AISI 6150); 3) Baja kromium-nikel-molibdenum (memiliki kombinasi kekuatan tinggi, ketahanan terhadap korosi, dan daya tahan terhadap suhu tinggi. Salah satu contohnya adalah AISI 4340); 4) Baja nikel-kromium-molibdenum (digunakan untuk kebutuhan senjata khusus, seperti senapan runduk atau meriam besar yang memiliki kombinasi yang baik antara kekuatan, ketahanan terhadap panas, dan ketahanan terhadap korosi). Secara umum, baja paduan khusus yang digunakan tergantung pada kebutuhan spesifik dari senjata tertentu. Proses perlakuan panas yang tepat juga diperlukan untuk meningkatkan sifat-sifat

mekanik dan termal dari baja yang digunakan dalam pembuatan laras senjata [10].

Laras Senjata

Ketika senapan laras panjang kaliber besar ditembakkan, proyektil didorong di sepanjang laras senapan oleh gas pembakaran propelan dan dilontarkan dari *muzzle* senjata dengan kecepatan tinggi ke arah sasaran [21]. Biasanya, proses penembakan balistik interior ini berlangsung selama tidak lebih dari 20 milidetik. Ada tiga fenomena penting yang terjadi di ruang tertutup yang dibentuk oleh proyektil, laras senjata dan breechblock (gambar 4). Fenomena pertama adalah erosi yang disebabkan oleh propelan gas pembakaran dengan suhu tinggi. Gesekan adalah fenomena kedua yang terjadi antara permukaan lubang senapan dan proyektil dengan pita yang berputar. Fenomena ketiga adalah kelelahan yang disebabkan oleh pembebanan dinamis tekanan gas yang tinggi, tekanan mekanis oleh interaksi laras-proyektil dan tekanan termal yang dihasilkan oleh gradien suhu yang besar [21].

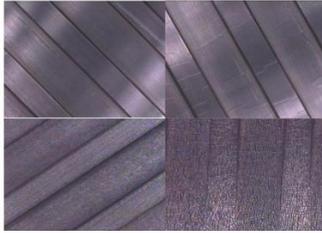


Gambar 4. Skema sistem peluncuran

Sifat Mekanik Laras dan Potensi PVD Kromium

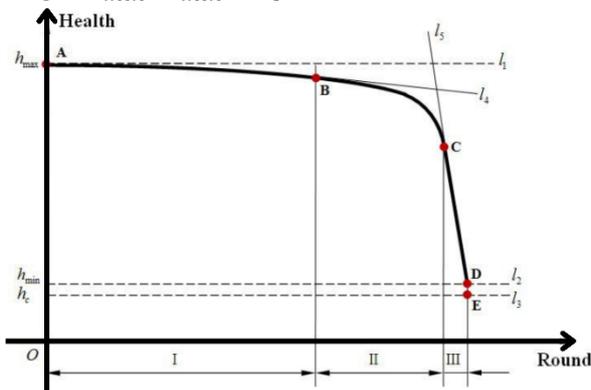
Seiring berjalannya waktu penggunaan akan terjadi ombinasi erosi, gesekan, dan fatik telah merusak laras setelah menembakkan ratusan atau ribuan proyektil (Gambar 5). Erosi lubang laras oleh gas pembakaran suhu tinggi menciptakan pengaruh secara kimiawi dan panas. Struktur mikro dan sifat baja laras akan membuat material permukaan melemah dan lebih rapuh. Material yang melemah akan dihilangkan sebagian oleh gesekan antara proyektil berkecepatan tinggi dan lubang senapan. Hasil gesekan yang dibantu oleh erosi menyebabkan peningkatan diameter lubang yang mempengaruhi kondisi interferensi proyektil dengan permukaan laras. Hal tersebut mengakibatkan gas bertekanan tinggi dapat bocor di antara proyektil dan lubang laras sehingga mengurangi tekanan dan kecepatan *muzzle* proyektil. Oleh karena itu akan

mempengaruhi jangkauan dan akurasi tembakan [21].



Gambar 5. Morfologi permukaan laras pada penggunaan tertentu [21].

Keamanan peluncuran laras menjadi masalah kritis dan penting karena menghindari laras patah. Dibawah ini (dalam Gambar 6) menunjukkan skema proses menurunnya sifat mekanik laras secara bertahap dari putaran pertama (Tahap I, Titik A sampai Titik B) dan memburuk setelah menembakkan putaran tertentu (Tahap II, Titik B sampai Titik C). Setelah kritis (Titik C) ditembakkan, terlihat penurunan kinerja secara drastis hingga mencapai batas (Titik E). Oleh karena itu, ketika indeks menurun dari h_{max} sebelum fase pertama menjadi h_c setelah menembakkan fase batas. Sehingga untuk menghindari patahnya laras secara tiba-tiba indeks dapat diturunkan sampai h_{min} ($h_{min} > h_c$) [21].

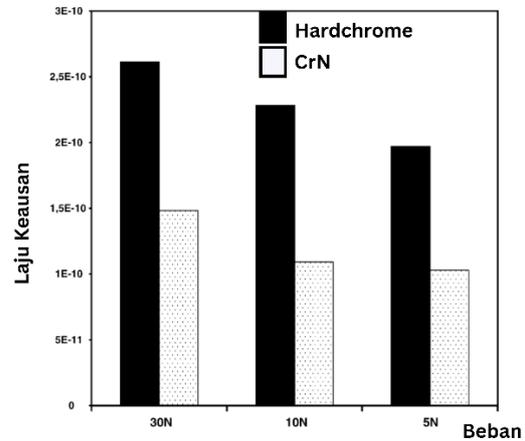


Gambar 6. Skema menurunnya kinerja laras senjata [21].

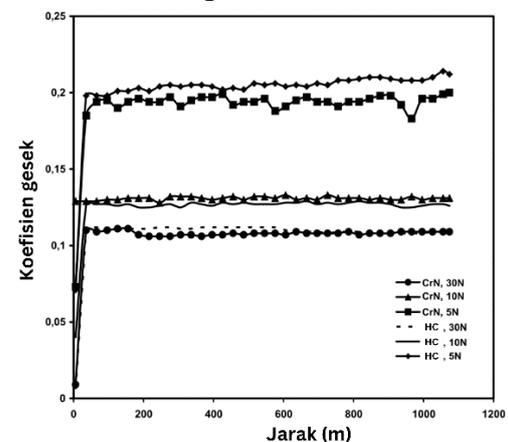
Berbagai uraian diatas, diperlukan perlakuan meningkatkan sifat mekanik baja, sebagaimana yang telah dilakukan pada penelitian Bayon, dkk (2009) Dalam penelitian, lapisan *multilayer* Cr/CrN dengan ketebalan lapisan individu yang berbeda telah dideposisikan pada substrat baja F1272 dan silikon. bahwa ketebalan lapisan pada sampel dengan nilai periode *bilayer* masing-masing sekitar 55 nm sampai dengan 500 nm dengan ketebalan lapisan Cr lebih rendah daripada CrN.

Nilai kekerasan pada semua lapisan Cr / CrN *multilayer* sangat mirip. Kekerasan tertinggi diukur dalam kasus *multilayer* periode *bilayer* L 270 nm dengan 29 Gpa. Adapun nilai korosinya yang dihasilkan berkisar 0,35 sampai dengan 0,92 μm [6].

Selanjutnya dalam penelitian Bozyaz, dkk (2004), Eksperimen dilakukan perbandingan *hardchrome* dan arc-PVD dengan efek beban normal (5, 10 dan 30 N) dan suhu (ruangan dan 60 °C) pada perilaku keausan. Hasilnya menunjukkan bahwa CrN berkinerja lebih baik daripada pelapisan *hardchrome* yang berbanding lurus dengan peningkatan suhu dan beban normal. Pada suhu 60°C, kedalaman keausan dan koefisien gesek pada lapisan *hardchrome* dan lapisan CrN tidak stabil, dimana lapisan CrN secara umum lebih baik [7] sebagaimana dalam gambar 7 dan 8.

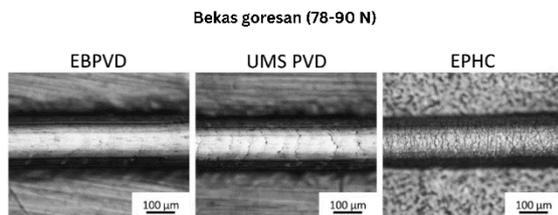


Gambar 7. Laju keausan pada lapisan *hardchrome* dan CrN dan suhu ruang



Gambar 8. Koefisien gesek pada lapisan *hardchrome* dan CrN dan suhu ruang

Penelitian Daure, dkk (2018), Hasilnya menunjukkan bahwa lapisan PVD Cr yang diperiksa dalam penelitian ini menunjukkan tingkat kristalinitas yang tinggi dengan orientasi kristalografi (tekstur) yang jelas; selain itu, sifat tekstur tergantung pada metode deposisi. Sebaliknya, lapisan *hardchrome* menunjukkan struktur kristal yang kurang sempurna tetapi dengan tekstur yang kurang signifikan [8] sebagaimana dalam gambar 9.



Gambar 9. Perbandingan morfologi *electron beam (EBPVD)*, *unbalanced magnetron sputtering (UMSPVD)*, dan *electroplated hardchromium (EPHC)*

Penelitian Hakami, dkk (2011), diketahui bahwa lapisan krom CrN menunjukkan ketahanan aus yang lebih baik dan koefisien gesekan yang lebih rendah dibandingkan dengan lapisan krom tunggal [9].

Dalam penelitian Jianjun Hu, dkk (2018), menunjukkan bahwa fasa dan struktur mikro lapisan Cr sangat bergantung pada suhu kromisasi. Pada suhu rendah (1000°C), lapisan Cr adalah *perlite alloy*. Saat suhu naik hingga 1300°C, lapisan Cr menjadi larutan padat Cr-Fe (Cr-Fe SS). Lapisan Cr-Fe SS yang dibentuk pada suhu tinggi memiliki kekerasan yang lebih tinggi dan ketahanan korosi yang lebih baik tetapi keuletan yang lebih buruk dibandingkan dengan lapisan *perlite alloy* [10].

Penelitian Ozdemir, dkk (2007), Lapisan CrN yang terbentuk pada sampel baja halus, seragam, serta terikat dengan baik pada matriks baja. Ketebalan lapisan CrN yang terbentuk pada sampel baja berkisar antara 5.16(±1,48) hingga 13.45(±1,73) µm, tergantung pada waktu perlakuan. Nilai kekerasan mikro rata-rata dari lapisan tersebut adalah 1789±59 HV_{0,05}. Lapisan tersebut terdiri dari fasa Cr₂N dan (Cr, Fe)₂N_(1-x) menurut XRD. Hasil EDS menunjukkan bahwa lapisan coating mengandung kromium dan nitrogen [22].

Penelitian Lei Shan, dkk (2016), Uji tribokorosi yang dilakukan menunjukkan bahwa koefisien gesekan menurun dan kehilangan keausan meningkat seiring dengan meningkatnya dari -1 V ke 0 V. Di bawah potensi katodik -1 V, keausan abrasif berupa keausan mekanis mendominasi keausan baja tahan karat 316L. Ketika meningkat, korosi umum dan tribokorosif terhadap keausan meningkat. Deformasi plastis proses keausan lapisan CrN katodik [12].

Penelitian Tillman, dkk (2016), aplikasi lapisan tipis CrAlN dan CrAlCN meningkatkan ketahanan aus struktur permukaan jika dibandingkan dengan baja perkakas berkecepatan tinggi yang dikeraskan 62,38±0,18 HRC. Dengan mengaplikasikan struktur permukaan dengan topografi yang berbeda pada permukaan baja ASP2023, koefisien gesekan dapat disesuaikan karena perubahan profil kekasaran dan asperities. Investigasi menunjukkan bahwa, dibandingkan dengan permukaan baja, gesekan dapat dikurangi dengan lapisan material keras berbasis kromium (Cr) [13].

Penelitian Chipatecua, dkk (2012), melaporkan hasil pengaruh periode *bilayer* (A) dan ketebalan total (f) terhadap ketahanan korosi *multilayer* CrN/Cr yang dideposisi dengan *magnetron*. Percobaan menunjukkan bahwa lapisan CrN/Cr yang memiliki periode bilayer yang lebih rendah dan ketebalan yang lebih rendah meningkatkan efisiensinya sebagai penghalang dan meningkatkan ketahanan korosi [14].

Terakhir, dalam penelitian Alegría-Ortega, dkk (2012), Lapisan multilayer CrN/Cr yang dihasilkan oleh *unbalanced magnetron sputtering* tidak seimbang (UMS) di atas baja tahan karat AISI-304 dan di atas baja polos tahan karat AISI-304 dan di atas baja polos dipelajari dengan menggunakan prosedur yang ditunjukkan dalam ASTM G119-09. Hasilnya menunjukkan bahwa tingkat keausan total dapat dikurangi hingga setengahnya dibandingkan dengan baja tahan karat polos ketika lapisan semacam ini digunakan. Yang juga disoroti adalah pengurangan yang kuat dalam efek sinergis, dan ditunjukkan bahwa efek korosi murni untuk sudut tumbukan yang dievaluasi (301 dan 901) serupa. Efek sinergis memberikan kontribusi terbesar ketika baja polos dievaluasi pada 301. Untuk semua kondisi, erosi adalah mekanisme keausan yang paling penting [15].

Sifat mekanik baja pada laras termasuk kekuatan tarik, kekerasan, modulus elastisitas, dan kepadatan. Kromium memiliki potensi untuk meningkatkan sifat mekanik terutama kekerasan dan ketahanan korosi. Kromium memiliki peran penting dalam meningkatkan ketahanan terhadap korosi dengan membentuk lapisan pada permukaan baja laras, yang efektif mencegah kerusakan mekanik dan kimia. Hal ini menghasilkan kinerja yang lebih stabil dan tahan lama dari material tersebut.

SIMPULAN DAN SARAN

PVD merupakan proses deposisi lapisan material ke permukaan substrat dengan metode fisik dalam kondisi vakum. Proses PVD terdiri dari tiga proses utama: deposisi penguapan vakum, deposisi sputtering vakum, dan deposisi ion vakum. Penerapan PVD sudah dilakukan dalam berbagai bidang industri. Sehingga proses PVD sangat potensial digunakan dalam pelapisan baja pada laras senjata yang memerlukan kinerja tinggi.

Perbandingan pelapisan kromium secara PVD dengan pelapisan umum *hardchrome* pada baja bahan laras senjata yaitu lapisan PVD umumnya memiliki kekerasan yang lebih tinggi daripada lapisan *hardchrome* sehingga PVD lebih tahan terhadap aus dan abrasi. Proses PVD memungkinkan pengendalian yang lebih baik terhadap ketebalan lapisan yang dihasilkan, sehingga memungkinkan aplikasi pada permukaan dengan toleransi dimensi yang lebih ketat dan presisi. Lapisan PVD memiliki korosi yang lebih baik disebabkan oleh struktur kristal yang lebih padat dan homogen, yang menghasilkan perlindungan yang lebih baik terhadap penetrasi zat korosif. Proses PVD lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan proses *hardchrome* karena dalam PVD tidak melibatkan penggunaan bahan kimia beracun atau limbah yang berbahaya seperti yang terjadi dalam proses *hardchrome*. Proses PVD kromium dapat diterapkan pada berbagai jenis material substrat, tanpa menghasilkan distorsi termal yang signifikan.

Berdasarkan hasil studi pustaka sehingga penulis memberikan rekomendasi bahwa metode PVD kromium dapat digunakan sebagai alternatif terbaik dalam menggantikan *hardchrome* yang dinilai bersiko.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Sari Y, Nashrullah A, Sopiyan. 2021. Permukaan Baja Karbon Hardness and Corrosion Resistance of Hardfacing Layer on Carbon Steel. *J. Konversi Energi dan Manufaktur*. 7: 1.
- 2 Sinaga AJ, Manurung C. 2020. Analisa Laju Korosi dan Kekerasan Pada Stainless Steel 316 L Dalam Larutan 10 % NaCl Dengan Variasi Waktu Perendaman. *Sprocket J. Mech. Eng.* 1(2): 92.
- 3 Bayuseno A, Nugroho S. Pengaruh konsentrasi larutan dan kuat arus terhadap ketebalan pada proses pelapisan nikel untuk baja karbon rendah. (1): 23.
- 4 Kitchenham B, Pearl Brereton O, Budgen D, Turner M, Bailey J, Linkman S. 2009. Systematic literature reviews in software engineering - A systematic literature review. *Inf. Softw. Technol.* 51(1): 7.
- 5 Herwando H, Sitompul TH. 2021. Evaluasi Manfaat Penerapan Telemedicine di Negara Kepulauan: Systematic Literature Review. *Indones. Heal. Inf. Manag. J.* 9(2): 91.
- 6 Bayón R, Igartua A, Fernández X, Martínez R, Rodríguez RJ, García JA, de Frutos A, Arenas MA, de Damborenea J. 2009. Corrosion-wear behaviour of PVD Cr/CrN multilayer coatings for gear applications. *Tribol. Int.* 42(4): 591.
- 7 Bozyaz E, Ürgen M, Çakır AF. 2004. Comparison of reciprocating wear behaviour of electrolytic hard chrome and arc-PVD CrN coatings. *Wear.* 256(7-8): 832.
- 8 Daure JL, Carrington MJ, Shipway PH, McCartney DG, Stewart DA. 2018. A comparison of the galling wear behaviour of PVD Cr and electroplated hard Cr thin films. *Surf. Coatings Technol.* 350: 40.
- 9 Hakami F, Sohi MH, Ghani JR. 2011. Duplex surface treatment of AISI 1045 steel via plasma nitriding of chromized layer. *Thin Solid Films.* 519(20): 6792.
- 10 Hu J, Zhang Y, Yang X, Li H, Xu H, Ma C, Dong Q, Guo N, Yao Z. 2018. Effect of pack-chromizing temperature on microstructure and performance of AISI

- 5140 steel with Cr-coatings. *Surf. Coatings Technol.* **344**(January): 656.
- 11 Dagi, E., E. Uslu GO. 2014. Immediate effects of tear gas on lung functions. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* **189**(1): 57.
- 12 Shan L, Wang Y, Zhang Y, Zhang Q, Xue Q. 2016. Tribocorrosion behaviors of PVD CrN coated stainless steel in seawater. *Wear.* **362–363**: 97.
- 13 Tillmann W, Stangier D, Laemmerhirt IA, Biermann D, Freiburg D. 2016. Investigation of the tribological properties of high-feed milled structures and Cr-based hard PVD-coatings. *Vacuum.* **131**: 5.
- 14 Chipatecua YL, Olaya JJ, Arias DF. 2012. Corrosion behaviour of CrN/Cr multilayers on stainless steel deposited by unbalanced magnetron sputtering. *Vacuum.* **86**(9): 1393.
- 15 Alegría-Ortega JA, Ocampo-Carmona LM, Suárez-Bustamante FA, Olaya-Flórez JJ. 2012. Erosion-corrosion wear of Cr/CrN multi-layer coating deposited on AISI-304 stainless steel using the unbalanced magnetron (UBM) sputtering system. *Wear.* **290–291**: 149.
- 16 B. Navinsek, P.Panjan IM. 1997. Title of the 114083th document. **97**: 182.
- 17 Baptista A, Silva F, Porteiro J, Míguez J, Pinto G. 2018. Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands. *Coatings.* **8**(11): .
- 18 Pinheiro XL et al. 2024. The combination of electrodeposited chromium (III) and PVD as an industrial viable solution for the replacement of electrodeposited chromium (VI). *Process Saf. Environ. Prot.* **182**(September 2023): 727.
- 19 Arifin J, Purwanto H, Syafa'at I. 2017. Pengaruh jenis elektroda terhadap sifat mekanik hasil Pengelasan smaw baja astm a37. *J. Momentum UNWAHAS.* **13**(1): 27.
- 20 Aljufri A. Analisa Sifat Mekanis Sambungan Las Smaw Pada Material Aisi 304 Menggunakan Kampuh Yang Berbeda. .
- 21 Wu B, Zheng J, Luo TF, Wang T, Zhou YC, Huang X. 2020. Damage and fracture of gun barrel under wear-fatigue interaction. *J. Phys. Conf. Ser.* **1507**(10): .
- 22 Ozdemir O, Sen S, Sen U. 2007. Formation of chromium nitride layers on AISI 1010 steel by nitro-chromizing treatment. *Vacuum.* **81**(5): 567.