

Kajian Thermal Spray Coating dengan Teknologi High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) serta Perlakuan Pasca Prosesnya sebagai Pelindung Boiler Tubes Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Muhamad Waldi^{*1}, Eddy Agus Basuki², Budi Prawara³, Erie Martides⁴, Endro Juniarto⁵

¹Teknik Metalurgi, Fakultas Teknologi Manufaktur, Universitas Jenderal Achmad Yani, Bandung, Indonesia

²Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

^{3,4}Pusat Riset Material Maju, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Bandung, Indonesia

⁵Pusat Riset Mekatronika Cerdas, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Bandung, Indonesia

Email: muhamad.waldi@lecture.ac.id¹

Abstrak

Seiring dengan kebijakan pemerintah Indonesia mengenai rencana elektrifikasi nasional dengan mengembangkan sarana pembangkit listrik berkapasitas 35.000 MW yang dimulai sejak tahun 2014, maka keperluan akan material yang tahan terhadap temperatur tinggi menjadi tuntutan penerapan, terlebih lagi material-material yang dikhususkan untuk peralatan teknis seperti ketel uap (boiler) sebagai pemasok uap untuk menggerakkan turbin Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Tantangan operasional material pada temperatur tinggi menjadi hal yang serius, terutama karena penggunaan bahan bakar batubara yang bermutu rendah pada sistem komposisi yang menimbulkan masalah degradasi pada permukaan pipa seperti erosi dan korosi sehingga membatasi umur pakai pipa. Berbagai teknologi pelapisan *Thermal Spray Coating* untuk operasional temperatur tinggi telah banyak dikembangkan dengan tujuan melindungi pipa-pipa boiler dari lingkungan agresif, meningkatkan efisiensi panas, dan mengurangi kehilangan waktu akibat kerusakan. Teknologi High Velocity Oxy Fuel (HVOF) merupakan satu diantara metode yang dapat direkomendasikan untuk dimanfaatkan sebagai pelindung pipa boiler di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Kajian berikut mendiskusikan *State of The Art* metode perlindungan pipa boiler menggunakan Thermal Spray Coating (TSC) dengan teknologi HVOF, metode-metode karakterisasi, serta perlakuan pasca prosesnya guna meningkatkan kehandalan lapisan pada saat pelayanan.

Kata kunci: *HVOF, Perlakuan Pasca Pelapisan, Pembangkit Listrik Tenaga Uap, Thermal Spray*

Abstract

In line with the Indonesian government's policy on national electrification plans by developing a 35,000 MW power generating facility which was started in 2014, the need for high temperature resistant materials becomes the demand for the application, moreover materials dedicated to engineering equipment such as boilers as a steam producer to drive the turbine in Coal-Fired Power Plant (PLTU). The operational challenge of materials at high temperatures becomes serious, especially as the use of low-quality coal as fuel in the combustion system creates degradation problems on tube surfaces such as erosion and corrosion thereby limiting boiler tube life. Thermal Spray Coating technologies for high temperature operations have been developed with the aim of protecting boiler tubes from aggressive environments, improving thermal efficiency, and reducing time losses from damage. High Velocity Oxy Fuel (HVOF) technology is one of the recommended methods to be used in boiler tubes at Coal-Fired Power Plant (PLTU). The following review discusses the State-of-The-Art method of boiler tubes protection using Thermal Spray Coating (TSC) with HVOF technology application, characterization methods, and its post-spray treatments to increase the reliability of the coatings during the services.

Keywords: *Coal-Fired Power Plant, HVOF, Post-Spray Treatment, Thermal Spray*

1. PENDAHULUAN

Laju pertumbuhan ekonomi masyarakat Indonesia serta pesatnya perkembangan teknologi yang multiguna untuk memfasilitasi kebutuhan rumah tangga dan industri dalam satu dekade terakhir menyebabkan kebutuhan listrik masyarakat semakin meningkat dari waktu ke waktu. Berdasarkan atas paparan Outlook Energi Indonesia 2014, Indonesia diprediksi akan mengalami lonjakan populasi semula di tahun 2015 yaitu sebanyak 255 Juta hingga 335 Juta jiwa di tahun 2050, jika dibandingkan dengan data rasio elektrifikasi di tahun 2016 yang tercatat sebanyak 91.35%. Walaupun tren kapasitas terpasang meningkat sebesar 4% per tahun sejak tahun 2011, namun belum dapat mengimbangi target ideal rasio elektrifikasi sebesar 100%. Namun demikian pembangunan sarana-sarana pembangkit listrik masih akan ditingkatkan hingga setidaknya satu dekade kedepan.

Saranan-sarana pembangkit listrik yang ada di Indonesia pada tahun 2015 tercatat memiliki kapasitas terpasang sebesar 55.528,10 MW yang diproduksi oleh beberapa jenis pembangkit listrik bertenaga uap (PLTU), gas (PLTG), uap dan gas (PLTGU), diesel (PLTD), air (PLTA), panas bumi (PLTP), bayu (PLT Bayu), solar / matahari (PLTS), dan *coal gassification* (PLTGB). Dimana jumlah pasokan listrik tertinggi dihasilkan oleh PLN sebesar 38.314,23 MW dan sisanya dipasok oleh pihak swasta atau dikenal juga dengan *Independent Power Producer* (IPP) sebesar 17.213,87 MW. Dari besarnya pasokan listrik tersebut, jumlah pasokan tertinggi diproduksi oleh tiga besar jenis pembangkit secara berurutan yaitu PLTU, PLTGU, dan PLTD, kemudian pembangkit-pembangkit lainnya seperti PLTA dan PLTG. Sehingga, untuk mengejar target elektrifikasi sebesar 100% masih dibutuhkan pasokan sebesar 35.000 MW.

Dengan masih diutamakannya PLTU untuk menunjang pasokan listrik di seluruh wilayah berdasarkan studi kelayakan yang dilakukan oleh (Prasetyo, 2015), dan (Muharom, 2015), ketersediaan batubara, serta pertimbangan efisiensi produksi listrik maka pengembangan PLTU masih menjadi solusi untuk mengakomodasi realisasi elektrifikasi sebesar 100%. Kendala signifikan yang ditemui pada pengoperasian PLTU ialah degradasi komponen pipa-pipa ketel uap (*boiler tubes*) di kondisi temperatur tinggi yang berkombinasi dengan kondisi lingkungan yang ekstrem sehingga terbentuk moda kerusakan berupa korosi suhu tinggi, erosi, aus, dan oksidasi pada permukaan (Di Gianfrancesco, 2017; Oksa et al., 2011; Stringer, 1998)

Seringnya penghentian operasi karena pergantian komponen menyebabkan performa pembangkit menjadi menurun. Oleh sebab itu kriteria seleksi material *boiler tubes* salah satunya ialah kompatibel terhadap temperatur tinggi guna mendukung nilai efisiensi dan tekanan uap yang dihasilkan tetap terjaga, selain itu untuk memproteksi material substrat terhadap lingkungan ekstrem tersebut, maka diperlukan lapisan metalik yang kompatibel (Sivakumar & Mordike, 1989)

Penerapan *Thermal Spray Coating* (TSC) menjadi solusi atas kebutuhan lapis lindung yang tahan terhadap temperatur tinggi dan sekaligus tahan terhadap lingkungan korosif, oksidatif dan erosif. Berbagai contoh penerapan banyak ditemui pada komponen mesin pesawat terbang, misalnya: *turbin blades, turbine shafts, turbine vanes, fan blade clappers*, dll (Rhys-Jones, 1990). Kemudian diluar bagian mesin yaitu komponen *rocket thrust-chambers* pun dilindungi oleh TSC. Teknologi TSC diminati oleh para rekayasawan dirgantara karena TSC memiliki sifat-sifat seperti: ketebalan yang optimal sampai 500 μm , berkontribusi meningkatkan umur pakai komponen, daya lekat yang baik antara lapisan dan substrat, harga produksi relatif rendah, tahan terhadap *thermal shocks*, serta korosi dan erosi. Dapat disimpulkan bahwa TSC berperan sebagai *structural jacket* terhadap beban kombusi (Fauchais, 2015; Khan et al., 2019). Sebagai *best practice* untuk kebutuhan penelitian, kriteria minimal ketebalan *coating* hasil proses *thermal spray* adalah 100 μm , angka ini sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan rekomendasi oleh Bose di tahun 2007 (Bose, 2007)

Kegagalan peralatan pada industri eksplorasi minyak, disebabkan oleh abrasi, erosi, dan korosi (Kembaiyan & Keshavan, 1995). TSC secara efektif dapat diterapkan untuk melapisi permukaan *drill bit cones, polycrystalline diamond cutter, rotors*. Contoh lainnya pada bagian ujung *gas-well tubings* yang digunakan pada saat eksplorasi pengeboran gas hingga mencapai kedalaman 3.000 m. TSC secara efektif dapat mencegah korosi dan kavitasi yang disebabkan laju aliran gas H_2S dan tidak sempurnanya koneksi antara satu pipa dengan pipa lainnya.

Thermal spraying dikembangkan pertama kali berdasarkan hak paten M.U Schoop (Zurich, Swiss) antara tahun 1882 s/d 1889. Awalnya jenis *feedstock* yang digunakan ialah kawat Pb-Sn yang diumpankan pada *oxyacetylene welding torch*. Selanjutnya dikembangkan jenis *feedstock* menjadi serbuk. *Electric Arc Spray* juga dipatenkan oleh Schoop pada tahun 1908, dimana teknik ini mampu memvariasikan berbagai jenis logam untuk dilapiskan pada berbagai permukaan substrat, contohnya lapisan seng Zn pada baja dengan proses *wire-arc metallizing* yang bertujuan untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi. Pada era tersebut industri *metallizing* dimulai (Davis, 2004). Namun demikian, teknologi *Thermal Spray Coating* (TSC) mengalami perkembangan yang pesat pada saat era perang dunia ke-2, baik untuk keperluan industri manufaktur dan peralatan perang.

Sebelumnya artikel-artikel kajian sejenis lebih banyak mendiskusikan serta mengintisarikan perkembangan dan kemajuan teknologi *thermal spray coating*. Namun, didalam artikel ini dikaji lebih luas mengenai kemajuan teknologi perlakuan pasca pelapisan (*post-spray treatment*) serta membandingkan dan sekaligus mengintisarikan teknologi yang telah dicapai.

2. PLTU DAN MATERIALNYA

Seiring dengan kebijakan pemerintah Indonesia mengenai rencana pengembangan sarana pembangkit listrik berkapasitas 35.000 MW yang dimulai sejak tahun 2014, dan kemudian telah disahkan sebagai Keputusan Menteri Energi Sumber Daya Mineral Republik Indonesia No. 5899 K/20/MEM/2016 tentang Pengesahan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. Perusahaan Listrik Negara (PT. PLN Persero) Tahun 2016 S.D 2025, maka keperluan akan material yang tahan terhadap temperatur tinggi menjadi tuntutan penerapan, terlebih lagi material-material yang dikhususkan untuk peralatan teknis seperti ketel uap (*boiler*) sebagai pemasok uap untuk menggerakkan turbin pembangkit listrik. Istilah temperatur tinggi pada kondisi operasi *boiler* merujuk pada rentang temperatur operasi antara 500 s/d 800°C. Data stratifikasi yang dikeluarkan oleh Perusahaan Listrik Negara (PLN) menginformasikan program pembangunan ketenagalistrikan sebanyak 35.000 MW didominasi oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), yaitu sebanyak 19.813 MW. Untuk mewujudkan hal tersebut diperlukan peran swasta atau *Independent Power Producer* (IPP) untuk membangun PLTU dengan kapasitas total yang ditargetkan. PLTU memiliki 4 komponen utama dalam sistem pengoperasiannya, yaitu: *boiler*, *steam line*, turbin uap beserta generator, kondensor. Masing-masing komponen utama ini memiliki fungsi-fungsi yang terintegrasi antara satu dengan lainnya (Di Gianfrancesco, 2017). Satu set *boiler* terdiri dari: *water wall*, *superheater*, *header*, *economizer*, dan *drum* yang umumnya terbuat dari baja, dengan grade antara lain: *Sulfuric acid corrosion resistant steel* A423-Gr. 3; baja karbon rendah dan *medium* seperti grade A53, A106, A178, A192, A210; *High chrome ferritic steel* T91, T92; *Austenitic Stainless Steel* SUS 316, SUS304.

Boiler berfungsi untuk mengkonversi air yang dipasok melalui bagian dalam pipa menjadi uap bertekanan dengan input panas akibat kombusi bahan bakar batu bara yang dipaparkan pada permukaan *boiler tubes*. Proses kombusi dilakukan secara kontinyu dengan mengendalikan perbandingan jumlah batu bara serta udara.

Steam line terbuat dari bahan pipa baja yang relatif tebal dan berfungsi sebagai komponen untuk mengalirkan uap bertekanan dari *boiler* menuju ruang turbin. Selama dialirkannya uap panas tersebut dipasang peralatan katup uap (*steam valve*) yang berfungsi sebagai pengatur untuk mencegah terjadinya kelebihan tekanan uap dengan melepaskan sebagian uap untuk mengimbangi tekanan uap didalam *steam line*. Umumnya material yang digunakan untuk *Steam line* sama dengan yang diterapkan pada material *boiler*.

Turbin uap berfungsi untuk membangkitkan listrik, dimana pemanfaatan uap bertekanan yang dipasok dari *boiler* akan menggerakkan sistem turbin sehingga terbentuk energi mekanik yang akan dikonversi menjadi energi listrik. Terdapat beberapa klasifikasi turbin uap berdasarkan teknologi dan utilitasnya, antara lain adalah: *condensing turbines*, *non-condensing* atau *back pressure turbines*, *reheat turbines*, *extracting type turbines*, dan *Induction turbines*. Jenis-jenis material yang secara komersil tersedia untuk komponen turbin antara lain adalah: Baja feritik seperti T92; 9,5Cr; 10,5Cr; baja austenitik; dan *Ni-base Superalloy* seperti Haynes 230, Inconel 617, Nimonic 90, dan Udimet 720Li.

Khusus untuk komponen turbin yang terbuat dari material baja dapat diproteksi dengan TSC untuk memenuhi pertimbangan kehandalan komponen dan peningkatan efisiensi PLTU.

Kondensor merupakan komponen pada PLTU yang berfungsi sebagai *outlet* untuk menampung sisa uap bertekanan yang telah dimanfaatkan oleh turbin untuk dirubah menjadi air untuk dipasok kembali menuju *boiler tubes*.

Jenis-jenis material yang secara komersil tersedia untuk komponen kondensor antara lain adalah baja karbon rendah seperti A516-Gr. 70, dan untuk kondisi lingkungan tertentu dapat juga digunakan *Austenitic Stainless Steel AL-6XN* sebagai *tubes* dan *tube sheets*, *Ferritic Stainless Steel AL 29-4C* sebagai *tubes*, 904L sebagai *tube sheets*.

Prinsip kerja dari PLTU ialah memproduksi energi listrik dengan memanfaatkan komposisi bahan bakar, seperti: batubara, biomassa atau sampah, dan gas alam dimana listrik yang dihasilkan bermula dari proses pemanasan komponen *boiler tubes* yang telah dialiri air didalamnya untuk dihasilkan uap panas bertekanan yang dipasok ke turbin untuk menggerakkan turbin dan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Dari beberapa alternatif bahan bakar yang disebutkan, batubara yang digerus (*pulverized coal*) adalah sumber energi yang paling banyak digunakan untuk keperluan PLTU (Basuki, 2016), dikarenakan ketersediannya berlimpah di wilayah Indonesia dan relatif murah (Huda dkk, 2012). Suplai air yang diperlukan sebagai media penghasil uap panas disalurkan dengan menggunakan pompa untuk mengisi *boiler tubes* untuk dipanaskan hingga kondisi *superheated* oleh hasil komposisi batubara, dengan catatan bahwa kualitas air telah dikondisikan agar tidak menimbulkan masalah seperti korosi dan erosi pada permukaan dalam pipa.

Pada sistem kerja PLTU dengan bahan bakar *pulverized coal*, kalor dari komposisi batubara yang dipaparkan pada permukaan luar *boiler tubes* yang didalamnya telah dialiri air akan menghasilkan uap bertekanan paling rendah 170 bar dengan parameter temperatur *burner* minimum 540°C, di ketentuan operasional yang berbeda-beda muncul persyaratan kualitas batubara yang harus diperhatikan yakni *pre-treatment process*, guna mencapai tingkat kualitas batubara yang ditetapkan sebelum diumpungkan sebagai bahan bakar yang sekaligus diupayakan untuk meningkatkan nilai efisiensi *boiler* PLTU. Secara desain proses yang terintegrasi pada lokasi PLTU, disyaratkan memiliki persediaan sumber air baku dan sarana instalasi pengelolaan baik untuk meningkatkan kualitas air baku dengan cara desalinasi dan juga untuk mendaur ulang air limbah dengan cara demineralisasi, dan secara geografis umumnya sarana PLTU terletak di sekitar garis pantai. Hal ini beralasan karena *boiler* membutuhkan suplai air yang sangat banyak dan hanya dimungkinkan tercukupi dari pemanfaatan air laut yang telah didesalinasi, selain itu untuk memudahkan pengiriman persediaan batu bara melalui jalur laut. Sebagai informasi tambahan umum untuk spesifikasi batu bara yang tersedia di Indonesia rata-rata adalah golongan *low rank coal* (lignit) mengandung kadar sulfur sekitar 0,33~0,35% berat dan mempunyai kalori 4.200 kcal dan dapat dilakukan proses *blending* dengan *rank* yang lebih tinggi untuk ditingkatkan nilai kalorinya (Huda et al., 2012). Batubara merupakan bahan bakar yang relatif murah dengan ketersediaan yang banyak di Indonesia, sehingga dengan ketersediannya tersebut akan tetap digunakan sebagai bahan bakar di sebagian besar PLTU paling tidak sampai efisiensi dan kapasitas produksi energi dari sumber bahan terbaharukan dapat ditingkatkan pada beberapa puluh tahun kedepan (Basuki, 2016).

Jenis sistem PLTU digolongkan ke dalam empat jenis (Di Gianfrancesco, 2017.), yaitu sebagai berikut:

- Subkritis, atau disebut juga dengan *Subcritical Pulverized Coal (SubC PC)* beroperasi dibawah temperatur kritis air yaitu 540°C, menghasilkan tekanan uap antara 170~220 bar dengan nilai efisiensi sampai 38%.
- Superkritis / *Supercritical Pulverized Coal (SC PC)*, beroperasi pada kisaran temperatur antara 600~615°C, menghasilkan tekanan uap 250 bar dengan nilai efisiensi sampai 42%.
- Ultra-superkritis / *Ultra-supercritical Pulverized Coal (USC PC)*, beroperasi pada temperatur sekitar 620°C, menghasilkan tekanan uap sekitar 300 bar dengan nilai efisiensi antara 42~46%.
- Selanjutnya generasi berikutnya yang sedang dikembangkan adalah *Advanced Ultra-Supercritical Pulverized Coal (A-USC PC)*, dengan target efisiensi sebesar >50% yang mampu beroperasi pada kisaran temperatur antara 700~760°C dan menghasilkan tekanan sebesar 350 bar.

Untuk populasi sistem PLTU yang diadopsi di Indonesia mulai dari yang paling banyak ke yang paling sedikit ialah Subkritis, Superkritis, dan Ultra-Superkritis.

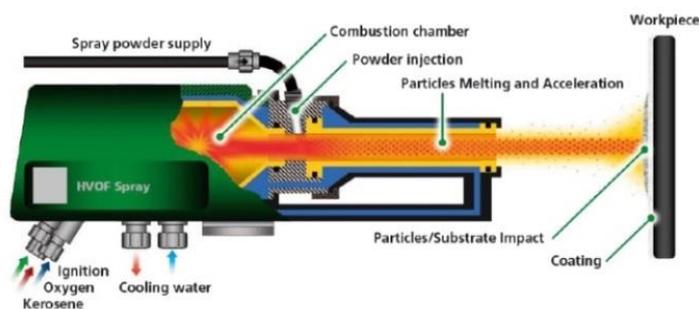
Korosi suhu tinggi dan erosi merupakan problem serius pada *boiler tubes*, hal ini dikarenakan sifat lingkungan kerja dimana pada sistem pembakaran mendegradasi material terutama pada bagian yang langsung menerima paparan temperatur tinggi (Bhatia et al., 2012). Oleh karena itu, selama terjadi perpindahan panas pada *boiler* berbahan bakar batubara, performa material harus memiliki ketahanan terhadap lingkungan temperatur tinggi (Sidhu et al., 2006; Stringer, 1998). Di bagian dalam *boiler tube* selain mendapatkan tegangan dari tekanan uap yang dialirkan, pada bagian luarnya juga berinteraksi dengan lingkungan yang oksidatif dan korosif sebagai hasil dari komposisi batubara yang semuanya berlangsung pada temperatur tinggi.

Material paduan golongan *superalloy* salah satunya *Ni-based* telah dikembangkan untuk penerapan di lingkungan temperatur tinggi, namun paduan tersebut tidak memiliki performa perpindahan panas yang baik dan disamping itu, dapat dikatakan *overspecification* secara kekuatan temperatur tinggi (*high temperature strength*), *fracture toughness*, ketahanan erosi, dan ketahanan oksidasi (Wu et al., 2011). Permasalahan biaya pun tidak lepas dari pertimbangan. Seperti yang diketahui bahwa *superalloy* diistilahkan sebagai paduan eksotis yang kaya akan paduan tinggi dan harganya di pasaran pun tinggi.

2.1. HVOF (High Velocity Oxy Fuel).

HVOF ditemukan pada tahun 1958 oleh perusahaan *Union Carbide* (sekarang bernama *Praxair Surface Technologies, Inc*). Kemudian dikomersialisasi di tahun 1980-an saat sistem *JetKote (Delloro Stellite, Goshen di Indiana)* diperkenalkan oleh James Browning (Davis, 2004).

Definisi HVOF adalah proses TSC yang berlangsung pada kondisi tekanan dan temperatur komposisi yang tinggi, HVOF melibatkan pemanasan material *feedstock* berbentuk serbuk guna membentuk lelehan maupun semi-lelehan yang diumpangkan melalui *spray gun* dan kemudian disebarkan dengan aliran gas bertekanan pada permukaan substrat sehingga membentuk struktur permukaan baru sebagai lapisan, secara skematik *gun* HVOF ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skematik *gun* HVOF, sumber <https://www.fst.nl>, *Thermal Spray Technology*., 2016.

Secara prinsip, HVOF memanfaatkan bahan bakar gas yang diumpangkan ke dalam ruang bakar (*combustion chamber*) seperti hidrogen, kerosin, propana, propilena, gas alam, etilena, acetilena. Penting diketahui bahwa teknik HVOF diklasifikasi berdasarkan parameter tekanan dan *heat input* yang dihasilkan (Davis, 2004), berikut adalah klasifikasinya:

- *High velocity*, menghasilkan tekanan sebesar 241 kPa (35 psi) dan *heat input* 527 MJ (500.000 Btu).
- *Hyper velocity*, menghasilkan tekanan yang lebih tinggi yaitu 620~827 kPa (90 ~ 120 psi) dan *heat input* sampai 1 GJ (1.000.000 Btu).

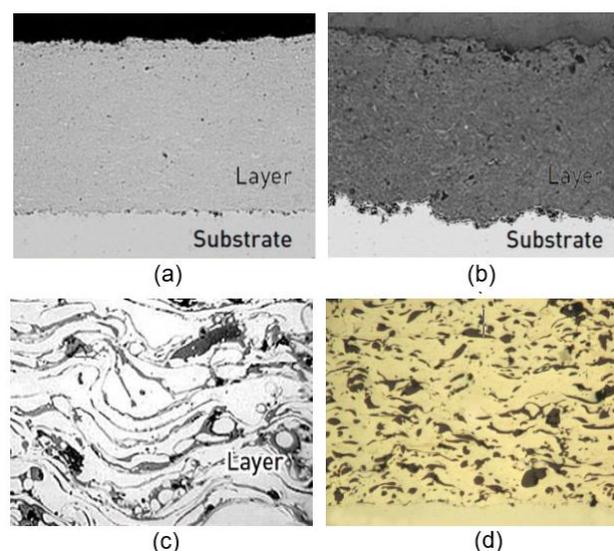
Laju *droplets* yang disebarkan oleh teknik HVOF mencapai 800 m/s, dimana *bond strength* yang didapat sangat baik yaitu lebih dari 70 MPa serta porositas yang sangat rendah yaitu antara 1~2% (Schneider et al., 2006). Dengan mempertimbangkan keuntungan dan kerugian. Proses TSC diatas menawarkan solusi terbaik untuk perlindungan komponen pembangkit listrik, baik untuk komponen yang baru dan renovasi (*overhaul*) yang dapat dilakukan secara insitu. Pada Tabel 1 dijelaskan mengenai perbandingan parameter proses dan karakteristik yang dihasilkan oleh macam-macam teknologi TSC yang telah dikembangkan.

Tabel 1. Parameter proses dan karakteristik yang didapat untuk beberapa contoh proses TSC (Davis, 2004; Schneider et al., 2006).

	<i>Flame spraying</i>	<i>HVOF spraying</i>	<i>Detonation spraying</i>	<i>Electric-arc spraying</i>	<i>Atmospheric plasma spraying</i>	<i>Vacuum plasma spraying</i>
<i>Gas temperature</i> [°C]	3000	3000	4000	4000	12000~16000	12000~16000
<i>Particle velocity</i> [m/s]	40	800	600~1000	100	200~400	300~600
<i>Spray distance</i> [mm]	100~200	120~350	50~400	80~200	80~250	300~600
<i>Bond strength</i> [MPa]	7~18	68	82	10~40	<68	>68
<i>Content of oxygen</i> [%]	10~15	1~5	1~5	10~20	2~3	ppm range
<i>Porosity</i> [%]	10~15	1~2	1~2	10	2~5	<0.5
<i>Spray capacity</i> [kg/h]	2~6	1~9	1	10~25	2~10	3~15

Dari keterangan tersebut maka dapat disimpulkan bahwa aplikasi HVOF memiliki keunggulan-keunggulan dibandingkan teknologi TSC lainnya, diantaranya: HVOF dioperasikan pada rentang temperatur 3.000 °C yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan teknologi proses lainnya. Hal ini berindikasi pemakaian energi yang lebih rendah, kemudian *particle velocity* sebesar 800 m/s, *coating bond strength* yang tinggi yaitu 68 MPa mendekati rentang *bond strength* yang dihasilkan dengan teknik *D-gun Spray*, aspek *oxygen content* yang relatif rendah antara 1~5% sebanding dengan yang dihasilkan dengan teknik *Plasma Spray*.

Karakteristik hasil kualitas struktur mikro lapisan yang ditunjukkan pada Gambar 2 dari berbagai teknik proses TSC menunjukkan hasil dari teknik HVOF yang lebih unggul dengan kisaran porositas 1~2%. HVOF telah terbukti mampu untuk melelehkan logam dan keramik bahkan material yang bernilai densitas rendah seperti TiC, bahkan selain itu HVOF dapat diterapkan untuk melapisi substrat logam baik yang bersifat konduktif, maupun konduktifitas rendah.



Gambar 2. Perbedaan struktur mikro hasil proses TSC dengan teknik yang berbeda (a) HVOF; (b) *Atmospheric Plasma Spraying*; (c) *Electric-arc Spraying*; (d) *Flame Powder Spray* (Sumber: <https://www.fst.nl>, Thermal Spray Technology., 2016).

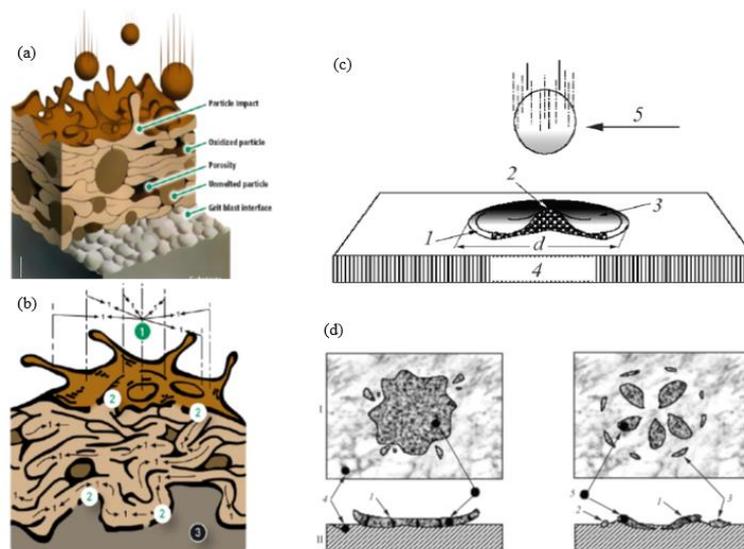
2.2. Proses *Thermal Spray Coating* (TSC) dengan teknik HVOF

Secara pemahaman yang paling sederhana, TSC dengan teknik HVOF melibatkan pemanasan material *feedstock* serbuk guna membentuk lelehan maupun semi-lelehan yang diumpankan melalui *spray gun* dan kemudian disemburkan dengan aliran gas bertekanan pada substrat sehingga membentuk struktur permukaan baru. Material pelapis berupa powder yang terdiri dari satu elemen unsur saja, namun dapat juga dipadukan menjadi *metal-matrix composite* (MMC) yang memiliki berbagai sifat-sifat tertentu yang diinginkan.

HVOF *gun* memiliki ruang bakar yang dilengkapi dengan sarana pendingin air maupun udara (lihat Gambar 1). Pada bagian inilah campuran antara bahan bakar dan oksigen dalam kondisi tekanan tertentu membentuk energi panas yang dapat melelehkan *feedstock*. Gas yang berekspansi pada keadaan tertutup akan disemburkan sekaligus menginjeksi serta melepaskan energi kinetik berupa *droplets* lelehan *feedstock* melalui *nozzle gun* dengan kecepatan dan tekanan tinggi.

Laju gas yang dihasilkan dengan teknik HVOF jauh lebih tinggi dibandingkan dengan teknik *flame* dan *plasma spray* dan mengindikasikan bahwa semakin tinggi laju partikel yang disemburkan, semakin meningkatkan densitas lapisan dan juga daya lekat lapisan tersebut. *Mechanical interlocking* antara lapisan TSC dan substrat yang terbentuk berkontribusi positif pada kekuatan daya lekat lapisan, dan tentu saja hal ini tidak lepas dengan penjelasan preparasi permukaan yang telah disebutkan sebelumnya. Pada Gambar 3 ditunjukkan ilustrasi terbentuknya lapisan dan ikatan antara substrat dan lapisan. Awal terjadi pembentukan *mechanical interlocking* yaitu pada *splat* yang jatuh pada permukaan substrat dengan topografi kekasaran tertentu, dimana *splats* yang umumnya lelehan mengisi ruang kemudian membeku, dan menciptakan ikatan. Ikatan yang terbentuk pada TSC terdistribusi dalam tiga jenis, yaitu:

- *Mechanical interlocking*
- *Mechanical bonding*
- Mekanisme ikatan kimia-fisika, Gaya Van der Waals, dll.



Gambar 3. (a). Ilustrasi struktur mikro yang dihasilkan oleh pembentukan lapisan dari tipikal proses TSC dengan *powder feedstock*; (b). Mekanisme terbentuknya ikatan pada antarmuka substrat dan TSC: 1. *Mechanical interlocking*, 2. *Mechanical bonding*, 3. Mekanisme ikatan kimia-fisika, Gaya Van der Waals, dll; (c). Transformasi *droplet* menjadi *splat* saat menumbuk permukaan substrat: 1. *Rim*, 2. Inti $h \sim 0.1d$, 3. *Splat*, 4. Substrat, 5. *droplet particle* berbentuk sferikal sebelum tumbukkan; (d). Dua pola morfologi dari lamellar dari dua model *splat* dengan tampak atas pola *pancake* pola bunga dan tampak potongan 1. Rekahan, 2. Substrat yang terdeformasi akibat lelehan *splat*, 3. *corona*, 4. substrat, 5. lamellar (Fantassi et al., 1992; Stokes, 2005).

Splat (Gambar 3a dan 3b) adalah partikel *droplet* tunggal yang menumbuk permukaan partikel. Kumpulan *splat* akan saling bertumpang tindih kemudian membeku dan berikatan satu sama lainnya

sehingga terbentuk lapisan yang kontinyu. Dapat dikatakan *splat* merupakan struktur dasar TSC. *Splats* terbentuk karena semburan akibat kombinasi energi panas dan energi kinetik yang disemurkan dengan kecepatan tinggi dari *spray gun* secara kontinyu pada permukaan substrat.

Lelehan *droplets* yang ditransfer secara terus-menerus dari *gun* umumnya berbentuk *spherical*, dan pada saat menumbuk permukaan substrat bentuknya menyebar dan mengisi ruang, membeku, dan kemudian berevolusi dengan morfologi akhir lamelar. Karakteristik TSC ditandai dengan laju pembekuan yang sangat cepat yaitu antara $10^5 \sim 10^8$ °C/s, dimana kondisi ini menghasilkan bermacam-macam keadaan material mulai dari amorf hingga metastabil. Dua bentuk struktur yang umumnya muncul pada lapisan yaitu *splat* dan *intrasplat*. Didalam *splats*, laju pembekuan TSC yang sangat cepat mengendalikan besar butir hingga $5\mu\text{m}$ dan menghambat material mencapai keadaan stabilnya sehingga menyebabkan lapisan TSC bersifat anisotrop. Pada akumulasi lapisan TSC, sifat yang ditampakan pada ketebalan lapisan bervariasi yang mana hal ini disebabkan oleh oksida, kombinasi energi panas dan energi kinetik, laju pembekuan, keseragaman komposisi kimia pada *powder feedstock*. Khusus mengenai prediksi difusi antara substrat dan *coating*, maka dapat disimpulkan bahwa terjadinya difusi derajatnya kecil dan tidak signifikan, hal yang sama telah dikonfirmasi pula oleh (Bhatia et al., 2012; Waldi et al., 2018) melalui pengamatan *point analysis* dengan menggunakan SEM pada penampang lintang substrat dan lapisan.

2.3. Karakteristik *coating*

Umumnya struktur mikro TSC yang terbentuk dengan teknik HVOF adalah lamelar. Selain memiliki bentuk struktur lamelar, laju pembekuan yang cepat, juga dapat menimbulkan terbentuknya *void* atau disebut juga porositas, maupun oksida. Dapat disimpulkan morfologi dan karakter dari struktur lapisan bergantung pada material *feedstock* seperti: distribusi ukuran (Riyanto & Prawara, 2010), morfologi partikel *feedstock*, dan keseragaman komposisi kimianya. Disamping itu parameter proses pun berpengaruh untuk mengendalikan laju *spray*, jarak *spray* atau *Stand of Distance (SoD)*, sudut dan *spray travelling speed* pada saat proses TSC (Sidhu et al., 2005).

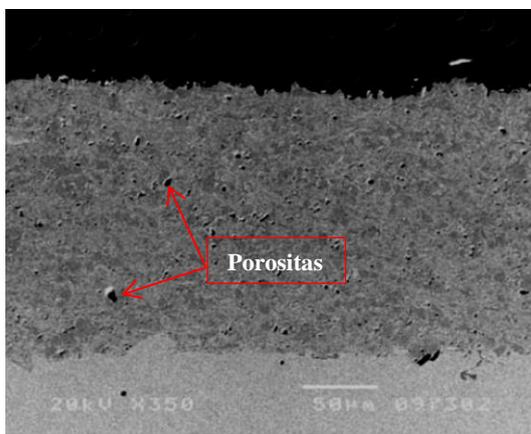
a. Porositas.

Timbulnya porositas tidak dapat dihindari pada proses TSC, hal ini dikarenakan keterlibatan udara yang disupply dari ekspansi gas bahan bakar yang melelehkan serta mendorong *powder feedstock* menjadi *splats*. Sebagian kecil udara tersebut terjebak antara tumpukan *splats* (Zhang et al., 2009). Pada saat *feedstock* dilelehkan dan disemurkan dengan kecepatan tinggi melalui *gun* maka akan tersusun konfigurasi struktur lamelar, porositas terbentuk karena adanya udara yang terjebak pada saat solidifikasi lapisan. Beberapa partikel yang mencair sempurna (*melted*) membentuk *splats* dan sebagian tidak sempat mencair membentuk *unmelted*, sejumlah kecil fasa-fasa metastabil membentuk oksida pada saat ketiganya membeku masing-masing memiliki laju pembekuan dan penyusutan yang berbeda-beda sehingga membentuk ruang kosong berukuran mikro di lapisan yang diistilahkan sebagai porositas, porositas umumnya nampak pada pertemuan *unmelted* dan *splats*, atau oksida. Pengaruh negatif porositas pada lapisan yaitu mengurangi ketahanan korosi dan erosi (Picas et al., 2013), erosi (Kumar et al., 2016), daya rekat (Fiedler et al., 2017), dan *microhardness* (Vignesh et al., 2017). Gambar 4 menunjukkan penampakan porous pada lapisan TSC. Terdapat tiga jenis porositas yang umum ditemui pada TSC (Ctibor et al., 2006), diantaranya:

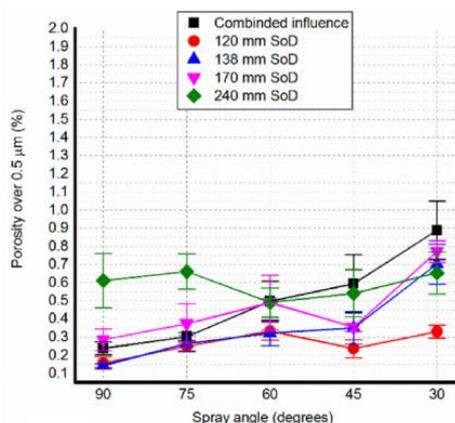
- Porositas yang terbentuk atas retakan *intrasplat* yang berasal dari reaksi pelepasan tegangan sisa yang disebabkan penyusutan saat pembekuan *splat*, sehingga mengurangi kohesi dan membentuk separasi pada *intrasplat*,
- Porositas pada interlamelar yang disebabkan *wettability* yang rendah antara satu *splat* dan *splat* lainnya,
- Porositas globular yang diakibatkan oleh mampu isi atau dapat dikatakan juga kompaksi *splats* pada permukaan bergelombang dan juga terjebaknya partikel *unmelted* dan resolidifikasi dengan *splat* lamelar.

Banyaknya porositas dipengaruhi oleh parameter kinematika *spray* seperti sudut, jarak *spray gun* terhadap *workpiece* atau SoD, dan laju *spray*. Gambar 5 ditunjukkan nilai porositas yang didapat setelah

TSC dengan teknik HVOF, distribusi ukuran porositas $<0.5\mu\text{m}$ dibawah 1% dengan sudut *spray* 30~90° dan SoD 120~240mm (Katranidis et al., 2017).



Gambar 4. SEM Mikrograf hasil TSC teknik HVOF menunjukkan porositas, bahan feedstock 80Cr3C2-20NiCr berukuran $25\mu\text{m}$, dengan jarak spray 250mm, dan laju spray 500 mm/s (Guilemany et al., 2006).



Gambar 5. Grafik hubungan persentase porositas berukuran $<0.5\mu\text{m}$ terhadap sudut spray dan variasi SoD tertentu (Katranidis et al., 2017).

Porositas yang terbentuk untuk setiap jenis teknologi TSC bervariasi karena dipengaruhi temperatur kerja, laju partikel, dan jenis *feedstock*. Dapat disimpulkan keberadaan porositas dan tegangan sisa mempengaruhi sifat mekanik lapisan diantaranya adalah ketangguhan dan kekerasannya, dimana semakin kecil nilai porositas maka sifat mekanik lapisan semakin baik. Hal ini telah dikonfirmasi juga pada penelitian-penelitian sebelumnya tentang tingkat porositas yang dihasilkan oleh proses HVOF (Murugan et al., 2014; Thakur & Arora, 2017).

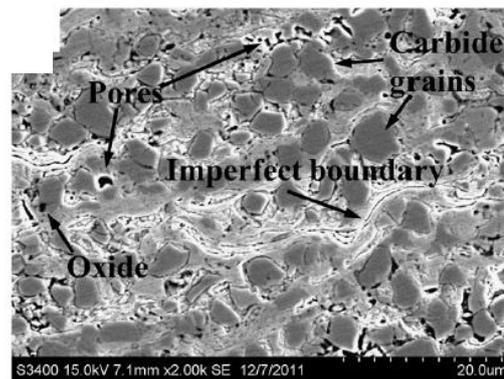
Porositas yang terbentuk untuk setiap jenis teknologi TSC bervariasi karena dipengaruhi temperatur kerja, laju partikel, dan jenis *feedstock*. Dapat disimpulkan keberadaan porositas dan tegangan sisa mempengaruhi sifat mekanik lapisan diantaranya adalah ketangguhan dan kekerasannya, dimana semakin kecil nilai porositas maka sifat mekanik lapisan semakin baik. Hal ini telah dikonfirmasi juga pada penelitian-penelitian sebelumnya tentang tingkat porositas yang dihasilkan oleh proses HVOF (Murugan et al., 2014; Thakur & Arora, 2017).

Penetapan fraksi porositas bertujuan untuk menetapkan kuantitas porous yang mungkin terbentuk selama proses TSC, populasi porous pada lapisan salah satunya dapat menurunkan sifat mekanik lapisan. Penetapan porositas pada lapisan TSC dilakukan dengan menggunakan aplikasi piranti lunak (*software*) ImageJ, berdasarkan Sadeghimeresht dkk di tahun 2017 analisis level porositas dengan menggunakan *software* memiliki tingkat kepercayaan yang tinggi (Sadeghimeresht et al., 2016). Mekanisme penetapan porositas pada *coating* dilakukan dengan cara menjalankan *software* ImageJ, *software* menghitung probabilitas porositas yang teridentifikasi pada foto struktur mikro hasil SEM. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan umumnya level porositas *coating* hasil proses HVOF adalah $<2\%$ (Schneider et al., 2006; Waldi et al., 2018).

b. Inklusi Oksida (*Oxide Stringers*)

Lapisan metalik rentan terhadap terjadinya oksidasi pada saat proses TSC, dan produk oksidasi biasanya terbentuk oksida dalam lapisan. Sifat oksida umumnya lebih keras dari logamnya, sehingga secara tidak langsung terjadi mekanisme penguatan pada lapisan yang juga ditandai dengan meningkatnya ketahanan aus (Bergmann & Vicenzi, 2011; Ctibor et al., 2006). Penampakan Inklusi oksida pada lapisan metalik biasanya solid, gelap, memanjang serta paralel terhadap bidang substrat. Oksida terbentuk sebagai interaksi antara partikel panas terhadap atmosfer atau juga pengaruh dari pemanasan terhadap permukaan lapisan selama proses deposisi (Picas et al., 2013). Oksida biasanya ditemui antara *splat* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

Waktu pembekuan yang relatif lama serta temperatur partikel yang tinggi meningkatkan jumlah fraksi volume oksida dalam lapisan. Dan jika jumlahnya terlalu banyak akan berdampak pada pelemahan ikatan kohesi antar *splat* yang dapat menginisiasi, dan mempropagasi korosi (Bergmann & Vicenzi, 2011; Picas et al., 2013). Guna mencegah dan meminimalkan pembentukan inklusi oksida, dapat diterapkan tindakan-tindakan antara lain: penggunaan gas inert dengan tingkat kemurnian tinggi yang dapat membatasi lingkungan yang reaktif saat proses TSC, meningkatkan laju *spray*, dengan mengurangi jarak *spray*, penggunaan *air cooling* untuk mempercepat pembekuan lapisan, mengurangi ukuran partikel *feedstock*.



Gambar 6. SEM Mikrograf hasil TSC teknik HVOF menunjukkan morfologi oksida, dengan bahan *feedstock* $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ (Hong et al., 2013).

c. Daya Rekat *Coating*

Tujuan dilakukannya pengujian daya rekat (adhesi) ialah untuk menjamin kekuatan daya rekat lapisan pada substrat terhadap beban mekanik yang diakibatkan tingginya tekanan dari sistem kombusi. Lemahnya adhesi lapisan akan menyebabkan kegagalan seperti separasi (*spalling*). Sehingga pengujian yang dilakukan untuk memastikan hal tersebut tidak berlangsung ialah dengan melakukan pengujian adhesi (*bond strength test*) sesuai persyaratan ASTM C633-13 *Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings*.

Dilaporkan juga bahwa maksimum kekuatan daya lekat lapisan TSC berbahan WC/Co yang terukur mampu mencapai 66 MPa atau sekitar 9500 psi (Cho et al., 2009). Setidaknya kriteria daya rekat minimum yang umum ditetapkan oleh para praktisi di industri TSC untuk aplikasi HVOF pada *boiler tubes* adalah 35 MPa.

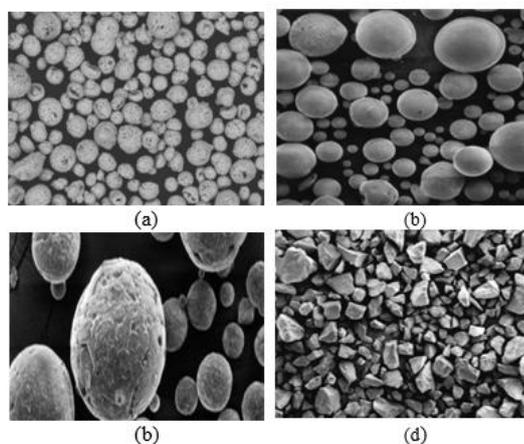
e. Pengaruh Material *Feedstock* Pada *Coating*

Secara umum, struktur mikro TSC bergantung pada energi panas dan kinetik, interaksi antara energi-energi dan *feedstock material* mempengaruhi interaksi antara *splats* dan permukaan substrat. Khusus mengenai pembentukan fasa dan morfologi pada lapisan hasil proses TSC dengan teknik HVOF sangat ditentukan oleh seleksi *powder feedstock* yang akan digunakan sebagai bahan baku TSC, dan juga pemenuhan kebutuhan operasional nantinya. Dan artinya dengan merekayasa sifat dan karakteristik *powder* berarti dapat mengendalikan perilaku dari lapisan TSC.

Sehingga demikian, untuk memenuhi kriteria karakteristik *coating* yang diinginkan telah dikembangkan jenis dan variasi *powder feedstock* yang juga tersedia untuk proses TSC, antara lain adalah (Pawłowski, 2008): serbuk logam (contoh: Mo, Ni, Cr, atau Co); paduan (contoh: Ni+16wt% Cr+3.5wt% B+3.5wt% Si+4.5wt% Fe+1wt% C); paduan oksida (contoh ZrO_2 +8wt% Y_2O_3); oksida keramik (contoh: Al_2O_3); cermet clad (contoh: Graphite + 20wt% Ni); cermet aglomerasi (contoh: WC + 12wt% Co); karbida (contoh: Cr_2C_3); metal matrix composite (contoh: NiCr + Cr_3C_2 , atau 60%NiCr+30%WC₁₂Co+10% Al_2O_3). Karakteristik *powder* antara lain terdiri dari morfologi partikel, distribusi ukuran, densitas, mampu alir / *flowability*, komposisi kimia, aglomerasi sangat ditentukan dari metode manufakturnya seperti *crushing* dan *milling*, *spray drying*, atomisasi baik gas – liquid – sentrifugal – vakum – ultrasonic.

Beberapa investigasi yang telah dilakukan telah membuktikan bahwa penggunaan jenis-jenis *feedstock* yang berbeda akan didapatkan hasil struktur TSC yang berbeda-beda pula, begitu pula dengan *powder* dengan jenis material yang sama namun dengan morfologi dan ukuran yang berbeda serta proses dengan teknik yang sama (Martides et al., 2017; Yang et al., 2003). Sehingga dapat disimpulkan sifat dan karakteristik *powder feedstock* yang dipilih sangat menentukan kualitas dari hasil proses TSC seperti halnya rekayasa pada aspek morfologi partikel *powder*, distribusi ukuran, densitas, dan komposisi kimia berpengaruh erat terhadap evolusi deposisi, serta konduktifitas panas (Oksa et al., 2011).

Rekayasa material *feedstock* tentu saja harus mempertimbangkan aspek operasional *boiler tubes*, dimana diharapkan memiliki ketahanan korosi suhu tinggi, erosi, aus, dan oksidasi yang baik. Gambar 7 menunjukkan beberapa morfologi powder yang dihasilkan dari teknik produksi manufaktur PRAXAIR S.T. Technology Inc. Selain PRAXAIR™, terdapat juga manufaktur seperti SAINT-GOBAIN™, KENAMETAL STELLITE™. Sebagai catatan, spesifikasi *feedstock* yang akan digunakan untuk TSC baik berbentuk serbuk maupun kawat agar diverifikasi sebelum penggunaan terhadap persyaratan AWS C2.25/C2.25M:2012 *Specification for Thermal Spray Feedstock - Wire and Rods*.



Gambar 7. SEM Mikrograf dari berbagai morfologi *thermal spray powders* (a). *Ball Mill, blending, aglomerasi dan sinter WC-Co PRAXAIR*; (b) *Atomisasi Yttria Zirconia SAINT-GOBAIN*; (c) *Spray dried Spinel SAINT-GOBAIN*; (d) *fused dan crushed Alumina Titania SAINT-GOBAIN*.

Sumber: <http://www.astroalloys.com/thermal-spray-powders.html> dan <http://www.coatingsolutions.saint-gobain.com/materials/thermal-spray-powders>.

Karakteristik kontur lapisan yang terbentuk dari hasil proses TSC cenderung rata dan bertekstur kasar, lapisan ini terbentuk dari *molten droplet* yang disebarkan dengan kecepatan tinggi. Laju partikel (*particle velocity*) memiliki peran yang penting, yaitu mengatur densitas struktur lapisan. Disamping itu temperatur nyala api (*flame temperature*) yang juga memiliki pengaruh terhadap kualitas deposisi lapisan (Oksa et al., 2011). Kombinasi dari temperatur partikel dan *spray velocity* yang tinggi mengakibatkan perubahan bentuk *droplet* pada saat bertumbukkan dengan permukaan sehingga membentuk morfologi lamelar atau disebut juga dengan *splats* yang melapisi kontur dari permukaan substrat, satu *splat* memiliki ukuran yang tipis yaitu (1~20 μm). Semburan partikel *droplets* yang secara kontinu jatuh pada permukaan dengan cepatnya akan membeku satu demi satu pada setiap *layer* dengan laju pembekuan $10^5 \sim 10^8$ $^{\circ}\text{C/s}$ (untuk lapisan berbahan metalik) sehingga membentuk lapisan polikristalin, atau dengan istilah lain *deposit*.

Penelitian-penelitian sebelumnya mengkonfirmasi keunggulan dari proses TSC dengan teknologi yang berbeda dan hampir kesemuanya menyatakan bahwa teknologi tersebut dipilih karena keunggulan sifatnya yang tahan akan korosi, erosi, oksidasi, selain itu juga dan daya lekat lapisan yang baik membuat teknologi ini semakin diminati. Khususnya HVOF (*High Velocity Oxy Fuel*), teknologi yang paling diminati untuk mendapatkan lapisan dengan porositas rendah dan daya lekat lapisan yang baik.

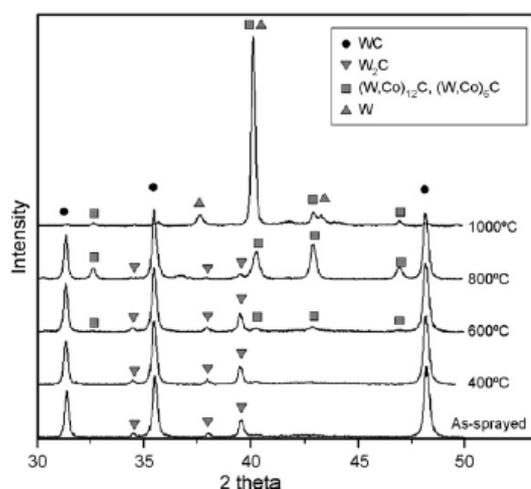
Pada penerapan teknologi HVOF, kalor dibentuk dari pembakaran dari campuran antara bahan bakar gas dan *feedstock material*. Dengan menggunakan jenis *nozzle* tertentu, kombinasi tekanan bahan

bakar dan *feedstock supply*, akan membentuk semburan lelehan dan/atau semi-lelehan logam dengan *supersonic velocity*. Penerapan teknologi HVOF telah direkomendasikan untuk mencukupi kebutuhan skala masal dan renovasi pada komponen yang bekerja pada temperatur tinggi sebagaimana telah dikonfirmasi di penelitian-penelitian sebelumnya (James, 2004; Szymański et al., 2015).

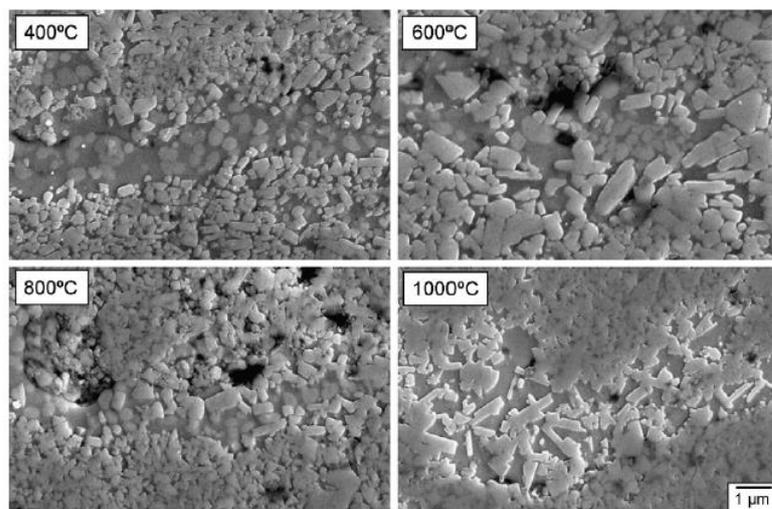
3. PERLAKUAN PASCA PELAPISAN (*POST-SPRAY TREATMENT*)

Pengamatan perilaku lapisan TSC pasca proses HVOF didapati terbentuknya porositas, fraksi partikel-partikel *unmelted* dan *partially melted* didalam lapisan dimana masalah tersebut relatif sulit dihindari. Hal ini tentu dapat mendegradasi kualitas lapisan TSC (Kim et al., 2007) serta menyebabkan melemahnya ikatan kohesi pada *intersplats* yang rentan akan serangan korosi. Untuk mengantisipasi hal tersebut *Post-Spray Treatment* dapat diterapkan untuk mencegah kegagalan yang lebih serius dengan memperbaiki (*touch up*) sifat-sifat lapisan yang bertujuan untuk: memodifikasi struktur mikro, meningkatkan daya lekat lapisan, densifikasi lapisan, melepaskan tegangan sisa, menurunkan tingkat porositas, meningkatkan keseragaman lapisan, penguatan presipitat karbida, modifikasi komposisi kimia. Secara sederhana, *post-spray treatment* bertujuan untuk memperbaiki sifat-sifat lapisan guna memenuhi persyaratan spesifik yang belum dapat dipenuhi oleh proses TSC (kondisi *as-spray*). Telah banyak cara yang dilakukan untuk mengoptimalkan sifat lapisan TSC antara lain yang pernah dilaporkan pada penelitian sebelumnya adalah dengan: perlakuan panas, *laser treatment*, dan *sealing*.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Kim dkk, 2006 melalui perlakuan panas dalam lingkungan atmosfer gas Ar terhadap lapisan WC-Co *Nanocomposite* pada baja karbon rendah untuk meningkatkan ketahanan aus lapisan, dimana keadaan optimal yang didapat yaitu pada temperatur perlakuan panas pada 600°C; selama 1 jam dengan pendinginan di kondisi temperatur ruang, hasil yang diamati setelah eksperimen ialah laju keausan yang lebih baik yaitu 7×10^{-3} mg/m dibandingkan kondisi *as-spray* sebesar 11×10^{-3} mg/m, berdasarkan data yang ditunjukkan pada struktur mikro bahwa perlakuan panas pada kondisi tersebut tidak mengakibatkan perubahan fasa karbida WC dan W_2C yang tersebar pada *intersplats* yang akan meningkatkan performa lapisan dalam hal ketahanan aus. Namun, Kondisi dan hasil perlakuan panas yang dihasilkan pada kondisi diatas 600°C mengakibatkan transformasi fasa baru dimana karbida WC dan W_2C yang bereaksi dengan Co membentuk fasa presipitat baru yaitu *eta-carbide* $(W,Co)_{12}C$ dan $(W,Co)_6C$. Sehingga transformasi tersebut menimbulkan pengaruh sebaliknya yaitu menaikkan laju aus namun menurunkan kekerasan lapisan, hal ini dibuktikan melalui pemeriksaan XRD dimana ketahanan aus menurun setelah perlakuan panas di temperature 800°C dan 1000°C. Perubahan perilaku karbida pada struktur mikro lapisan diamati oleh instrument XRD dengan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 8, dan struktur mikro yang diambil dengan menggunakan SEM seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.



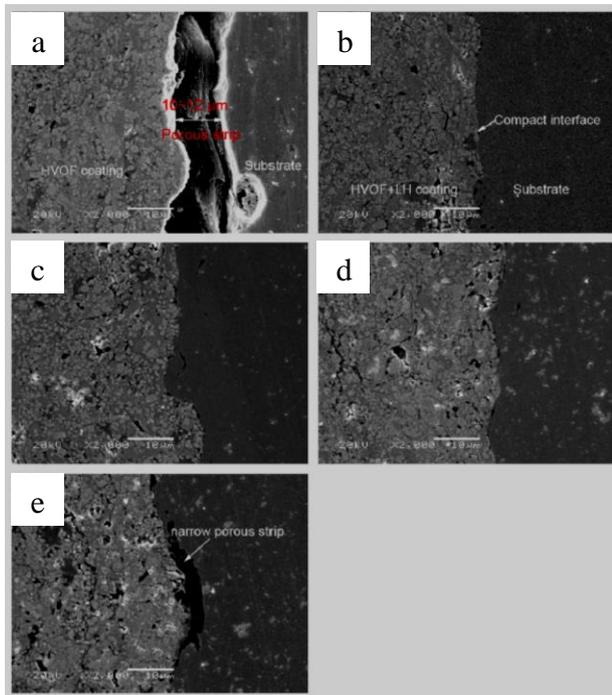
Gambar 8. Pola difraksi lapisan TSC berbahan nano komposit WC-Co dari kondisi *as-spray* hingga perlakuan panas dari 400 hingga 1000°C (Kim et al., 2007).



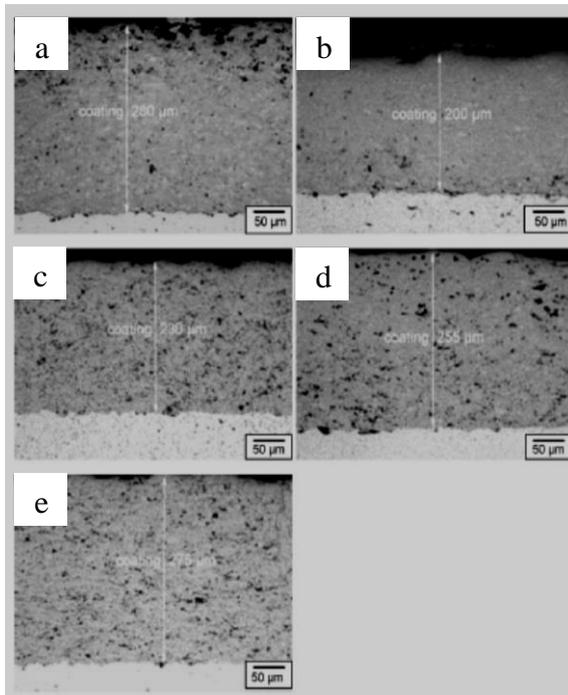
Gambar 9. Penampang lintang lapisan TSC nano komposit WC-Co dengan kondisi perubahan struktur mikro hasil laku panas pada suhu 400°C, 600°C, 800°C, dan 1000°C (Kim et al., 2007).

Sebelumnya, Zhang dkk di tahun 2009 (Zhang et al., 2009) melaporkan kombinasi aplikasi laser dan perlakuan panas (*Laser Heat Treatment / LH*) dapat memperbaiki sifat-sifat lapisan TSC WC-CrC-Ni pada substrat Inconel 718. CO₂ dengan teknik HVOF untuk memperbaiki sifat lapisan dalam hal meminimalkan porositas dan meningkatkan ketahanan aus. Laser yang digunakan memiliki karakter panjang gelombang 10.6 μm, dipaparkan pada lapisan dengan variasi parameter *travelling speed* (antara 300 s/d 600 mm/menit), *iradiances* atau *power density* (38,2 W/mm²), *power* konstan pada 600 W, dan *overlap ratio* konstan pada 30% serta menggunakan gas pelindung argon dengan parameter tekanan 10 MPa dengan debit 5 liter/menit, yang bertujuan mencegah terbentuknya oksidasi pada lapisan selama proses *post-spray*. Hasil dari analisis karakterisasi lapisan didapat yaitu densitas lapisan semakin meningkat berbanding terbalik terhadap *travelling speed*. Didapat juga kondisi dimana hasil proses LH bukan hanya memperbaiki densitas lapisan namun juga densitas pada *interface* dimana keadaan ini ditandai dengan penurunan populasi fraksi porositas pada lapisan, menurunnya fraksi porositas menguntungkan karena dapat meningkatkan kekuatan daya lekat lapisan. Ditunjukkan mikrograf lapisan TSC pada Gambar 10 hasil proses TSC dengan berbagai kondisi *post-spray laser treatment*, Gambar 10a menunjukkan kondisi awal *interface* berporous dengan ukuran 10~12 μm, dan Gambar 10b hingga 10d hasil LH dengan hasil yang ditunjukkan relatif sama. Namun, kondisi yang berbeda terlihat pada Gambar 10e dimana masih terdapat porous berukuran kecil. Zhang dkk juga menyebutkan *heat input* yang kecil dan terbatas karena pengaruh *travelling speed* yang tinggi. Dapat disimpulkan juga semakin tinggi *travelling speed* tidak lagi berkontribusi positif terhadap penurunan porositas sekaligus membatasi kedalaman jarak *heat-affected zone*, sehingga evolusi penutupan porous pada bagian *interface* tidak begitu sempurna seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10e.

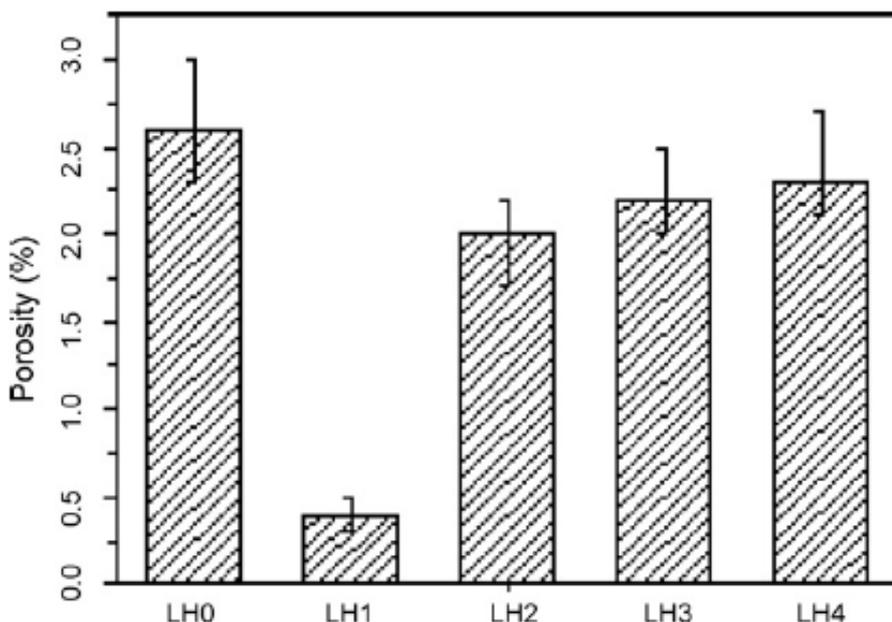
Jika dilihat populasi porositas yang terbentuk pada kondisi *as-spray* (Gambar 10a) berdasarkan data yaitu sebanyak 2,6%, porositas secara drastis menurun setelah perlakuan LH dengan kondisi *travelling speed* 300 mm/menit (0.375%), namun meningkat lagi pada kondisi *travelling speed* yang lebih tinggi hingga mencapai 2.375% pada kondisi LH4 600 mm/menit (Gambar 12). Korelasi terhadap *microhardness* lapisan pun menurun seiring dengan kenaikan *travelling speed* proses LH dari 300 mm/menit (LH1) hingga ke 600 mm/menit (LH4). Dapat disimpulkan bahwa *travelling speed* proses LH dapat mengendalikan densitas lapisan sehingga menyebabkan geometri lapisan susut dan ketebalannya menurun seiring menurunnya *travelling speed*. Dengan penetapan parameter *travelling speed* berturut-turut LH1 (300 mm/menit); LH2 (400 mm/menit); LH3 (500 mm/menit); LH4 (600 mm/menit) menunjukkan pengaruh hasil perlakuan LH dengan variasi parameter *travelling speed* terhadap ketebalan lapisan berturut-turut dari Gambar 11a hingga 11e, yaitu: a) tanpa LH atau LH0, 280 μm; b) LH1, 200 μm; c) LH2, 230 μm; d) LH3, 255 μm; dan e) LH4, 275 μm.



Gambar 10. SEM mikograf hasil proses LH dengan variasi *laser scanning velocity* (mm/menit) dan dampaknya terhadap porositas pada interface, berturut-turut dari Gambar a hingga e, yaitu: a) tanpa LH atau LH0; b) 300; c) 400; d) 500; e) 600 (Zhang et al., 2009).



Gambar 11. SEM mikograf hasil proses LH dengan variasi *laser scanning velocity* (mm/menit) dan dampaknya terhadap ketebalan lapisan TSC, berturut-turut dari Gambar a hingga e, yaitu: a) tanpa LH atau LH0; b) 300; c) 400; d) 500; e) 600 (Zhang et al., 2009).



Gambar 12. Nilai rata-rata porositas yang didapat dari variasi parameter travelling speed proses laser heat treatment (Zhang et al., 2009).

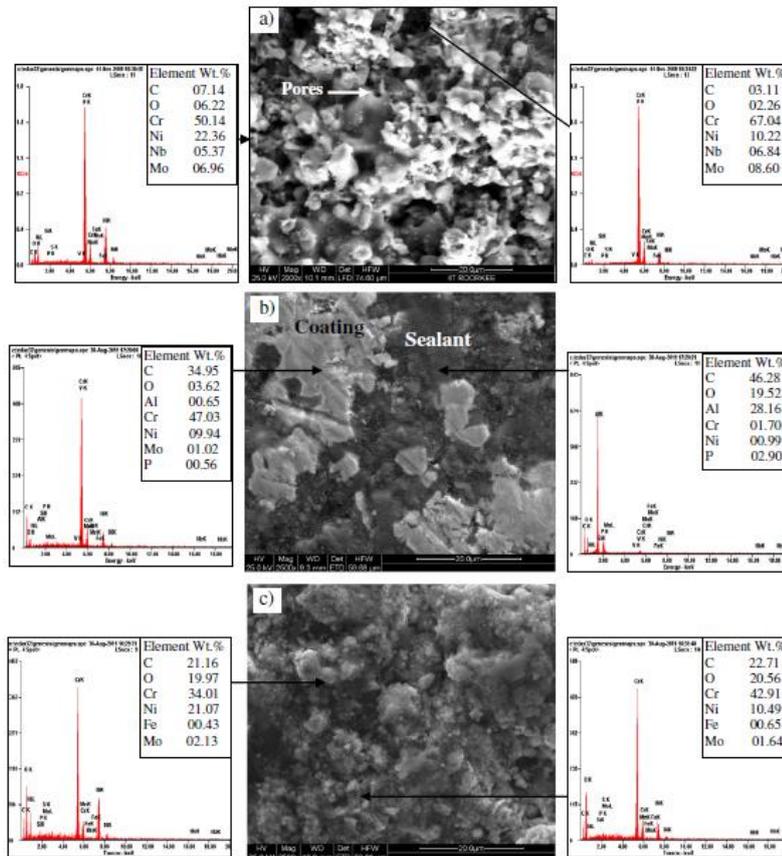
Evolusi struktur mikro pada lapisan yang ditandai dengan penurunan level porositas pun berpengaruh juga terhadap distribusi *microhardness*, dimana nilai *microhardness* yang tertinggi didapat pada kondisi *travelling speed* yang lebih lambat yang disebabkan oleh energi yang diterima lebih banyak dibandingkan dengan energi yang diterima lapisan pada saat *travelling speed* yang lebih tinggi. Peningkatan *microhardness* yang cukup signifikan yaitu semula 983 HVN menjadi 1277 HVN khususnya pada bagian atas lapisan (mendekati permukaan) hal ini disebabkan oleh mekanisme peningkatan fraksi karbida Cr_3C_2 pada matrik Ni setelah perlakuan LH. Selain menurunkan level porositas sampai 0,375%, LH berpengaruh juga membentuk lapisan oksida yang lebih padat serta memperbaiki kohesi antara presipitat karbida dengan matrik Ni.

Chatha dkk di tahun 2021 (Chatha et al., 2012), melakukan pengamatan sekaligus penyempurnaan *post-spray treatment* dengan menggunakan *liquid sealant* berbahan campuran Al_2O_3 dan $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ yang diaplikasikan dengan menggunakan kuas nilon pada lapisan TSC berbahan Cr_3C_2 -NiCr dengan substrat baja T91, *sealant* yang sudah diaplikasikan pada lapisan kemudian dikeringkan pada temperatur kamar selama 2 jam, dan diikuti *curing* pada tiga tahapan temperatur dan waktu penahanan yaitu 100°C (2 jam), 200°C (2 jam), 327°C (2 jam). Secara prinsip *sealant* diaplikasikan untuk menutup *interconnected porosity* lapisan TSC secara kapiler dan kemudian mengisolasi lapisan untuk menghambat korosi.

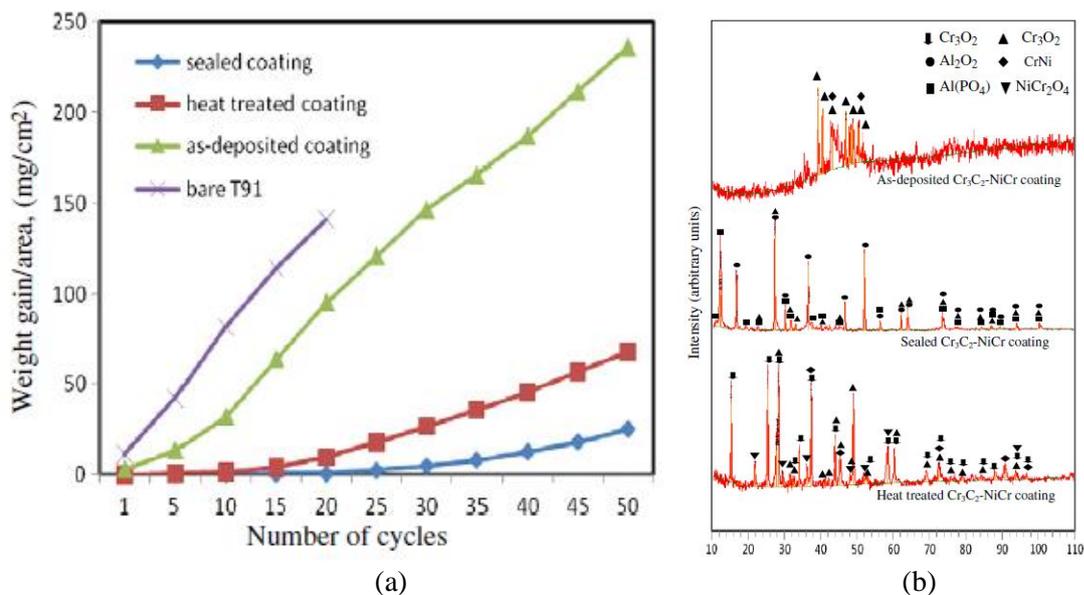
Performa dari hasil proses tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil percobaan kondisi *as-spray* dan lapisan yang hanya dilaku panas. Gambar 13 menunjukkan SEM mikrograf pandangan atas dari lapisan TSC yang dihasilkan dari tiga variasi parameter proses tersebut, dimana morfologi yang terbentuk terlihat pada Gambar 13a adalah tipikal morfologi yang ireguler hasil dari proses TSC tanpa ada perlakuan *post-spray*; Gambar 13b memperlihatkan perbaikan morfologi dari hasil kombinasi proses *post-spray sealing* dan *curing* yang menutup *void* pada lapisan TSC, fasa yang teridentifikasi oleh SEM/EDAX yaitu bagian yang lebih terang kaya akan Cr, C, Ni sedangkan bagian yang lebih gelap menyatakan keberadaan Al, O, P; Gambar 13c menunjukkan morfologi yang seragam tanpa terlihat perbedaan yang kontras, hasil analisis SEM/EDAX menunjukkan keberadaan Cr, C, Ni dan O – dimana meningkatnya O kemungkinan disebabkan oleh pembentukan oksida-oksida Cr dan Ni pada saat *curing*.

Hasil uji korosi suhu tinggi dengan siklik pemanasan pada 900°C di dalam lingkungan garam Na_2SO_4 -60% V_2O_5 selama 1 jam dan pendinginan selama 50 siklus menunjukkan lapisan dengan perlakuan kombinasi *sealing* dan *curing* memiliki performa lebih baik dibandingkan dengan kondisi perlakuan *post-spray* lainnya. Chatha dkk, 2012 melaporkan performa *post-spray* lapisan Cr_3C_2 -NiCr pada substrat baja T91 dengan kombinasi *sealing* dan *curing* efektif untuk meningkatkan ketahanan korosi suhu tinggi, dimana nilai *weight gain* yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan dengan kondisi-kondisi lainnya. Nampak pada kondisi siklus ke-20 tidak terbentuk *weight gain*, dan peningkatan *weight gain* baru dimulai setelah siklus ke-25 sampai ke-50 dengan nilai sekitar 25 mg/cm^2 (Gambar 14 a). Manfaat dari *curing* yang dilakukan setelah *sealing* yaitu dapat meningkatkan adhesi *sealant* dan mampu menutup porous pada permukaan lapisan dengan membentuk lapisan oksida Cr_3O_2 ; Al_2O_2 ; dan AlPO_4 yang padat mengacu pada pola difraksi yang ditunjukkan pada Gambar 14b, *sealing* menutup kemungkinan spesi korosif menjalar menuju substrat. Liu dkk di tahun 2017 (Liu et al., 2017) melaporkan keefektifan penggunaan *chemical sealing* berbahan campuran $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$, $\text{H}_2(\text{AlP}_3\text{O}_{10}) \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{P}_6\text{O}_{18}$ dan AlPO_4 terhadap lapisan *Fe-based Amorphous* dengan substrat baja 316L.

Penentuan prosedur *post-spray* tentu saja dilakukan berdasarkan atas opsi yang akan diambil, bilamana kondisi *as-spray* lapisan TSC belum mencapai persyaratan spesifik untuk operasional sebuah *boiler tubes*. Namun pilihan dari berbagai metode yang telah disampaikan diatas hendaknya dipertimbangkan berdasarkan aspek-aspek berikut, yaitu kompleksitas proses serta teknologi. Terlepas dari keuntungan-keuntungan yang telah dipaparkan dari metode *heat treatment*, *laser heat treatment* terhadap karakteristik sifat lapisan TSC, maka berdasarkan pertimbangan dari aspek kompleksitas proses serta teknologi, biaya, kemudian resiko yang paling minim maka aplikasi *sealing* yang paling cocok untuk diterapkan. Sebagai catatan, *Sealing* yang kompatibel dengan operasional *boiler tubes* ialah jenis inorganik seperti AlPO_4 dan SiO_2 . Untuk *sealing* jenis organik seperti *phenolic resin*, *epoxy resin*, maupun *polyurethane* kebanyakan digunakan untuk *sealing* lapisan TSC yang dikondisikan pada lingkungan air laut. Berikut adalah beberapa alternatif penyedia bahan baku *sealant*, yaitu: PRAXAIR Surface technologies, MSS (NZ) LTD, DIAMANT, Oerlikon Metco, dll.



Gambar 13. SEM/EDAX Mikrograf lapisan TSC $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ dengan teknik HVOF dengan variasi kondisi *post-spray*: a) *as-spray*; b) kombinasi *post-spray sealing* dan *curing*; c) morfologi lapisan TSC setelah laku panas lapisan TSC pada suhu 1000°C , selama 1 jam (Chatha et al., 2012).



Gambar 14. a) Hasil uji korosi suhu tinggi dalam lingkungan garam $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-60\% V}_2\text{O}_5$ selama 1 jam dan pendinginan selama 50 siklus; b) Difraktogram lapisan TSC dengan perlakuan *sealing* dan *curing* (Chatha et al., 2012).

4. KESIMPULAN

Lapisan TSC dapat menjadi cara yang paling hemat sebagai upaya untuk melindungi permukaan substrat terhadap lingkungan korosif dan erosif. Penerapan lain dari TSC ialah dapat merestorasi dimensi, dan memodifikasi sifat termal. TSC dengan teknik HVOF telah terbukti menjadi pilihan teknologi lapis permukaan yang dapat meningkatkan kinerja dan performa banyak peralatan, termasuk yang digunakan pada kondisi temperatur tinggi semisal *boiler tubes*. Teknologi ini sangat diandalkan oleh semua pihak yang berkepentingan untuk memberi perlindungan terhadap lingkungan korosif, erosif, suhu tinggi, dan juga untuk memenuhi kebutuhan untuk memperbaharui dan memelihara banyak peralatan. Secara historis, TSC telah digunakan sebagai teknologi pelapisan. Namun, perkembangan teknologi kini telah mengarah pada penggunaan *feedstock* baik berbentuk serbuk dan kawat berbahan *metal matrix composite*, logam / matrik keramik, dan nanokomposit. Dengan demikian, TSC menjadi alternatif teknologi guna melindungi pipa *boiler* pada kondisi kerja suhu tinggi. Lapisan yang dideposisi melalui Teknik TSC dapat dioptimasi karakteristiknya dengan cara perlakuan *post-spray* yaitu dengan menerapkan Teknik *liquid sealing* berbahan $AlPO_4$ yang dapat menutup *void* di permukaan *coating* dan proses *curing* untuk memadatkan oksida yang terbentuk di permukaan guna memproteksi lapisan TSC dari korosi suhu tinggi. Pengujian menunjukkan bahwa perubahan berat dari lapisan TSC yang telah mengalami *sealing* $AlPO_4$ dan *curing* mengindikasikan perubahan berat yang lebih kecil dibandingkan dengan lapisan TSC yang hanya dikenakan perlakuan panas saja.

Teknik pemeriksaan kualitas *coating* lebih ditekankan pada *destructive test* seperti pengujian daya lekat lapisan, kekerasan lapisan, dan metalografi. Disamping itu dapat diberlakukan juga pengujian-pengujian performa TSC pada temperatur tinggi seperti: *erosion test*, korosi suhu tinggi, *oxidation thermal shock*, dan pengujian mulur (*creep*).

DAFTAR PUSTAKA

- Basuki, E. A. (2016). *Paduan logam untuk aplikasi temperatur tinggi dan penghematan energi*. ITB.
- Bergmann, C. P., & Vicenzi, J. (2011). *Protection against Erosive Wear using Thermal Sprayed Cermet: A Review*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-21987-0>
- Bhatia, R., Singh, H., & Sidhu, B. S. (2012). Characterisation of 80% Cr₃C₂-20% (Ni-20cr) Coating and Erosion Behaviour. *Asian Journal of Engineering and Applied Technology (AJEAT)*. <https://www.trp.org.in/issues/characterisation-of-80-cr3c2-20-ni-20cr-coating-and-erosion-behaviour>
- Bose, S. (2007). OXIDATION- AND CORROSION-RESISTANT COATINGS. In *High Temperature Coatings*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-075068252-7/50007-X>
- Chatha, S. S., Sidhu, H. S., & Sidhu, B. S. (2012). The effects of post-treatment on the hot corrosion behavior of the HVOF-sprayed Cr₃C₂-NiCr coating. *Surface and Coatings Technology*, 206(19–20), 4212–4224. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.04.026>
- Cho, T. Y., Yoon, J. H., Cho, J. Y., Joo, Y. K., Kang, J. H., Zhang, S., Chun, H. G., Hwang, S. Y., & Kwon, S. C. (2009). Surface properties and tensile bond strength of HVOF thermal spray coatings of WC-Co powder onto the surface of 420J2 steel and the bond coats of Ni, NiCr, and Ni/NiCr. *Surface and Coatings Technology*, 203(20–21), 3250–3253. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.04.003>
- Ctibor, P., Lechnerová, R., & Beneš, V. (2006). Quantitative analysis of pores of two types in a plasma-sprayed coating. *Materials Characterization*, 56(4-5 SPEC. ISS.), 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2005.11.016>
- Davis, J. (2004). *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM International. www.asminternational.org
- di Gianfrancesco, A. (n.d.). *Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants* (A. di Gianfrancesco, Ed.). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-04826-5>

- Fantassi, S., Vardelle, M., Fauchais, P., & Moreau, C. (1992). Investigation of the Splat Formation Vs. Different Particulate Temperatures and Velocities Prior to Impact. *Thermal Spray: International Advances in Coatings Technology*, 755–760.
- Fauchais, P. (2015). Current status and future directions of thermal spray coatings and techniques. In *Future Development of Thermal Spray Coatings: Types, Designs, Manufacture and Applications* (pp. 17–49). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-769-9.00002-6>
- Fiedler, T., Groß, R., Rösler, J., & Bäker, M. (2017). Damage mechanisms of metallic HVOF-coatings for high heat flux application. *Surface and Coatings Technology*, 316, 219–225. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.037>
- Guilemany, J. M., Espallargas, N., Suegama, P. H., & Benedetti, A. v. (2006). Comparative study of Cr₃C₂-NiCr coatings obtained by HVOF and hard chromium coatings. *Corrosion Science*, 48(10), 2998–3013. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.10.016>
- Hong, S., Wu, Y., Wang, Q., Ying, G., Li, G., Gao, W., Wang, B., & Guo, W. (2013). Microstructure and cavitation-silt erosion behavior of high-velocity oxygen-fuel (HVOF) sprayed Cr₃C₂-NiCr coating. *Surface and Coatings Technology*, 225, 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.03.020>
- Huda, M., Hudaya, G. K., Ningrum., N. S., & Suganal. (2012). Peluang aplikasi teknologi pengeringan batubara dan blending batubara di indonesia ditinjau dari segi ekonomi dan lingkungan. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, 8(3), 152–163. <https://doi.org/https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol8.No3.2012.787>
- James, M. (2004). Optimum HVOF surface finish recommendation for high-performance dynamic seal applications. *Sealing Technology*, 2004(10), 9–10. [https://doi.org/10.1016/S1350-4789\(04\)00368-X](https://doi.org/10.1016/S1350-4789(04)00368-X)
- Katranidis, V., Gu, S., Allcock, B., & Kamnis, S. (2017). Experimental study of high velocity oxy-fuel sprayed WC-17Co coatings applied on complex geometries. Part A: Influence of kinematic spray parameters on thickness, porosity, residual stresses and microhardness. *Surface and Coatings Technology*, 311, 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.015>
- Kembaiyan, K. T., & Keshavan, K. (1995). Combating severe fluid erosion and corrosion of drill bits using thermal spray coatings. *Wear*, 186–187(PART 2), 487–492. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)07142-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)07142-3)
- Khan, M. N., Shah, S., & Shamim, T. (2019). Investigation of operating parameters on high-velocity oxyfuel thermal spray coating quality for aerospace applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(5–8), 2677–2690. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03696-0>
- Kim, J. H., Baik, K. H., Seong, B. G., & Hwang, S. Y. (2007). Effects of post-spraying heat treatment on wear resistance of WC-Co nanocomposite coatings. *Materials Science and Engineering A*, 449–451, 876–879. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.02.320>
- Kumar, A., Sharma, A., & Goel, S. K. (2016). Erosion behaviour of WC–10Co–4Cr coating on 23-8-N nitronic steel by HVOF thermal spraying. *Applied Surface Science*, 370, 418–426. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.02.163>
- Liu, M. M., Hu, H. X., & Zheng, Y. G. (2017). Effects of three sealing methods of aluminum phosphate sealant on corrosion resistance of the Fe-based amorphous coating. *Surface and Coatings Technology*, 309, 579–589. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.12.033>
- Martides, E., Prawara, B., Ardy, H., Junianto, E., & Priyono, B. (2017). The influence of particles size and composition variation of NiCr-CrC(20NiCr) metal matrix composites coatings properties on boiler tubes application. *Materials Science Forum*, 889 MSF, 30–35. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.889.30>
- Muharom. (n.d.). *Studi Pembangunan Pltu Batubara Minahasa 2 X 55 MW Di Kema, Minahasa Utara, Sulawesi Utara Kaitannya Dengan Tarif Dasar Listrik Regional Menurut UU No 30 Tahun 2009*

- Tentang Ketenagalistrikan*. Retrieved August 20, 2022, from <http://digilib.its.ac.id/public/ITS-Undergraduate-12865-Paper.pdf>
- Murugan, K., Ragupathy, A., Balasubramanian, V., & Sridhar, K. (2014). Optimizing HVOF spray process parameters to attain minimum porosity and maximum hardness in WC-10Co-4Cr coatings. *Surface and Coatings Technology*, 247, 90–102. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.03.022>
- Oksa, M., Turunen, E., Suhonen, T., Varis, T., & Hannula, S. P. (2011). Optimization and characterization of high velocity oxy-fuel sprayed coatings: Techniques, materials, and applications. *Coatings*, 1(1), 17–52. <https://doi.org/10.3390/coatings1010017>
- Pawłowski, Lech. (2008). *The science and engineering of thermal spray coatings*. Wiley.
- Picas, J. A., Rupérez, E., Punset, M., & Forn, A. (2013). Influence of HVOF spraying parameters on the corrosion resistance of WC-CoCr coatings in strong acidic environment. *Surface and Coatings Technology*, 225, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.03.015>
- Prasetyo. (n.d.). *Studi Pembangunan PLTU Tanah Grogot 2x7 MW Di Kabupaten Paser Kalimantan Timur Dan Pengaruh Terhadap Tarif Listrik Regional Kalimantan Timur*. Retrieved August 20, 2022, from <http://digilib.its.ac.id/ITS-Undergraduate-3100010039836/12408>
- Rhys-Jones, T. N. (1990). The use of thermally sprayed coatings for compressor and turbine applications in aero engines. In *Surface and Coatings Technology*. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(90\)90109-P](https://doi.org/10.1016/0257-8972(90)90109-P)
- Riyanto, E., & Prawara, B. (2010). Mikrostruktur dan Karakterisasi Sifat Mekanik Lapisan Cr₃C₂-NiAl-Al₂O₃ Hasil Deposisi Dengan Menggunakan High Velocity Oxygen Fuel Thermal Spray Coating. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 01(1), 1–4. <https://doi.org/10.14203/j.mev.2010.v1.1-4>
- Sadeghimeresht, E., Markocsan, N., Nylén, P., & Björklund, S. (2016). Corrosion performance of bi-layer Ni/Cr 2 C 3 -NiCr HVOF thermal spray coating. *Applied Surface Science*, 369, 470–481. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.02.002>
- Schneider, I. K. E., Belashchenko, V., Dratwinski, M., Siegmann, S., & Zagorski, A. (2006). *Thermal Spraying for Power Generation Components*.
- Sidhu, T. S., Prakash, S., & Agrawal, R. D. (2005). Studies on the properties of high-velocity oxy-fuel thermal spray coatings for higher temperature applications. *Materials Science*, 41(6), 805–823.
- Sidhu, T. S., Prakash, S., & Agrawal, R. D. (2006). Characterizations and hot corrosion resistance of Cr₃C₂-NiCr coating on Ni-base superalloys in an aggressive environment. *Proceedings of the International Thermal Spray Conference*, 811–816. <https://doi.org/10.1361/105996306X147162>
- Sivakumar, R., & Mordike, B. L. (1989). High temperature coatings for gas turbine blades: A review. *Surface and Coatings Technology*, 37(2), 139–160. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(89\)90099-6](https://doi.org/10.1016/0257-8972(89)90099-6)
- Stokes, J. (2005). *The Theory and Application of the HVOF Thermal Spray Process*.
- Stringer, J. (1998). Coatings in the electricity supply industry: past, present, and opportunities for the future. *Surface and Coatings Technology*, 108, 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00642-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00642-2)
- Szymański, K., Hernas, A., Moskal, G., & Myalska, H. (2015). Thermally sprayed coatings resistant to erosion and corrosion for power plant boilers - A review. *Surface and Coatings Technology*, 268, 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.10.046>
- Thakur, L., & Arora, N. (2017). A study of processing and slurry erosion behaviour of multi-walled carbon nanotubes modified HVOF sprayed nano-WC-10Co-4Cr coating. *Surface and Coatings Technology*, 309, 860–871. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.10.073>
- Vignesh, S., Shanmugam, K., Balasubramanian, V., & Sridhar, K. (2017). Identifying the optimal HVOF spray parameters to attain minimum porosity and maximum hardness in iron based

- amorphous metallic coatings. *Defence Technology*, 13(2), 101–110.
<https://doi.org/10.1016/j.dt.2017.03.001>
- Waldi, M., Basuki, E. A., & Prawara, B. (2018). Quality characterization of HVOF thermal spray coating with NiCr matrix composite for protection application of coal fired boiler tubes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 432(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/432/1/012011>
- Wu, Y. S., Qiu, W. Q., Yu, H. Y., Zhong, X. C., Liu, Z. W., Zeng, D. C., & Li, S. Z. (2011). Cycle oxidation behavior of nanostructured Ni60-TiB 2 composite coating sprayed by HVOF technique. *Applied Surface Science*, 257(23), 10224–10232.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.07.026>
- Yang, Q., Senda, T., & Ohmori, A. (2003). Effect of carbide grain size on microstructure and sliding wear behavior of HVOF-sprayed WC-12% Co coatings. *Wear*, 254, 23–34.
- Zhang, S. H., Cho, T. Y., Yoon, J. H., Li, M. X., Shum, P. W., & Kwon, S. C. (2009). Investigation on microstructure, surface properties and anti-wear performance of HVOF sprayed WC-CrC-Ni coatings modified by laser heat treatment. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 162(2), 127–134.
<https://doi.org/10.1016/j.mseb.2009.03.017>