

Bab VIII

Penguasaan Teknik Pelapisan Nosel Roket Padat Penting bagi Pengembangan Teknologi Roket

Setiadi, Ahmad Novi Muslimin, dan M. Dito Saputra

A. Perkembangan dan Kendala Teknologi Roket Indonesia

Seperti halnya kendaraan pada umumnya, sebuah roket bekerja dengan memanfaatkan hukum ketiga Newton, ketika setiap aksi akan menghasilkan reaksi. Pada kendaraan bermotor seperti mobil, roda akan mendorong jalan untuk menghasilkan pergerakan mobil ke depan. Contoh lainnya adalah seperti saat kita memukul bola kasti atau tenis, kita akan menghasilkan aksi berupa bola yang terpental akibat pukulan dan gaya dorong balik yang kita rasakan di tangan sebagai reaksi. Sebuah roket memiliki ruang bakar yang berisi propelan, baik berupa padatan, cairan, atau campuran keduanya. Di dalam ruang tersebut, propelan dibakar dan menghasilkan gas dengan suhu dan tekanan tinggi. Gas ini kemudian dikeluarkan melalui nosel di bagian

Setiadi*, A. N. Muslimin & M. D. Saputra

*Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: seti1159@gmail.com

© 2025 Editor & Penulis

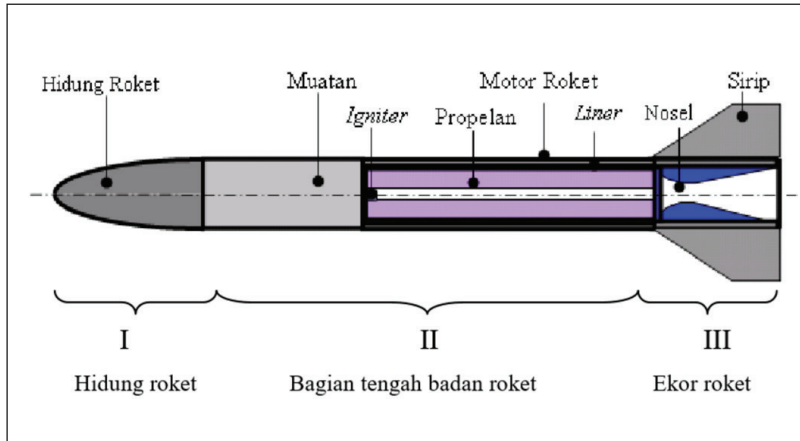
Setiadi, Muslimin, A. N. & Saputra, M. D. Penguasaan Teknik Pelapisan Nosel Roket Padat Penting bagi Pengembangan Teknologi Roket. Dalam T. Djamaluddin & F. Nuraeni (Ed.), *Keantariasaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* (251–283).

Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1425.c1491 E-ISBN: 978-602-6303-86-8

belakang roket dengan kecepatan sangat tinggi. Momentum dari aksi mengeluarkan massa gas ini ke satu arah, menciptakan momentum reaksi yang sama dan berlawanan arah, sehingga mendorong roket ke depan. Proses untuk menghasilkan gaya dorong dengan mengeluarkan material propelan ini disebut dengan propulsi roket.

Seperti yang telah kita ketahui sebelumnya roket merupakan wahana yang mempunyai mesin konversi energi yang memungkinkan roket bergerak sesuai dengan gaya dorong yang dihasilkan dari proses pembakaran. Energi panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar di ruang bakar motor roket diubah menjadi energi panas, yang kemudian menghasilkan tekanan yang dapat menimbulkan gaya dorong melalui nosel roket, yang memungkinkan roket bergerak ke arah berlawanan dengan gaya dorong tersebut. Dalam proses ini, energi kinetik dihasilkan sebagai hasil dari perubahan energi kimia bahan bakar menjadi energi panas (Bintoro, 2013). Secara umum roket digunakan sebagai transportasi antariksa yang digunakan untuk meluncurkan manusia, satelit, dan pesawat luar angkasa ke orbit Bumi atau lebih jauh. Kemudian roket juga digunakan sebagai wahana untuk eksplorasi ilmiah yang memungkinkan sensor dan peralatan ilmiah disematkan di roket kemudian dikirim ke luar angkasa untuk mempelajari radiasi, medan magnet, dan cuaca. Dengan pengembangan roket juga ternyata dapat meningkatkan perkembangan teknologi seperti material, mesin, dan teknologi elektronik terus mengalami kemajuan berkat pembuatan dan peluncuran roket. Roket juga digunakan pada bidang militer dan pertahanan seperti dengan dikembangkannya rudal balistik dan menjadi wahana untuk mengirim satelit militer.

Komponen utama roket berbahan bakar padat, terdiri dari tiga bagian: bagian depan, yang merupakan hidung roket; bagian tengah, yang merupakan selongsong berbentuk silinder; dan bagian pangkal, yang merupakan ekor roket. Hidung roket, yang biasanya berbentuk kerucut atau busur, diikuti oleh tabung muatan, yang berfungsi sebagai kompartemen muatan roket, termasuk peralatan penunjang dan sensor kendali. Motor roket terdiri dari bahan bakar padat atau propelan, liner, igniter, dan nosel. Bagian pangkal roket, yaitu ekor



Sumber: Bintoro (2013)

Gambar 8.1 Konfigurasi Komponen Roket

atau sirip, berfungsi untuk mengontrol stabilitas aerodinamika roket saat terbang. Sirip roket biasanya berbentuk segitiga delta, segiempat trapesium, atau bentuk lainnya. Konfigurasi komponen roket dapat dilihat pada Gambar 8.1.

Undang-undang No. 21 Tahun 2013 memberikan landasan hukum bagi Indonesia untuk mengeksplorasi dan memanfaatkan ruang angkasa guna meningkatkan kesejahteraan, pertahanan, dan keamanan nasional (Handoyo, 2016). Ini mencakup pemanfaatan ruang angkasa untuk komunikasi, navigasi, dan penginderaan jauh, yang berperan penting dalam berbagai sektor seperti pertanian, mitigasi bencana, dan manajemen sumber daya alam. Pengembangan teknologi roket nasional merupakan salah satu kunci untuk mendukung kegiatan eksplorasi dan pemanfaatan ruang angkasa tersebut.

Penguasaan pengembangan dan penelitian mengenai teknologi roket di Indonesia saat ini telah mengalami kemajuan yang cukup pesat. Pengembangan teknologi pelapisan roket di Indonesia dimulai dengan berdirinya Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN). LAPAN adalah badan pemerintah yang bertanggung jawab atas pengembangan teknologi antariksa di Indonesia dan sekarang

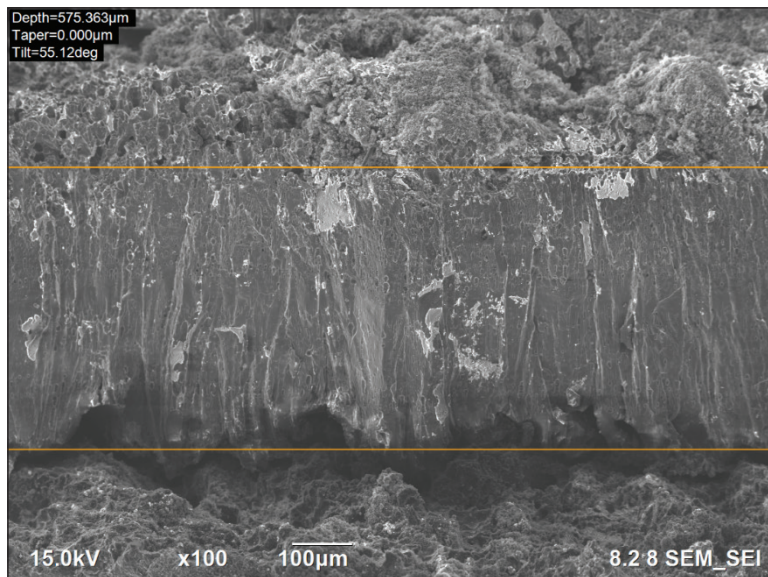
berubah menjadi Organisasi Riset Penerbangan dan Antariksa di bawah BRIN. Sejak pendiriannya, LAPAN telah fokus pada pengembangan roket buatan lokal, seperti roket RX series. Tercatat dalam periode tahun 2015–2020 Pusat Riset Teknologi Roket BRIN (dahulu Pusat Teknologi Roket LAPAN) telah mampu mengembangkan berbagai tipe dan jenis roket, beberapa di antaranya RX-550, RX-450, RX-320, RX-1220, RKX-200 EDF, RKX-200 TJ, RCX-1000. Dari antara tipe-tipe tersebut, RX-450, RX-320, RX-1220, RKX-200 EDF, dan RKX200 TJ telah dilakukan hingga pengujian dinamis roket (Mariani, 2021; Sutrisno, 2019).

Pengembangan dan penelitian roket yang dilakukan oleh Pusat Riset Teknologi Roket pastinya tidak terlepas dari berbagai macam kendala. Kendala yang sering ditemukan yaitu sering terjadi kerusakan pada bagian *divergent nosel* roket saat dilakukan pengujian statik. Pada saat terjadi propulsi bagian dalam, permukaan nosel roket akan mengalami tekanan, hantaman ablasi, dan lingkungan suhu yang sangat tinggi, bahkan di atas 1500°C. Bagian *divergent nosel* adalah bagian dari nosel yang memiliki bentuk melebar. Diameter nosel mulai membesar setelah melewati titik tersempit yang disebut kerongkongan (*throat*). Fungsi utama bagian ini adalah untuk mempercepat aliran gas yang telah mengalami ekspansi. Hal ini dapat dicapai dengan memperbesar ruang, mengurangi tekanan, dan meningkatkan kecepatan gas hingga mencapai kecepatan supersonik. Bagian *convergent* merupakan bagian awal dari nosel, tempat diameter nosel secara bertahap mengecil. Fungsi bagian ini adalah untuk mempercepat aliran gas panas yang keluar dari ruang pembakaran. Salah satu contoh kegagalan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 8.2.

Selain hantaman dan tekanan ablasi, nosel roket juga akan mengalami proses pembentukan deposisi yang dihasilkan dari residu pembakaran propelan. Deposisi hasil pembakaran tersebut akan memengaruhi sifat aerodinamis dari roket yang ada. Ketebalan deposisi hasil pembakaran roket mencapai sekitar 0.5 mm. Ketebalan ini akan terus bertambah seiring dengan lamanya proses pembakaran.

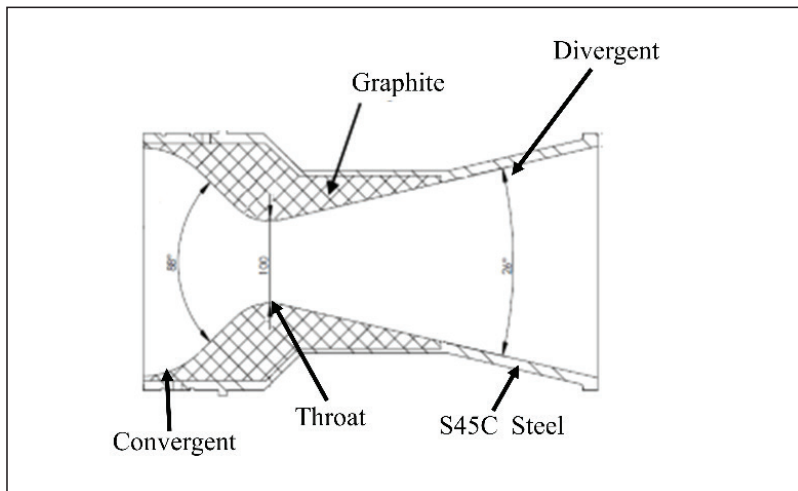


Gambar 8.2 Kegagalan yang terjadi pada *divergent* nosel roket saat uji *static*.



Gambar 8.3 Morfologi ketebalan deposisi hasil proses pembakaran pada permukaan substrat nosel roket.

Hingga saat ini desain nosel roket yang digunakan oleh Pusat Riset Teknologi Roket menggunakan kombinasi bahan grafit dan baja karbon. Material grafit digunakan pada bagian *convergent* dan *throat*, sedangkan baja karbon digunakan pada bagian *divergent nosel*. Pembagian ini dilakukan untuk meminimalisasi beban aerodinamis yang dihasilkan oleh bagian nosel roket (Sugondo et al., 2010). Pada aplikasinya, substrat nosel tersebut belum mampu menanggulangi efek proses propulsi yang terjadi seperti pada Gambar 8.2 dan 8.3 yang ada. Oleh karena itu, salah satu pendekatan solusi yang dilakukan untuk mengurangi kegagalan pada bagian *convergent*, *throat*, dan *divergent* nosel roket tanpa harus mengganti material nosel dan melakukan desain ulang roket yang ada, yaitu penggunaan teknik proteksi berbasis pelapisan. Dengan dilakukannya teknik pelapisan ini, dimensi permukaan nosel dapat dikurangi, sehingga massa nosel yang dimiliki akan lebih ringan dan performa kekuatan permukaan nosel juga meningkat (Sugondo et al., 2010).



Sumber: Setiadi et al. (2022)

Gambar 8.4 Konfigurasi nosel roket Pusat Riset Teknologi Roket-BRIN

Terdapat banyak teknik pelapisan yang dapat diaplikasikan pada permukaan nosel roket. Teknik umum yang digunakan dan mudah diaplikasikan yaitu *Physical Vapor Deposition* (PVD), *Chemical Vapor Deposition* (CVD), dan *Thermal Spray*. Ketiga teknik ini merupakan metode pelapisan yang umum digunakan dalam teknologi pelapisan nosel roket karena metode-metode pelapisan tersebut mampu memberikan pelapisan keramik pada permukaan nosel roket yang memiliki lingkungan kerja pada suhu lingkungan yang sangat tinggi. Lapisan bahan keramik akan mampu memberikan kekuatan secara mekanis permukaan nosel roket yang mengalami proses abrasi dan pemanasan suhu tinggi pada saat proses pembakaran terjadi.

Oleh karena itu, pada subbab selanjutnya akan dibahas secara detail mengenai teknik pelapisan dan beberapa aplikasi teknik pelapisan yang telah dikembangkan pada permukaan nosel roket padat yang telah dikembangkan oleh Pusat Riset Teknologi Roket BRIN.

B. Teknik Pelapisan Nosel Roket

Teknik pelapisan (*coating*) nosel roket merupakan teknik yang sudah digunakan sejak pertengahan abad ke-20, yaitu selama dan pasca-Perang Dunia II. Pelapisan nosel roket merupakan teknik penting yang bertujuan untuk meningkatkan daya tahan dan efisiensi nosel roket terhadap suhu tinggi, tekanan, dan korosi yang dihasilkan dari proses pembakaran. Pada awal pengembangan roket, bahan yang digunakan untuk nosel sering kali sederhana dan tidak dilapisi secara khusus. Seiring meningkatnya kebutuhan akan kinerja dan daya tahan yang lebih tinggi, penelitian dan pengembangan teknik pelapisan mulai berkembang (Sutton & Biblarz, 2011). Pada dekade 1960-an dan 1970-an, material keramik seperti zirkonia yang distabilkan dengan yttria (YSZ) dan logam tahan panas seperti tantalum dan niobium mulai digunakan untuk pelapisan nosel. Teknik seperti *Chemical Vapor Deposition* (CVD) dan *Physical Vapor Deposition* (PVD) juga mulai diperkenalkan. Pada era modern, pelapisan nosel roket terus berkembang dengan penggunaan material komposit dan teknik pelapisan yang lebih canggih seperti *plasma spray* dan *advanced CVD*. Material

komposit, termasuk serat karbon yang diperkuat dengan matriks keramik atau logam, digunakan untuk meningkatkan performa termal dan mekanis. Saat ini, teknik pelapisan nosel digunakan dalam berbagai program antariksa komersial dan militer. Misalnya, SpaceX dan Blue Origin menggunakan teknik pelapisan canggih untuk meningkatkan efisiensi dan masa pakai roket mereka.

Penggunaan teknik pelapisan pada nosel roket telah mengalami evolusi signifikan sejak awal pengembangan roket. Inovasi dalam material dan teknik pelapisan telah memungkinkan peningkatan kinerja dan ketahanan nosel, yang sangat penting dalam mencapai keberhasilan misi-misi antariksa modern.

Berikut adalah penjelasan mengenai beberapa teknik pelapisan nosel roket.

1. Pelapisan Keramik

Pelapisan keramik merupakan teknik pelapisan yang menggunakan bahan-bahan keramik untuk memberikan perlindungan pada permukaan substrat yang dilapisi. Beberapa bahan keramik yang sering digunakan pada nosel roket yaitu Zirkonia yang disetabilkan dengan yttria (YSZ), karbida, nitrida, dan oksida keramik. Keunggulan dari pelapisan keramik ini yaitu keramik memiliki titik leleh yang sangat tinggi dan konduktivitas termal yang rendah, yang membantu melindungi nosel dari suhu ekstrem.

Contoh penggunaan dan studi kasus yaitu pelapisan keramik adalah pada nosel roket yang menggunakan pelapis YSZ untuk memberikan isolasi termal dan meningkatkan ketahanan terhadap korosi dan oksidasi. Studi kasus seperti pada program antariksa tertentu, nosel roket yang dilapisi dengan YSZ menunjukkan peningkatan signifikan dalam ketahanan terhadap suhu tinggi dan erosi dibandingkan dengan nosel tanpa pelapisan keramik. Penelitian menunjukkan bahwa lapisan YSZ mampu mempertahankan integritas struktural nosel selama siklus termal yang berulang sehingga mengurangi kebutuhan untuk penggantian atau perawatan yang sering.

2. Pelapisan Logam

Pelapisan logam digunakan sebagai pelindung pada bagian-bagian nosel yang mengalami beban mekanis tinggi serta lingkungan yang sangat reaktif. Beberapa bahan yang sering digunakan yaitu molibdenum, tantalum, dan tungsten. Keunggulan dari lapisan logam ini adalah memiliki kekuatan tinggi pada suhu tinggi serta tahan terhadap oksidasi dan korosi.

Contoh penggunaan dan studi kasus yaitu pada nosel roket yang dilapisi dengan nikel melalui *electroplating* menunjukkan peningkatan signifikan dalam ketahanan terhadap korosi dan suhu tinggi dan memperpanjang umur pakai komponen tersebut. Studi kasus yaitu pada salah satu program antariksa, nosel roket yang dilapisi dengan paduan kobalt menggunakan *thermal spray coating* berhasil meningkatkan ketahanan terhadap erosi partikel padat dalam aliran gas panas. Hasilnya menunjukkan peningkatan umur pakai hingga 30% dibandingkan nosel tanpa pelapisan logam.

3. Pelapisan Komposit

Teknik pelapisan ini menggunakan kombinasi bahan seperti matriks logam dengan serat keramik atau serat karbon. Keunggulan kombinasi material dapat memberikan kekuatan mekanis yang tinggi serta ketahanan termal yang baik.

Contoh Penggunaan dan studi kasus yaitu pada nosel roket yang dilapisi dengan komposit silikon karbida (SiC) menunjukkan peningkatan signifikan dalam ketahanan terhadap suhu tinggi dan erosi dan memperpanjang umur pakai komponen tersebut. Studi kasus yaitu pada salah satu program antariksa, nosel roket yang dilapisi dengan komposit nikel-keramik menggunakan *thermal spray coating* berhasil meningkatkan ketahanan terhadap erosi partikel padat dalam aliran gas panas. Hasilnya menunjukkan peningkatan umur pakai hingga 40% dibandingkan nosel tanpa pelapisan komposit.

4. Pelapisan CVD (*Chemical Vapor Deposition*)

Teknik pelapisan ini merupakan teknik yang memanfaatkan reaksi kimia gas prekursor pada permukaan substrat untuk membentuk lapisan tipis. Keunggulan dari teknik ini yaitu lapisan yang dihasilkan sangat seragam dan memiliki adhesi yang baik pada substrat.

5. Pelapisan PVD (*Physical Vapor Deposition*)

Teknik deposisi uap fisik melibatkan penguapan material pelapis yang kemudian mengendap pada substrat. Keunggulan dari teknik ini yaitu mampu memberikan kontrol yang baik atas ketebalan dan komposisi lapisan.

6. Pelapisan *Thermal Spray*

Teknik ini dilakukan dengan cara menyemprotkan partikel material pelapis yang dilebur menggunakan suhu tinggi. Keunggulan teknik ini yaitu mampu menghasilkan lapisan tebal dan tahan lama.

Setiap teknik pelapisan memiliki kelebihan dan kekurangan tersendiri, dan pemilihan teknik tergantung pada spesifikasi operasional roket, termasuk jenis bahan bakar, suhu pembakaran, tekanan, dan durasi penggunaan. Dengan menggunakan teknik pelapisan yang tepat, nosel roket dapat dioptimalkan untuk performa yang lebih baik dan masa pakai yang lebih panjang. Pelapisan yang tepat untuk nosel roket sangat penting untuk memastikan kinerja optimal dan umur panjang komponen dalam kondisi operasional yang ekstrem. Referensi yang disebutkan dapat digunakan untuk mempelajari lebih dalam teknik-teknik pelapisan tersebut.

C. Teknik Pelapisan *Physical Vapor Deposition* (PVD) pada Substrat Nosel Roket

Pelapisan PVD telah menggantikan beberapa jenis lapisan *electroplating* konvensional dan lapisan cat tradisional dengan teknologi lapisan baru yang memberikan tampilan dekoratif juga memiliki kekerasan yang superior, ketahanan aus, tidak akan cepat memudar atau korosi.

Deposisi lapisan adalah lapisan keramik sangat tipis, ketebalan kurang dari 0,5 mikron, dan dalam beberapa kasus deposisi pelapisan PVD dapat diaplikasikan di atas bahan substrat yang sudah dilapisi *chrome*, termasuk kuningan, *die-casting*, baja, aluminium, dan plastik ABS. Pelapisan PVD dapat diaplikasikan langsung ke beberapa bahan seperti *stainless steel*, titanium dan *tools steel*.

Sejak diperkenalkan pada akhir 1980-an, PVD telah terbukti berhasil pada berbagai macam aplikasi fungsional, untuk meningkatkan kinerja dengan peningkatan kekerasan, ketahanan aus, ketahanan oksidasi, mengurangi gesekan, dan fungsi biomekanik (Sproul, 1996). Secara umum tahapan proses PVD pada permukaan substrat noel roket diawali dengan proses pembersihan permukaan substrat untuk menghilangkan kotoran, minyak, dan oksida yang dapat mengganggu adhesi lapisan. Proses selanjutnya yaitu evaporasi material pelapis seperti logam atau keramik dipanaskan hingga mencapai titik uap dalam ruang vakum. Kondisi pelapisan tersebut dilakukan dalam kondisi pemanasan yang bersumber dari pemanasan resistif, sinar elektron, atau laser. Proses ini memastikan transportasi material yang seragam. Setelah deposisi selesai, substrat didinginkan dan dapat menjalani proses tambahan seperti *annealing* untuk mengoptimalkan sifat mekanis dan termal lapisan (Mattox, 2010).

Bahan pelapis yang umum digunakan pada permukaan nosel roket yaitu titanium nitrida (TiN) biasanya digunakan untuk meningkatkan kekerasan permukaan dan ketahanan terhadap oksidasi. Kemudian tungsten (W) yang digunakan untuk memberikan ketahanan termal dan mekanis yang tinggi. Selanjutnya kromium nitrida (CrN) digunakan untuk ketahanan korosi dan oksidasi. Kemudian yang terakhir yaitu aluminium oksida (Al_2O_3) digunakan untuk menyediakan isolasi termal dan ketahanan terhadap erosi (Vossen & Kern, 1991).

Physical Vapor Deposition (PVD) adalah teknik pelapisan yang penting dalam meningkatkan performa dan daya tahan komponen nosel roket. Nosel roket harus menahan suhu dan tekanan ekstrem, sehingga memerlukan pelapisan yang mampu memberikan ketahanan

tinggi terhadap panas, korosi, dan aus. Berikut ini adalah penjelasan mengenai berbagai teknik PVD *coating* yang digunakan untuk nosel roket, mencakup prinsip kerja, aplikasi, dan keunggulannya.

1. *Sputtering*

Sputtering adalah salah satu metode PVD yang paling sering digunakan. Proses ini melibatkan pembentukan plasma gas, biasanya menggunakan argon, untuk menumbuk material target. Atom-atom dari material target terlepas dan mengendap pada substrat, membentuk lapisan tipis. Terdapat dua macam teknik *sputtering* yaitu *magnetron sputtering* dan *reactive sputtering*.

Pada *magnetron sputtering*, medan magnet digunakan untuk meningkatkan kepadatan plasma, sehingga meningkatkan laju *sputtering*. Teknik ini sangat efektif untuk pelapisan yang seragam dan tahan lama. *Magnetron sputtering* digunakan untuk melapisi nosel roket dengan bahan yang memiliki ketahanan tinggi terhadap panas dan aus, seperti titanium nitrida (TiN) dan kromium nitrida (CrN) (Kelly & Arnell, 2000).

Reactive Sputtering merupakan metode dengan menambahkan gas reaktif (seperti oksigen atau nitrogen) ke dalam ruang *sputtering*. Gas reaktif bereaksi dengan atom target untuk membentuk senyawa baru pada substrat. Untuk nosel roket, pelapisan seperti titanium alumina (TiAlN) yang dihasilkan dari reaksi antara titanium dan gas nitrogen, memberikan ketahanan yang lebih tinggi terhadap oksidasi dan korosi pada suhu tinggi (Biederman et al., 2004).

Berikut beberapa keunggulan *Sputtering*:

- a. Dapat menghasilkan lapisan yang sangat seragam dan padat.
- b. Ketebalan lapisan dapat dikontrol dengan presisi tinggi.
- c. Lapisan yang dihasilkan memiliki adhesi yang baik dan sifat mekanis yang kuat.

2. *Evaporation*

Evaporation adalah teknik PVD ketika material pelapis diuapkan dalam vakum dan kemudian mengendap pada substrat. Ada dua metode utama dalam *evaporation*, yaitu *thermal evaporation* dan *electron beam evaporation*.

Thermal evaporation menggunakan material pelapis yang dipanaskan hingga mencapai titik didih menggunakan elemen pemanas resistif, lalu menguap dan mengendap pada substrat. Teknik ini cocok untuk melapisi nosel roket dengan material yang memiliki titik leleh rendah hingga sedang, seperti aluminium dan tembaga, yang dapat meningkatkan ketahanan panas dan konduktivitas termal nosel (Mattox, 2010; Ohring, 2001).

Electron beam evaporation menggunakan sinar elektron untuk memanaskan material target. Sinar elektron fokus pada material, menyebabkan penguapan lokal yang intens. Metode ini cocok untuk material dengan titik leleh tinggi seperti tungsten dan tantalum. Nosel roket yang dilapisi dengan bahan ini akan memiliki ketahanan yang sangat tinggi terhadap suhu ekstrem dan aus (Ohring, 2001).

Berikut beberapa keunggulan teknik *evaporation*.

- a. Mampu menghasilkan lapisan tipis dengan kemurnian tinggi.
- b. Proses dalam vakum mencegah kontaminasi, menghasilkan lapisan berkualitas tinggi.
- c. Cocok untuk material dengan berbagai titik leleh.

3. *Ion Plating*

Ion Plating menggabungkan penguapan material pelapis dan ionisasi. Material yang diuapkan diionisasi sebelum mencapai substrat, yang diberi bias negatif untuk menarik ion ke permukaannya. Teknik ini menghasilkan lapisan dengan densitas tinggi dan adhesi yang kuat.

Arc Ion Plating (AIP) menggunakan busur listrik untuk menguapkan material pelapis. Ion-ion yang dihasilkan diarahkan ke substrat yang dibias negatif, membentuk lapisan yang sangat padat dan melekat kuat. Teknik ini sering digunakan untuk pelapisan nosel roket dengan material yang keras dan tahan aus seperti zirconium nitride (ZrN).

Beberapa keunggulan *Ion Plating*.

- a. Lapisan yang dihasilkan memiliki densitas tinggi dan adhesi yang superior.
- b. Proses dapat dilakukan pada suhu yang lebih rendah, mengurangi potensi kerusakan pada substrat.
- c. Meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus lapisan.

4. Pulsed Laser Deposition (PLD)

Pulsed Laser Deposition menggunakan pulsa laser intensitas tinggi untuk menguapkan material target (Mattox, 2010). Material yang diuapkan kemudian mengembun pada substrat, membentuk lapisan tipis yang presisi.

Beberapa keunggulan PLD adalah sebagai berikut.

- a. Mampu menghasilkan lapisan dengan komposisi yang sangat mirip dengan material target.
- b. Cocok untuk material kompleks dan multi-elemen, seperti pelapis superkonduktor atau material keramik khusus.
- c. Ideal untuk aplikasi yang membutuhkan lapisan tipis dan seragam, seperti komponen nosel roket yang memerlukan kontrol presisi tinggi terhadap ketebalan lapisan.

5. Cathodic Arc Deposition

Cathodic Arc Deposition melibatkan penguapan material target menggunakan busur listrik berenergi tinggi, menghasilkan plasma ionik yang kemudian diarahkan ke substrat untuk membentuk lapisan tipis.

Beberapa keunggulan *Cathodic Arc Deposition* adalah sebagai berikut.

- a. Menghasilkan lapisan dengan densitas tinggi dan adhesi yang sangat baik.
- b. Prosesnya cepat dan efisien, cocok untuk produksi massal.
- c. Ideal untuk pelapisan alat-alat pemotong, komponen mesin, dan aplikasi dekoratif.

Aplikasi PVD *Coating* pada nosel roket beberapa memiliki beberapa aplikasi utama, yaitu sebagai berikut.

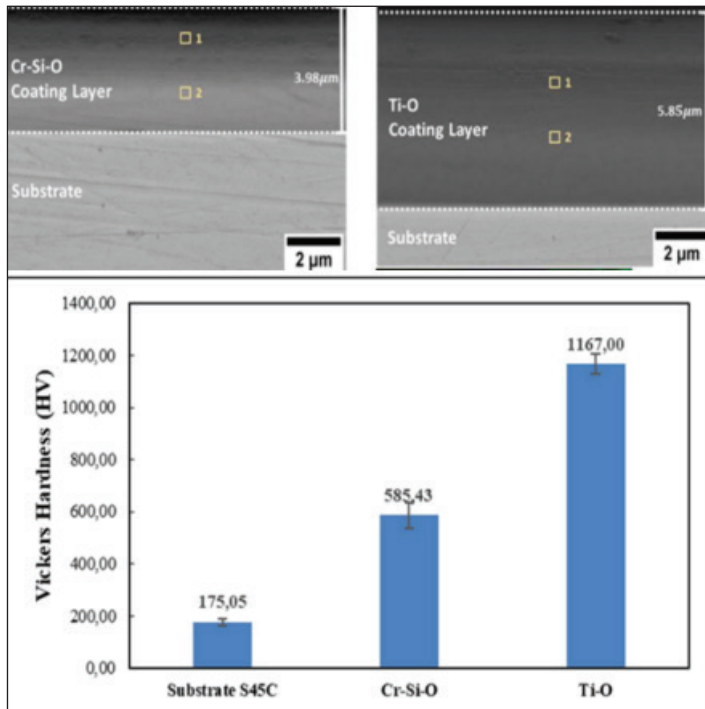
- a. Ketahanan panas: PVD digunakan untuk melapisi nosel roket dengan material yang mampu menahan suhu sangat tinggi, seperti nitrida logam (TiN, CrN) dan keramik (Al_2O_3 , ZrO_2). Lapisan ini membantu nosel roket bertahan lebih lama dalam kondisi pembakaran yang ekstrem.
- b. Ketahanan korosi dan oksidasi: Nosel roket terpapar pada lingkungan yang sangat reaktif selama operasi. Pelapisan dengan material seperti titanium alumina (TiAlN) atau zirconium nitride (ZrN) memberikan perlindungan tambahan terhadap oksidasi dan korosi.
- c. Peningkatan kekerasan dan ketahanan aus: Lapisan PVD meningkatkan kekerasan permukaan nosel, mengurangi keausan selama operasi dan meningkatkan umur pakai nosel. Ini sangat penting untuk memastikan bahwa nosel dapat menahan erosi dari gas panas dan partikel padat yang dihasilkan selama pembakaran bahan bakar roket.

Keunggulan PVD Coating untuk Nosel Roket meliputi :

- a. Ketahanan termal: Pelapisan PVD mampu menahan suhu ekstrem, yang sangat penting untuk nosel roket yang terpapar suhu tinggi selama operasi.
- b. Adhesi yang kuat: Teknik PVD menghasilkan lapisan yang sangat melekat pada substrat, memastikan integritas struktural dan performa optimal nosel roket.
- c. Lapisan tipis dan seragam: PVD memungkinkan deposisi lapisan yang sangat tipis dan seragam, mengoptimalkan berat dan performa nosel.
- d. Proses yang ramah lingkungan: PVD adalah metode pelapisan yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan teknik pelapisan lainnya karena tidak menggunakan bahan kimia berbahaya.

- e. Versatilitas material: Berbagai material dapat digunakan untuk pelapisan PVD, memungkinkan kustomisasi lapisan sesuai kebutuhan spesifik nosel roket.

Adapun teknik pelapisan PVD yang telah berhasil diaplikasikan pada nosel roket pada saat ini yaitu menggunakan bahan berbasis Cr-Si-O dan Ti-O. Dari hasil pelapisan tersebut diketahui bahwa nilai kekerasan dan lapisan Cr-Si-O dan Ti-O meningkat dan lapisan yang terbentuk sangat homogen (Muslimin et al., 2024). Berikut morfologi lapisan Cr-Si-O dan Ti-O hasil pelapisan PVD berserta nilai kekerasan yang dimiliki.



Sumber: Muslimin et al., (2024)

Gambar 8.5 Morfologi ketebalan lapisan Cr-Si-O ,Ti-O dan hasil pengukuran kekerasan lapisan

Dari proses pelapisan PVD yang telah dilakukan pada permukaan nosel roket tersebut dapat diketahui dengan menggunakan teknik PVD, nosel roket dapat memperoleh pelapisan yang sangat tahan terhadap kondisi operasional yang ekstrem, meningkatkan kinerja, dan masa pakai. Teknik ini memungkinkan kontrol yang sangat baik atas sifat lapisan, menjadikannya ideal untuk aplikasi yang memerlukan presisi tinggi dan ketahanan luar biasa.

D. Teknik Pelapisan *Chemical Vapor Deposition* (CVD) pada Substrat Nosel Roket

Chemical Vapor Deposition (CVD) adalah teknik pelapisan yang melibatkan reaksi kimia gas prekursor pada permukaan substrat untuk membentuk lapisan tipis material. Proses ini dilakukan dalam lingkungan terkontrol pada suhu tinggi, memungkinkan deposisi material yang seragam dan memiliki ikatan kuat dengan substrat (Carlsson & Martin, 2010). Secara umum proses pelapisan substrat nosel roket dengan teknik CVD diawali dengan membersihkan substrat nosel roket yang biasanya terbuat dari logam atau keramik untuk menghilangkan kontaminan dan memastikan adhesi lapisan yang baik. Kemudian dilanjutkan dengan pengisian gas prekursor yang mengandung bahan pelapis diintroduksi ke dalam reaktor CVD. Contoh gas prekursor termasuk silan (SiH_4) untuk pelapisan silikon karbida (SiC) atau titanium tetrachloride (TiCl_4) untuk pelapisan titanium nitrida (TiN). Proses selanjutnya yaitu pemanasan reaktor hingga suhu tinggi, biasanya antara 500°C hingga 1000°C , tergantung pada material pelapis dan substrat. Pada akhirnya gas prekursor terurai atau bereaksi secara kimia di permukaan substrat, membentuk lapisan padat dari material pelapis (Pierson, 1999). Dalam CVD terdapat beberapa bahan umum yang digunakan untuk pelapis nosel roket seperti karbon (C) yang digunakan untuk pelapisan nosel yang memerlukan ketahanan termal tinggi, silikon karbida (SiC) yang digunakan untuk memberikan ketahanan aus dan korosi yang baik, tungsten yang (W) digunakan untuk meningkatkan kekuatan mekanis pada suhu tinggi, serta titanium nitrida (TiN) yang digunakan untuk

memberikan kekerasan tinggi dan ketahanan terhadap oksidasi. Dengan teknik CVD, nosel roket dapat memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap kondisi operasional ekstrem, memperpanjang masa pakai, dan meningkatkan efisiensi roket secara keseluruhan.

Berikut adalah penjelasan mendalam mengenai berbagai teknik CVD *coating* yang digunakan untuk nosel roket, meliputi prinsip kerja, aplikasi, dan keunggulannya.

1. *Thermal CVD*

Thermal CVD adalah salah satu metode CVD yang paling umum, ketika prekursor gas diuraikan secara termal pada permukaan substrat yang dipanaskan untuk membentuk lapisan tipis. Prosesnya dengan menggunakan prekursor gas yang dimasukkan ke dalam reaktor yang mengandung substrat nosel roket. Suhu substrat dinaikkan hingga suhu yang cukup untuk menguraikan prekursor gas, yang kemudian bereaksi dan membentuk lapisan padat pada permukaan nosel. Aplikasi dari *thermal CVD* digunakan untuk menghasilkan lapisan keramik seperti silikon karbida (SiC) dan silikon nitrida (Si_3N_4), yang memiliki ketahanan tinggi terhadap oksidasi dan korosi pada suhu tinggi. Pelapisan ini sangat penting untuk nosel roket yang beroperasi dalam lingkungan pembakaran yang ekstrem (Pawłowski, 2018).

Berikut beberapa keunggulan *Thermal CVD*.

- a. Dapat menghasilkan lapisan yang sangat murni dan seragam.
- b. Prosesnya relatif sederhana dan dapat diterapkan pada skala industri.
- c. Mampu melapisi permukaan kompleks dan geometri yang sulit dijangkau.

2. *Plasma Enhanced CVD (PECVD)*

Plasma Enhanced CVD menggunakan plasma untuk meningkatkan reaktivitas prekursor gas, memungkinkan deposisi lapisan pada suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan *thermal CVD*. Prosesnya menggunakan prekursor gas diionisasi dalam plasma sebelum mencapai substrat. Plasma memberikan energi tambahan yang diperlukan

untuk memecah prekursor gas, memungkinkan deposisi pada suhu substrat yang lebih rendah. Aplikasi dari PECVD yaitu untuk melapisi nosel roket dengan material seperti *diamond-like carbon* (DLC) dan titanium nitrida (TiN). Lapisan ini memberikan ketahanan aus yang tinggi dan mengurangi gesekan, yang penting untuk meningkatkan efisiensi dan umur pakai nosel roket (Hitchman & Jensen, 1993).

Berikut beberapa keunggulan PECVD.

- a. Deposisi pada suhu yang lebih rendah mengurangi risiko deformasi substrat.
- b. Mampu menghasilkan lapisan dengan sifat khusus, seperti kekerasan tinggi dan ketahanan aus.
- c. Prosesnya fleksibel dan dapat disesuaikan untuk berbagai material pelapis.

3. *Low Pressure CVD (LPCVD)*

Low Pressure CVD dilakukan pada tekanan yang lebih rendah daripada atmosfer untuk meningkatkan homogenitas dan kualitas lapisan. Prosesnya menggunakan prekursor gas yang diintroduksi ke dalam reaktor pada tekanan rendah. Penurunan tekanan meningkatkan *mean free path* molekul gas, yang meningkatkan distribusi dan reaktivitas prekursor di seluruh permukaan substrat (Seshan, 2002). Aplikasi dari LPCVD yaitu sering digunakan untuk melapisi nosel roket dengan material tahan panas seperti tungsten (W) dan molybdenum (Mo). Lapisan ini memberikan ketahanan yang sangat baik terhadap erosi dan oksidasi pada suhu tinggi.

Berikut ini beberapa keunggulan LPCVD.

- a. Menghasilkan lapisan yang sangat seragam dan bebas dari *voids*.
- b. Memungkinkan kontrol yang lebih baik terhadap ketebalan dan komposisi lapisan.
- c. Dapat melapisi substrat dengan geometri yang kompleks.

4. *Metal-Organic CVD (MOCVD)*

Metal-Organic CVD menggunakan senyawa organologam sebagai prekursor untuk deposisi lapisan. Prosesnya dengan menggunakan prekursor metal-organik yang diuapkan dan diintroduksi ke dalam reaktor CVD, kemudian mereka terdekomposisi pada substrat yang dipanaskan untuk membentuk lapisan logam atau senyawa logam. Aplikasi dari MOCVD digunakan untuk melapisi nosel roket dengan material seperti alumina (Al_2O_3) dan yttria-stabilized zirconia (YSZ). Lapisan ini menawarkan ketahanan termal yang sangat tinggi dan stabilitas kimia, yang penting untuk aplikasi dalam lingkungan suhu tinggi dan reaktif (Pawłowski, 2018).

Berikut ini beberapa keunggulan MOCVD.

- a. Dapat digunakan untuk melapisi material yang sulit deposisi dengan metode lain.
- b. Memungkinkan deposisi lapisan multi-elemen dan komposit.
- c. Fleksibel dalam hal pemilihan prekursor dan kondisi proses.

5. *Atomic Layer Deposition (ALD)*

Atomic Layer Deposition adalah teknik CVD yang sangat presisi, tempat lapisan terbentuk satu atom pada satu waktu melalui siklus reaksi. Proses pelapisan ALD melibatkan pengenalan bergantian dari prekursor gas dan reaktan ke dalam reaktor. Setiap siklus deposisi menghasilkan lapisan atomik yang sangat tipis dan seragam. Aplikasi ALD digunakan untuk melapisi nosel roket dengan material seperti hafnium nitrida (HfN) dan tantalum karbida (TaC). Lapisan ini menawarkan ketahanan yang luar biasa terhadap suhu tinggi dan korosi (Hitchman & Jensen, 1993).

Berikut ini beberapa keunggulan ALD.

- a. Menghasilkan lapisan dengan ketebalan yang sangat terkontrol dan seragam.
- b. Dapat melapisi substrat dengan geometri yang sangat kompleks, termasuk pori-pori dan celah kecil.

- c. Ideal untuk aplikasi yang memerlukan presisi tinggi dan lapisan tipis.

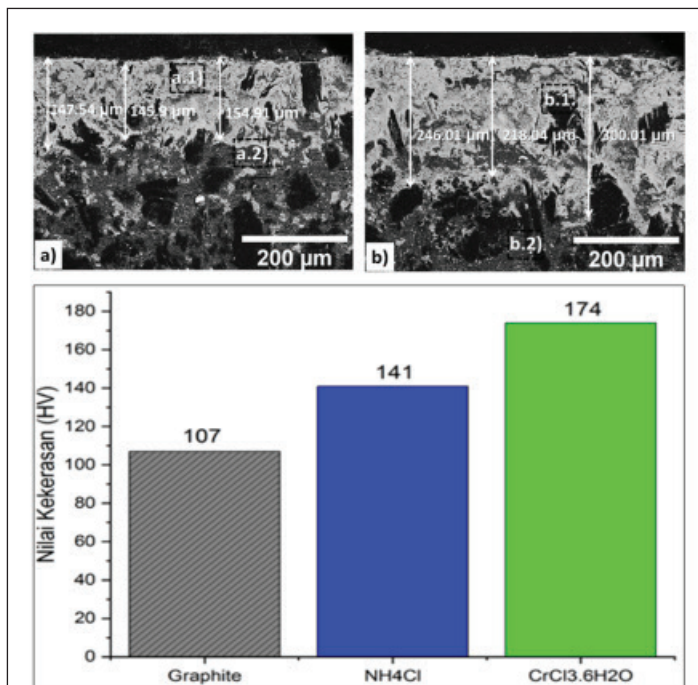
Aplikasi CVD *coating* pada nosel roket memiliki berbagai aplikasi penting, termasuk ketahanan terhadap suhu ekstrem yaitu nosel roket harus menahan suhu yang sangat tinggi selama operasi. Lapisan CVD seperti silikon karbida (SiC) dan tungsten (W) memberikan perlindungan termal yang diperlukan. Ketahanan terhadap erosi dan aus yaitu gas panas dan partikel padat yang dihasilkan selama pembakaran dapat menyebabkan erosi pada nosel roket. Pelapisan dengan material seperti *diamond-like carbon* (DLC) dan titanium nitrida (TiN) meningkatkan ketahanan terhadap erosi dan aus. Ketahanan terhadap oksidasi dan korosi yaitu nosel roket beroperasi dalam lingkungan yang sangat reaktif. Lapisan CVD seperti alumina (Al_2O_3) dan yttria-stabilized zirconia (YSZ) memberikan perlindungan terhadap oksidasi dan korosi, memperpanjang umur pakai nosel.

Berikut beberapa keunggulan CVD *Coating* untuk nosel roket

- a. Ketahanan termal: Teknik CVD mampu menghasilkan lapisan yang tahan terhadap suhu ekstrem, penting untuk operasi nosel roket yang intens.
- b. Ketahanan mekanis: Lapisan CVD memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang tinggi, mengurangi erosi dan kerusakan mekanis pada nosel.
- c. Lapisan seragam dan bebas cacat (*defect*): CVD menghasilkan lapisan yang sangat seragam dan bebas dari *voids*, memastikan kinerja optimal.
- d. Fleksibilitas material: CVD memungkinkan deposisi berbagai material dengan sifat yang dapat disesuaikan sesuai kebutuhan aplikasi spesifik.
- e. Proses yang terukur: CVD dapat diterapkan pada skala industri, memungkinkan produksi massal dengan konsistensi tinggi.

Adapun teknik CVD konvensional yang telah dilakukan di Pusat Teknologi Roket BRIN yaitu CVD dengan menggunakan teknik *pack-cementation*. Proses pelapisan dilakukan untuk membentuk lapisan silikon karbida (SiC) protektif pada permukaan grafit nosel roket. Dari pelapisan yang dilakukan diperoleh lapisan SiC terbentuk pada permukaan grafit dan mengisi seluruh permukaan poros substrat grafit. Nilai kekerasan permukaan grafit juga mengalami peningkatan setelah terbentuknya lapisan SiC pada permukaan grafit. Berikut morfologi lapisan SiC dan hasil pengujian kekerasan SiC dengan menggunakan *packcementation activator* yang berbeda.

Keramik silikon karbida (SiC) telah terbukti efektif sebagai lapisan pelindung komposit karbon/karbon terhadap oksidasi dan keausan karena stabilitas kimianya yang luar biasa, kinerja tribologis yang



Keterangan: a) $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; b) NH_4Cl dan hasil pengukuran kekerasan lapisan

Gambar 8.6 Morfologi ketebalan lapisan SiC dengan aktivator

sangat baik, dan kinerja yang baik. SiC menciptakan kompatibilitas secara fisika dan kimia dengan substrat karbon. Terlebih lagi, SiC juga memiliki kekerasan dan stabilitas termal yang tinggi, yang dapat membawa manfaat tambahan yaitu memberikan peningkatan ketahanan terhadap erosi (Panakarajupally et al., 2021).

Dengan memanfaatkan teknik CVD, nosel roket dapat dilapisi dengan material yang meningkatkan daya tahan, kinerja, dan efisiensi, memastikan bahwa komponen ini dapat bertahan dan berfungsi optimal dalam kondisi operasional yang sangat menantang.

E. Teknik Pelapisan *Thermal Spray* pada Substrat Nosel Roket

Thermal spray adalah salah satu teknik pelapisan yang digunakan untuk meningkatkan kinerja dan daya tahan nosel roket. Teknik ini melibatkan peleburan material pelapis dan penyemprotan material tersebut pada permukaan substrat nosel roket, yang membentuk lapisan pelindung yang kuat dan tahan terhadap kondisi ekstrem. Prinsip dasar proses pelapisan dari teknik *thermal spray* yaitu dimulai dari pembersihan substrat yang dilanjutkan dengan penyemprotan material pelapis yang telah mencair ke permukaan substrat.

Berbagai teknik *thermal spray* dapat digunakan, tergantung pada jenis material pelapis dan aplikasi spesifik. Beberapa teknik utamanya adalah sebagai berikut.

1. *Flame Spray*

Prinsip dasar dari *flame spray* yaitu menggunakan nyala api untuk melelehkan material pelapis. Material yang meleleh kemudian disemprotkan pada substrat menggunakan gas pembawa. Proses pelapisan dengan melakukan campuran gas bahan bakar dan oksigen dibakar untuk menghasilkan nyala api yang cukup panas untuk melelehkan partikel serbuk atau kawat pelapis. Partikel meleleh ini kemudian disemprotkan ke substrat nosel roket. Aplikasi dari *flame spray* digunakan untuk melapisi nosel roket dengan material seperti aluminium dan molybdenum. Lapisan ini memberikan perlindungan

terhadap oksidasi dan korosi, serta meningkatkan ketahanan termal (Pawłowski, 2018).

Berikut beberapa keunggulan *Flame Spray*.

- a. Proses yang lebih sederhana dan biaya peralatan yang lebih rendah dibandingkan teknik lain.
- b. Dapat digunakan untuk melapisi area yang luas dengan cepat.
- c. Fleksibilitas dalam penggunaan berbagai jenis material pelapis.

2. Arc Spray

Prinsip dasar *arc spray* yaitu menggunakan busur listrik untuk melelehkan kawat logam, yang kemudian disemprotkan pada substrat. Proses pelapisannya meliputi persiapan dari beberapa hal berikut.

- a. Kawat: Dua kawat logam (biasanya dari bahan pelapis yang diinginkan) ditempatkan sebagai elektroda.
- b. Pembentukan busur: Arus listrik diterapkan melalui kawat, menciptakan busur listrik yang melelehkan ujung kawat.
- c. Pengiriman partikel: Gas pembawa menyemprotkan partikel logam cair ke substrat, membentuk lapisan pelapis yang padat dan seragam.

Aplikasi *arc spray* pada nosel roket yaitu *arc spray* digunakan untuk melapisi nosel roket dengan berbagai material yang meningkatkan ketahanan terhadap suhu tinggi, korosi, dan erosi.

Berikut adalah beberapa aplikasi spesifik dari *arc spray*.

- a. Ketahanan termal dan oksidasi: Material seperti aluminium dan molybdenum digunakan untuk memberikan lapisan pelindung yang tahan terhadap oksidasi pada suhu tinggi.
- b. Ketahanan erosi dan korosi: Pelapisan dengan bahan seperti stainless steel dan nikel digunakan untuk meningkatkan ketahanan erosi dan korosi, yang sangat penting dalam lingkungan agresif selama pembakaran roket.

Berikut beberapa keunggulan *Arc Spray*..

- a. Efisiensi proses: Arc spray memiliki laju deposisi yang tinggi, memungkinkan pelapisan cepat dan efisien pada area yang luas.
- b. Fleksibilitas material: Berbagai material logam dan paduan dapat digunakan sebagai kawat pelapis, memungkinkan penyesuaian sifat lapisan sesuai kebutuhan aplikasi spesifik.
- c. Biaya relatif rendah: Peralatan dan bahan habis pakai untuk arc spray relatif lebih murah dibandingkan dengan beberapa teknik thermal spray lainnya, seperti HVOF atau plasma spray.
- d. Lapisan seragam dan adhesi baik: Arc spray menghasilkan lapisan yang seragam dengan adhesi yang baik pada substrat, meningkatkan kinerja dan daya tahan nosel.

3. *Plasma Spray*

Prinsip dasar *plasma spray* yaitu menggunakan plasma (gas ionisasi tinggi) untuk melelehkan material pelapis. Material yang meleleh kemudian disemprotkan pada substrat.

Keunggulan teknik ini yaitu dapat digunakan untuk material dengan titik leleh tinggi seperti keramik. Proses *plasma spray* menggunakan gas seperti argon, hidrogen, atau nitrogen diionisasi dalam obor plasma, menciptakan plasma berenergi tinggi yang dapat melelehkan partikel serbuk. Partikel meleleh ini kemudian disemprotkan ke permukaan nosel roket untuk membentuk lapisan pelindung. Aplikasi dari *plasma spray* digunakan untuk melapisi nosel roket dengan material keramik seperti zirconia (ZrO_2) yang distabilkan dengan yttria (YSZ). Lapisan ini memberikan ketahanan tinggi terhadap suhu dan korosi, serta isolasi termal yang sangat baik.

Berikut beberapa keunggulan *plasma spray*.

- a. Mampu melapisi material dengan titik leleh tinggi.
- b. Menyediakan ketebalan lapisan yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan.
- c. Menghasilkan lapisan yang padat dan tahan lama.

4. *High-Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Spray*

Prinsip dasar teknik ini yaitu menggunakan campuran gas bahan bakar dan oksigen yang dibakar untuk menghasilkan jet gas berkecepatan tinggi yang melelehkan dan menyemprotkan material pelapis. Keunggulan teknik ini adalah dapat menghasilkan lapisan dengan kepadatan tinggi dan adhesi yang sangat baik. Proses dari HVOF yaitu gas bahan bakar (seperti propana atau hidrogen) dan oksigen dicampur dan dibakar dalam ruang pembakaran untuk menghasilkan gas berkecepatan tinggi. Partikel serbuk pelapis dimasukkan ke dalam aliran gas ini, meleleh, dan disemprotkan ke substrat dengan kecepatan tinggi. Aplikasi dari HVOF digunakan untuk melapisi nosel roket dengan material logam dan paduan seperti tungsten *carbide-cobalt* (WC-Co) dan *chromium carbide-nickel chromium* (Cr₃C₂-NiCr). Lapisan ini memberikan ketahanan aus dan erosi yang sangat baik, serta ketahanan terhadap oksidasi pada suhu tinggi (Pawłowski, 2018).

Berikut beberapa keunggulan HVOF *Spray*.

- a. Menghasilkan lapisan dengan densitas tinggi dan porositas rendah.
- b. Meningkatkan adhesi lapisan pada substrat.
- c. Menghasilkan lapisan yang sangat keras dan tahan aus.

5. *Cold Spray*

Cold Spray adalah teknik *thermal spray* yang unik karena menggunakan gas berkecepatan tinggi pada suhu rendah untuk mendepositkan partikel pelapis tanpa melelehkannya. Prosesnya meliputi pemberian gas bertekanan tinggi (biasanya helium atau nitrogen) dipercepat melalui nozel untuk menciptakan aliran gas berkecepatan tinggi. Partikel serbuk pelapis diinjeksi ke dalam aliran gas ini dan didepositkan pada substrat nosel roket melalui deformasi plastis. Aplikasi dari *cold spray* digunakan untuk melapisi nosel roket dengan material seperti aluminium, tembaga, dan titanium. Lapisan ini memberikan ketahanan terhadap oksidasi dan korosi, serta mempertahankan sifat mekanis asli material pelapis karena tidak terjadi perubahan fase akibat panas (Pawłowski, 2018).

Berikut beberapa keunggulan *cold spray*.

- a. Menghasilkan lapisan dengan sifat mekanis yang mirip dengan material bulk.
- b. Tidak ada perubahan fase termal, mengurangi risiko oksidasi dan keretakan.
- c. Proses yang cepat dan efisien dengan kontrol ketebalan yang baik.

6. *Detonation Gun Spray*

Detonation Gun Spray menggunakan ledakan gas terkontrol untuk menghasilkan aliran gas berkecepatan tinggi yang melelehkan dan menyemprotkan partikel pelapis. Prosesnya menggunakan campuran gas bahan bakar dan oksigen diledakkan secara berulang dalam ruang ledakan. Ledakan ini menciptakan gelombang kejut yang mempercepat dan melelehkan partikel serbuk pelapis, yang kemudian disemprotkan ke substrat nosel roket. Aplikasi dari *detonation gun spray* digunakan untuk melapisi nosel roket dengan material seperti tungsten karbida (WC) dan alumina (Al_2O_3). Lapisan ini memberikan ketahanan yang sangat baik terhadap abrasi dan erosi (Pawłowski, 2018).

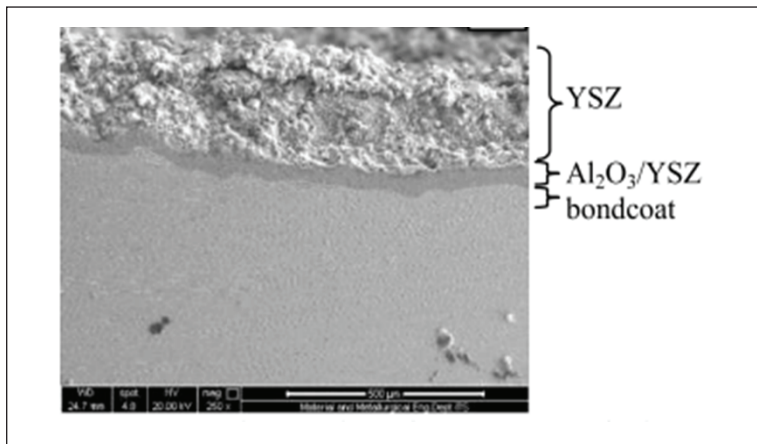
Berikut beberapa keunggulan *detonation gun spray*.

- a. Menghasilkan lapisan yang sangat padat dan keras.
- b. Meningkatkan ketahanan aus dan umur pakai komponen.
- c. Dapat digunakan untuk material dengan titik leleh tinggi.

Keunggulan *thermal spray* untuk nosel roket lapisan yang dihasilkan oleh *thermal spray* dapat menahan suhu tinggi yang dialami oleh nosel roket selama pembakaran bahan bakar. Penggunaan material seperti zirconia (ZrO_2) yang distabilisasi yttria (YSZ) dalam *plasma spray* memberikan isolasi termal yang sangat baik. Lapisan hasil *thermal spray* dapat meningkatkan kekuatan mekanis nosel, memungkinkan mereka menahan tekanan tinggi dan gaya erosi selama peluncuran dan penerbangan. Kemudian teknik seperti HVOF dapat menghasilkan lapisan yang tahan terhadap erosi dan oksidasi,

memperpanjang masa pakai nozel. Pelapisan dengan karbida, seperti tungsten karbida (WC), memberikan ketahanan aus yang sangat baik. Selanjutnya lapisan *thermal spray* memiliki adhesi yang kuat pada substrat, mengurangi risiko delaminasi atau pengelupasan selama operasi. *Thermal spray* memungkinkan penggunaan berbagai jenis material pelapis, termasuk logam, keramik, dan komposit, sehingga dapat disesuaikan dengan kebutuhan spesifik aplikasi nosel roket.

Teknik *thermal spray* sangat banyak dilakukan, karena proses dan efisiensi daya yang digunakan juga tidak terlalu banyak. Di Pusat Teknologi Roket BRIN beberapa teknik *thermal spray* yang pernah dilakukan yaitu salah satunya penggunaan teknik HVOF dengan menggunakan bahan pelapis berbasis keramik komposit $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$. Dari proses pelapisan yang dilakukan diperoleh lapisan komposit $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$ pada lapisan ikatan NiCrAlY membentuk lapisan keramik penghalang termal (TBC). Telah ditemukan bahwa lapisan komposit $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$ ini akan berpengaruh pada stabilitas termal dan struktur mikro sistem TBC karena memperlambat penetrasi oksigen ke dalam lapisan ikatan (Widyastuti et al., 2015). Berikut morfologi lapisan yang telah dikembangkan.



Sumber: Widyastuti et al., (2015)

Gambar 8.7 Morfologi lapisan $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$ pada permukaan substrat dengan menggunakan teknik *thermal spray* HVOF

Dari penjelasan teknik pelapisan *thermal spray* tersebut dapat diketahui bahwa Dengan menggunakan teknologi thermal spray, nozel roket dapat dilapisi dengan material yang meningkatkan daya tahan dan kinerja, memungkinkan roket beroperasi dengan efisien dalam kondisi ekstrem.

F. Penutup

Hingga saat ini Indonesia telah dan masih akan terus melakukan pengembangan teknologi pelapisan pada nozel roket guna meningkatkan kemajuan teknologi pada bidang antariksa dan kedirgantaraan. Pelapisan merupakan elemen penting dalam konstruksi roket, terutama untuk nozel, yang merupakan komponen krusial dalam sistem propulsi. Nozel roket harus menahan suhu dan tekanan yang sangat tinggi selama operasi. Oleh karena itu, teknik pelapisan yang tepat sangat diperlukan untuk meningkatkan daya tahan dan efisiensi roket. Seperti yang dijelaskan pada subbab sebelumnya, teknik pelapisan yang telah digunakan di Pusat Riset Teknologi Roket BRIN adalah *thermal spray*, CVD, dan PVD. *Thermal spray* adalah teknik pelapisan ketika partikel-partikel material pelapis dipanaskan hingga meleleh atau hampir meleleh, kemudian disemprotkan ke substrat dengan kecepatan tinggi. Teknik ini termasuk beberapa metode, seperti *flame spray*, *plasma spray*, *HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) spray*, *arc spray*, dan *cold spray*. *Thermal spray* digunakan untuk menghasilkan lapisan yang tahan terhadap suhu tinggi dan abrasi. Keunggulan *thermal spray* di antaranya antara lain mampu menahan suhu sangat tinggi; bisa menghasilkan lapisan yang tebal; serta dapat digunakan untuk berbagai jenis material pelapis. Selanjutnya Chemical Vapor Deposition (CVD) yang merupakan proses ketika gas prekursor kimia diuraikan pada permukaan substrat yang dipanaskan untuk membentuk lapisan material yang diinginkan. Proses ini dilakukan dalam lingkungan terkontrol dengan suhu tinggi. Keunggulan CVD antara lain lapisan yang dihasilkan dapat menahan suhu ekstrem; lapisan memiliki kekuatan mekanis tinggi; serta mampu menghasilkan lapisan yang sangat beragam. Kemudian *Physical Vapor Deposition*

(PVD) melibatkan penguapan material pelapis dan deposisinya ke substrat dalam bentuk uap. Metode ini mencakup *sputtering* dan evaporasi. Keunggulan PVD yaitu mampu menghasilkan lapisan tipis dengan ketahanan tinggi; dapat digunakan untuk logam, keramik, dan komposit; serta parameter proses dapat disesuaikan untuk mengontrol sifat lapisan.

Tantangan dalam pengembangan teknologi pelapisan di Indonesia mencakup beberapa aspek seperti :

1. Keterbatasan teknologi dan sumber daya

Pengembangan teknologi pelapisan yang canggih memerlukan peralatan dan sumber daya yang mahal. Indonesia menghadapi tantangan dalam hal ini, karena banyak peralatan pelapisan canggih masih diimpor.

2. Keterbatasan pengetahuan dan keahlian

Pendidikan dan pelatihan yang memadai dalam bidang material sains dan teknologi pelapisan masih diperlukan. Meskipun sudah ada upaya untuk meningkatkan hal ini, masih diperlukan lebih banyak program pendidikan dan pelatihan yang fokus pada teknologi pelapisan canggih.

3. Kolaborasi internasional

Kolaborasi dengan negara-negara maju yang memiliki teknologi pelapisan canggih sangat penting. Indonesia perlu memperluas jaringan dan bekerja sama dengan institusi internasional untuk mengakses teknologi terbaru dan meningkatkan kemampuan domestik.

Untuk menanggulangi tantangan tersebut terdapat beberapa langkah yang dapat dilakukan yaitu (Rafikasari, 2021):

1. Investasi dalam penelitian dan pengembangan

Pemerintah dan sektor swasta perlu meningkatkan investasi dalam penelitian dan pengembangan teknologi pelapisan. Ini termasuk mendanai proyek-proyek inovatif yang fokus pada pengembangan material baru dan teknik pelapisan yang lebih efisien.

2. Peningkatan pendidikan dan pelatihan

Meningkatkan pendidikan dan pelatihan di bidang material sains dan teknologi pelapisan sangat penting. Ini dapat dilakukan melalui kerja sama dengan universitas dan lembaga penelitian, serta dengan menawarkan beasiswa dan program pelatihan khusus.

3. Memperkuat kolaborasi internasional

Indonesia harus terus memperkuat kolaborasi internasional dengan negara-negara yang memiliki teknologi pelapisan canggih. Ini dapat dilakukan melalui kemitraan riset, pertukaran peneliti, dan program pelatihan bersama.

4. Pengembangan industri dalam negeri

Mendorong pengembangan industri dalam negeri yang mampu memproduksi dan menerapkan teknologi pelapisan canggih juga sangat penting. Ini termasuk mendukung perusahaan lokal yang bergerak di bidang manufaktur dan teknologi material.

Pengembangan teknologi pelapisan untuk nosel roket di Indonesia masih dalam tahap awal, tetapi telah menunjukkan kemajuan yang signifikan. Dengan upaya yang berkelanjutan dalam penelitian dan pengembangan, peningkatan pendidikan dan pelatihan, serta kolaborasi internasional, Indonesia dapat mencapai kemajuan lebih lanjut dalam teknologi pelapisan. Ini akan membantu memperkuat kemampuan negara dalam pengembangan roket dan teknologi antariksa, mendukung ambisi Indonesia untuk menjadi pemain utama dalam industri kedirgantaraan global.

Daftar Pustaka

- Biederman, H., Kudrna, P., & Slavinska, D. (2004). Hard plasma polymers, composites and plasma polymer films prepared by rf sputtering of conventional polymers. *Plasma Polymer Films*, 289–324.
- Bintoro, A. (2013). *Desain Konfigurasi Roket Padat* (Sutrisno & G. Prabowo (eds.); I). Indonesia Book Project (IBP).

- Carlsson, J.-O., & Martin, P. M. (2010). Chemical vapor deposition. In *Handbook of Deposition Technologies for films and coatings*, 314–363. Elsevier.
- Handoyo, B. H. C. (2016). Peraturan Perundang-Undangan implementasi UU No. 21 Tahun 2013 Tentang Keantariksaan yang diprioritaskan untuk disusun. *Prosiding Seminar Nasional 2016 Pengembangan Kebijakan Dan Regulasi Penerbangan dan Antariksa: Problema Dan Tantangan*, 33–37.
- Hitchman, M. L., & Jensen, K. F. (1993). *Chemical vapor deposition: principles and applications*. Academic Press.
- Kelly, P. J., & Arnell, R. D. (2000). *Magnetron sputtering : a review of recent developments and applications*. 56, 159–172.
- Mariani, L. (2021). *Laporan Akuntabilitas Kinerja PUSTEKROKET 2020*. LAPAN.
- Mattox, D. M. (2010). *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. William Andrew.
- Muslimin, A. N., Sugiarti, E., Asshidiqi, Z., Budiman, Y., Setiadi, & Wicaksono, B. (2024). Structural and mechanical properties of Cr-Si-O and Ti-O thin coatings deposited by Arc-PVD coating. *5th International Seminar on Metallurgy and Materials (ISMM2022)*, 020099. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/5.0187054>
- Ohring, M. (2001). *Materials science of thin films: depositon and structure*. Elsevier.
- Panakarajupally, R. P., Mirza, F., El Rassi, J., Morscher, G. N., Abdi, F., & Choi, S. (2021). Solid particle erosion behavior of melt-infiltrated SiC/SiC ceramic matrix composites (CMCs) in a simulated turbine engine environment. *Composites Part B: Engineering*, 216(January), 108860. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108860>
- Pawłowski, L. (2018). Fundamentals of oxide manufacturing. *Industrial Chemistry of Oxides for Emerging Applications*, 25.
- Pierson, H. O. (1999). *Handbook of chemical vapor deposition: principles, technology and applications*. William Andrew.
- Rafikasari, A. (2021). *Strategi Diplomasi Pertahanan Indonesia Melalui Kerja Sama Keantariksaan dalam Era*. 27–41. <https://doi.org/10.30536/jkkpa.v2n1.2>
- Seshan, K. (2002). *Handbook of thin film deposition techniques principles, methods, equipment and applications, second editon*. CRC Press.

- Setiadi, Wicaksono, B., Muzayadah, N. L., Wandono, F. A., & Nurtiasto, T. S. (2022). Investigation on the Mechanical Properties of the Post-Static Fire Testing Effect of Graphite Material used in the RX320 Rocket Motor Nozzle. *Journal of Physics: Conference Series*, 2243(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2243/1/012050>
- Sproul, W. D. (1996). Physical vapor deposition tool coatings. *Surface and Coatings Technology*, 81, 1–7.
- Sugondo, Langenati, R., Futichah, & Mujtahid. (2010). PELAPISAN NOSEL ROKET DENGAN BORON KARBIDA 50. *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, 6(1), 50–68.
- Sutrisno. (2019). *Laporan Akuntabilitas Kinerja Instansi Pemerintah Tahun 2019*. [https://kinerja.lapan.go.id/getfilepublic/public/LAKIN-98579424-Lakin Pustekroket 2019.pdf](https://kinerja.lapan.go.id/getfilepublic/public/LAKIN-98579424-Lakin%20Pustekroket%202019.pdf)
- Sutton, G. P., & Biblarz, O. (2011). *Rocket propulsion elements*. John Wiley & Sons.
- Vossen, J. L., & Kern, W. (1991). *Thin film processes II* (Vol. 2). Gulf Professional Publishing.
- Widyastuti, Parindra, K., Mariani, L., Ardhyanta, H., & Sulistijono. (2015). Analysis of YSZ-Al₂O₃/YSZ Flame Sprayed Thermal Barrier Coating to Thermal Resistance. *Advanced Materials Research*, 1112, 338–344. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1112.338>