



MONOGRAF

**REKAYASA LAPISAN
FeCrAlTiY – MCrAlY
PADA BAJA KARBON
UNTUK APLIKASI
TEMPERATURE TINGGI:**

PEMBENTUKAN, KARAKTERISASI,
KINERJA OKSIDASI -KOROSI, DAN PROSPEK APLIKASI

Editor: Dr. Eka Kartika Silalahi, S.Si.,M.Pd

REKAYASA LAPISAN $\text{FeCrAlTiY} - \text{MCrAlY}$
PADA BAJA KARBON UNTUK APLIKASI TEMPERATURE
TINGGI PEMBENTUKAN, KARAKTERISASI, KINERJA
OKSIDASI-KOROSI, DAN PROSPEK APLIKASI

Assoc. Prof. Dr. Dedi Holden Simbolon, S.Si., M.Pd



Tahta Media Group

UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

**REKAYASA LAPISAN FeCrAlTiY - MCrAlY
PADA BAJA KARBON UNTUK APLIKASI TEMPERATURE TINGGI:
PEMBENTUKAN, KARAKTERISASI, KINERJA OKSIDASI -KOROSI, DAN
PROSPEK APLIKASI**

Penulis:

Assoc. Prof. Dr. Dedi Holden Simbolon, S.Si., M.Pd

Desain Cover:

Tahta Media

Editor:

Dr. Eka Kartika Silalahi, S.Si., M.Pd

Proofreader:

Tahta Media

Ukuran:

xi, 152, Uk: 15,5 x 23 cm

ISBN: 978-634-262-309-1

Cetakan Pertama:

September 2026

Hak Cipta 2026, Pada Penulis

Isi diluar tanggung jawab percetakan

Copyright © 2026 by Tahta Media Group

All Right Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini
tanpa izin tertulis dari Penerbit.

PENERBIT TAHTA MEDIA GROUP

Perumahan Mitra Utama Residence 3 Blok A no 1, Sawahan, Tempel,
Kec. Gatak, Kabupaten Sukoharjo, Jawa Tengah 57557

email: tahtaliterasimedia@gmail.com

website: <http://store.tahtamedia.co.id/>

Anggota IKAPI (216/JTE/2021)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas kasih, penyertaan, dan anugerah-Nya sehingga buku monograf ini dapat diselesaikan. Buku ini disusun sebagai salah satu bentuk pengembangan dan diseminasi hasil penelitian mengenai rekayasa lapisan pelindung FeCrAlTiY-MCrAlY pada baja karbon rendah ST41 untuk menghadapi oksidasi dan korosi pada lingkungan bertemperatur tinggi.

Baja karbon masih digunakan secara luas dalam sistem industri karena memiliki kekuatan mekanik yang memadai, mudah difabrikasi, tersedia dalam jumlah besar, dan relatif ekonomis. Meskipun demikian, penggunaannya pada temperatur tinggi menghadapi tantangan serius berupa pembentukan kerak oksida, peningkatan laju korosi, retak termal, pengelupasan, dan penurunan integritas material. Permasalahan tersebut mendorong pengembangan teknologi pelapisan permukaan yang mampu memperpanjang umur pakai komponen tanpa harus mengganti keseluruhan material dengan paduan yang lebih mahal.

Pembahasan dalam buku ini diarahkan pada hubungan antara komposisi bahan pelapis, teknologi pembentukan lapisan, karakteristik mikrostruktur, evolusi fasa, dan kinerja lapisan selama paparan temperatur tinggi. Sistem FeCrAlTiY-MCrAlY dipilih karena mengandung unsur-unsur yang berpotensi membentuk oksida protektif, terutama Al_2O_3 , Cr_2O_3 , serta oksida spinel. Peranan Fe, Cr, Al, Ti, Y, Co, dan Ni dijelaskan secara terpadu untuk memberikan pemahaman mengenai mekanisme pembentukan kerak oksida, penghambatan difusi spesies reaktif, peningkatan adhesi, dan pengendalian degradasi lapisan.

Hasil penelitian yang disajikan mencakup penggunaan teknik flame spray, optimalisasi gas pembawa nitrogen, serta pengembangan lapisan melalui spark plasma sintering. Evaluasi dilakukan melalui pengujian oksidasi siklik dan korosi NaCl pada temperatur 700 °C, analisis perubahan massa, karakterisasi fasa menggunakan difraksi sinar-X, serta pengamatan mikrostruktur dan distribusi unsur menggunakan SEM-EDS. Perbandingan komposisi 0%, 10%, 20%, dan 30% MCrAlY menunjukkan bahwa kinerja lapisan tidak hanya ditentukan oleh jumlah unsur pembentuk oksida protektif, tetapi juga dipengaruhi oleh porositas, homogenitas, oksidasi selama proses deposisi, kontinuitas fasa, dan integritas antarmuka lapisan-substrat.

Berdasarkan rangkaian hasil penelitian, komposisi FeCrAlTiY-30% MCrAlY menunjukkan kinerja paling baik di antara variasi yang diuji. Penggunaan nitrogen sebagai gas pembawa mampu menekan oksidasi selama proses flame spray, sedangkan spark plasma sintering menghasilkan lapisan yang lebih rapat dengan porositas minimum. Temuan tersebut menegaskan bahwa optimalisasi sistem pelapis perlu dilakukan melalui pendekatan terpadu antara rekayasa komposisi dan pengendalian parameter proses.

Buku ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi mahasiswa, dosen, peneliti, dan praktisi yang mendalami bidang ilmu material, rekayasa permukaan, pelapisan logam, oksidasi, korosi temperatur tinggi, serta pengembangan material untuk sistem energi dan industri. Uraian yang disajikan juga diharapkan dapat mendukung pengembangan lapisan pelindung untuk boiler, sistem perpipaan, pembangkit listrik, dan komponen industri lain yang beroperasi dalam lingkungan termal dan korosif.

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan akademik, fasilitas penelitian, pemikiran, dan motivasi selama pelaksanaan penelitian

hingga penyusunan buku ini. Penghargaan juga disampaikan kepada para peneliti terdahulu yang karya ilmiahnya menjadi landasan dalam membangun pembahasan dan analisis komparatif di dalam buku.

Penulis menyadari bahwa pembahasan dalam buku ini masih memiliki keterbatasan, khususnya berkaitan dengan durasi pengujian, variasi lingkungan korosif, skala spesimen, dan validasi pada kondisi operasi industri. Oleh karena itu, kritik dan saran yang konstruktif sangat diharapkan untuk penyempurnaan serta pengembangan penelitian berikutnya. Semoga buku ini memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya dalam bidang material maju dan teknologi pelapisan untuk perlindungan logam pada temperatur tinggi.

Medan, Agustus 2026
Penulis,

Assoc. Prof. Dr. Dedi Holden Simbolon, S.Si., M.Pd

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	x
BAB 1 BAJA KARBON DALAM LINGKUNGAN TEMPERATUR	
TINGGI	1
A. Peranan Baja Karbon dalam Sistem Industri	1
B. Karakteristik Baja Karbon Rendah ST41	5
C. Degradasi Baja Karbon pada Temperatur Tinggi.....	7
D. Oksidasi dan Korosi Temperatur Tinggi	11
E. Urgensi Pengembangan Lapisan Pelindung	15
BAB 2 SISTEM PELAPIS FeCrAlTiY–MCrAlY	21
A. Konsep Dasar Pelapisan Logam	21
B. Karakteristik Paduan FeCrAlTiY	26
C. Karakteristik Paduan MCrAlY.....	30
D. Peranan Unsur Fe, Cr, Al, Ti, Y, Co, dan Ni	34
E. Pembentukan Fasa Oksida dan Mekanisme Perlindungan....	41
BAB 3 TEKNOLOGI PEMBENTUKAN DAN EVALUASI	
LAPISAN.....	53
A. Preparasi Substrat dan Serbuk Pelapis	53
B. Variasi Komposisi FeCrAlTiY–MCrAlY	56
C. Pelapisan dengan Teknik <i>Flame Spray</i>	59
D. Pengujian dan Karakterisasi Lapisan	62
BAB 4 KOMPOSISI DAN KINERJA LAPISAN.....	76
A. Karakteristik Lapisan Sebelum Oksidasi	76
B. Pengaruh Penambahan MCrAlY Terhadap Struktur Fasa	79
C. Pengaruh Komposisi terhadap Mikrostruktur Lapisan	80
D. Kinetika dan Mekanisme Oksidasi Siklik	83

E. Penentuan Komposisi Optimum FeCrAlTiY–30% MCrAlY ..	86
BAB 5 OPTIMALISASI, MEKANISME PERLINDUNGAN, DAN	
PROSPEK APLIKASI	96
A. Optimalisasi <i>Flame Spray</i> Menggunakan Gas Nitrogen	96
B. Optimalisasi Lapisan Menggunakan <i>Spark Plasma Sintering</i> ..	99
C. Perbandingan Kinerja <i>Flame Spray</i> dan <i>Spark Plasma Sintering</i>	101
D. Mekanisme Perlindungan terhadap Oksidasi dan Korosi ...	105
E. Aplikasi Industri dan Arah Pengembangan Riset	113
GLOSARIUM.....	121
DAFTAR PUSTAKA	143
PROFIL PENULIS.....	151

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Rangkaian degradasi baja karbon pada paparan temperatur tinggi.....	10
Gambar 2. 1 Arsitektur fungsional sistem pelapis temperatur tinggi	23
Gambar 2. 2 Dua jalur pembentukan produk oksidasi pada lapisan multikomponen	43
Gambar 3. 1 Alur preparasi kupon sebelum <i>Flame Spray</i>	55
Gambar 3. 2 Mekanisme pembentukan lapisan <i>Flame Spray</i>	62
Gambar 3. 3 Perubahan Massa Lapisan FeCrAlTiY–30% MCrAlY Hasil <i>Flame Spray</i> Nitrogen.....	71
Gambar 4. 1 Hubungan kondisi as-sprayed dengan respons oksidasi	78
Gambar 4. 2 Perubahan massa setelah delapan siklus oksidasi pada 700 °C	85
Gambar 4. 3 Jalur perlindungan oksida campuran selama oksidasi siklik	85
Gambar 5. 1 Perbandingan pertambahan massa setelah delapan siklus pada 700 °C	102
Gambar 5. 2 Rangkaian perlindungan ideal lapisan FeCrAlTiY–MCrAlY	105

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Peranan baja karbon dan tantangan pada sistem bertemperatur tinggi	2
Tabel 1. 2 Komposisi kimia baja ST41 yang digunakan sebagai substrat.....	5
Tabel 1. 3 Perbandingan mekanisme lingkungan temperatur tinggi.	13
Tabel 1. 4 Perbandingan hasil penelitian baja dan lapisan pada temperatur tinggi.....	18
Tabel 2. 1 Hubungan prinsip proses dengan karakter lapisan logam	24
Tabel 2. 2 Komposisi serbuk FeCrAlTiY yang digunakan.....	27
Tabel 2. 3 Komposisi serbuk MCrAlY yang digunakan.....	31
Tabel 2. 4 Fungsi dan risiko unsur utama pada sistem FeCrAlTiY– MCrAlY	35
Tabel 2. 5 Perbandingan fungsi Co dan Ni dalam MCrAlY	39
Tabel 2. 6 Interpretasi fasa oksida dan spinel pada sistem pelapis	44
Tabel 2. 7 Perbandingan mekanisme proteksi produk oksidasi utama.....	47
Tabel 2. 8 Perbandingan hasil penelitian sistem FeCrAlTiY dan MCrAlY	51
Tabel 3. 1 Tahapan preparasi substrat dan titik kendali mutu	56
Tabel 3. 2 Formulasi campuran FeCrAlTiY–MCrAlY untuk batch 60 g.....	58
Tabel 3. 3 Parameter utama deposisi Flame Spray	61
Tabel 3. 4 Matriks bukti untuk evaluasi kinerja lapisan	62
Tabel 3. 5 Jadwal satu rangkaian pengujian oksidasi siklik	65
Tabel 3. 6 Titik kendali pengujian korosi NaCl 700°C.....	67
Tabel 3. 7 Ringkasan perubahan massa setelah delapan siklus pada 700°C.....	71

Tabel 3. 8 Fungsi pembacaan fasa pada setiap kondisi.....	73
Tabel 4. 1 Identifikasi fasa lapisan sebelum oksidasi	78
Tabel 4. 2 Komposisi EDS representatif lapisan FeCrAlTiY-30% MCrAlY sebelum oksidasi.....	82
Tabel 4. 3 Perbandingan kinerja keempat komposisi setelah delapan siklus.....	88
Tabel 4. 4 Evolusi fasa sebagai fungsi komposisi.....	91
Tabel 4. 5 Komposisi EDS representatif FeCrAlTiY-30% MCrAlY setelah oksidasi	92
Tabel 5. 1 Parameter dan indikator optimalisasi Flame Spray-N ₂	98
Tabel 5. 2 Hubungan parameter SPS, perubahan struktur, dan risiko skala	101
Tabel 5. 3 Matriks pemilihan teknologi	104
Tabel 5. 4 Indikator diagnosis mekanisme dan kegagalan.....	112
Tabel 5. 5 Roadmap pengembangan dan kriteria keputusan.....	120

BAB 1

BAJA KARBON DALAM LINGKUNGAN TEMPERATUR TINGGI

A. PERANAN BAJA KARBON DALAM SISTEM INDUSTRI

Baja karbon merupakan kelompok paduan berbasis besi yang perilaku mekanik dan teknologinya terutama ditentukan oleh kadar karbon, meskipun unsur seperti mangan, silikon, fosfor, dan sulfur tetap mempengaruhi kekuatan, kebersihan metalurgi, serta kemampuan fabrikasi. Dominasi baja karbon dalam rekayasa tidak hanya disebabkan oleh harga bahan baku. Infrastruktur peleburan, pembentukan, pengelasan, pemesinan, inspeksi, dan perbaikannya telah matang sehingga material ini dapat diproduksi dalam bentuk pelat, pipa, profil, batang, maupun komponen las dengan mutu yang relatif konsisten.

Dalam sistem industri, baja karbon menjalankan dua fungsi utama. Pertama, sebagai elemen penahan beban pada rangka, rumah peralatan, dudukan, dan struktur pendukung. Kedua, sebagai batas tekan atau media alir pada pipa, bejana, tangki, penukar kalor, serta bagian tertentu dari ketel dan tungku. Satu komponen sering mengemban kedua fungsi tersebut sekaligus. Karena itu, pemilihannya harus mempertimbangkan tegangan mekanik, temperatur, komposisi lingkungan, geometri sambungan, dan akses untuk pemeliharaan; kekuatan tarik pada temperatur ruang saja tidak cukup menggambarkan kinerja layan.

Pertimbangan temperatur menjadi semakin penting pada industri energi dan proses. Peningkatan temperatur uap pada pembangkit meningkatkan efisiensi termal, tetapi pada saat yang sama mempercepat oksidasi, korosi, deformasi bergantung waktu, dan perubahan mikrostruktur material. Analisis pembangkit ultra-superkritis lanjut menunjukkan bahwa kenaikan parameter uap merupakan bagian penting dari upaya menekan penalti energi dan emisi spesifik, namun menuntut material yang lebih tahan pada lingkungan bertemperatur tinggi (Tramošljika et al., 2021). Dengan demikian, isu material berkaitan langsung dengan efisiensi proses, keselamatan, kontinuitas operasi, dan biaya siklus hidup.

Pada rentang temperatur menengah, penggunaan baja karbon masih menarik karena komponen dapat dibuat dan diganti dengan biaya lebih rendah daripada paduan tahan panas berkadar kromium dan nikel tinggi. Akan tetapi, keuntungan ekonomi awal tersebut dapat hilang apabila laju pembentukan kerak, penipisan dinding, atau pengelupasan oksida memaksa penghentian operasi yang sering. Keputusan rekayasa yang rasional karenanya membandingkan biaya awal, umur layan, konsekuensi kegagalan, dan kemudahan reparasi.

Tabel 1. 1 Peranan baja karbon dan tantangan pada sistem bertemperatur tinggi

Sistem/ komponen	Fungsi baja karbon	Paparan utama	Risiko degradasi dominan
Pipa dan bejana proses	Batas tekan dan saluran fluida	Panas, uap, gas reaktif	Oksidasi internal/eksternal dan penipisan dinding
Ketel dan pemulih panas	Penerima serta penyalur panas	Gas pembakara,	Kerak berlapis, korosi sisi api,

Sistem/ komponen	Fungsi baja karbon	Paparan utama	Risiko degradasi dominan
		uap air, deposit	dan deformasi termal
Tungku dan saluran gas	Selubung, penyangga, serta dudukan	Siklus panas– dingin dan oksigen	Retak termal, pengelupasan kerak, dan distorsi
Penukar kalor	Pemisah dua media dan penghantar panas	Gradien temperatur dan fluida korosif	Korosi dipercepat panas dan kehilangan efisiensi perpindahan panas
Peralatan pembakaran/ limbah	Struktur dan permukaan penahan	Klorida, sulfat, abu, dan gas	Korosi panas serta serangan aktif di bawah deposit

Sumber: Tramošljika et al. (2021), Burja et al. (2023), dan Sadeghi et al. (2019b).

Kinerja baja karbon juga harus dipandang sebagai bagian dari suatu sistem. Temperatur logam dapat berbeda dari temperatur gas karena dipengaruhi perpindahan panas, deposit, ketebalan dinding, dan kondisi aliran. Sambungan las, tepi, daerah dengan perubahan ketebalan, serta lokasi deposit cenderung menciptakan konsentrasi tegangan atau selisih temperatur lokal. Pada lokasi tersebut, oksidasi dan kerusakan mekanik dapat saling memperkuat. Kerak yang retak membuka permukaan baru, sedangkan penipisan penampang menaikkan tegangan kerja pada logam yang tersisa.

Penggunaan baja karbon pada temperatur tinggi karena itu tidak identik dengan anggapan bahwa material tersebut intrinsik tahan panas. Dalam banyak aplikasi, baja karbon dipertahankan sebagai substrat yang memberikan bentuk dan kekuatan, sementara permukaan direkayasa untuk menghadapi lingkungan. Konsep pemisahan fungsi ini merupakan dasar teknologi lapisan pelindung: material curah yang ekonomis dipadukan dengan lapisan tipis yang mempunyai kimia permukaan lebih sesuai.

Hasil Simbolon et al. (2020) memberikan bukti eksperimental bagi konsep pemisahan fungsi tersebut. Baja karbon tetap digunakan sebagai substrat, sedangkan lapisan FeCrAlTiY-MCrAlY menyediakan perlindungan saat paparan siklik 700°C; komposisi 30% massa MCrAlY menghasilkan pertambahan massa terendah di antara variasi yang diuji. Temuan itu melengkapi analisis Tramošljika et al. (2021), yang menekankan kebutuhan material tahan panas untuk peningkatan parameter uap pembangkit. Perbedaannya terletak pada skala solusi: Tramošljika et al. membahas kebutuhan material sistem pembangkit, sedangkan Simbolon et al. menunjukkan bahwa kebutuhan tersebut dapat dijawab melalui rekayasa permukaan pada substrat baja karbon yang ekonomis.

Baja ST41 pada kajian ini mewakili baja karbon rendah yang mudah diperoleh dan difabrikasi. Material tersebut relevan sebagai model substrat bagi komponen industri yang secara normal ekonomis, tetapi memerlukan peningkatan ketahanan ketika terpapar sekitar 700°C. Pemahaman mengenai peranan industrinya memberi konteks bahwa tujuan pelapisan bukan sekadar menurunkan pertambahan massa dalam pengujian, melainkan memperpanjang interval inspeksi dan menjaga integritas komponen pada kondisi layan yang agresif.

B. KARAKTERISTIK BAJA KARBON RENDAH ST41

Baja karbon rendah umumnya mempunyai matriks ferit dengan fraksi perlit yang terbatas. Karbon yang terlarut dan terikat dalam sementit menaikkan kekuatan, tetapi kenaikan kadarnya cenderung mengurangi keuletan dan kemampuan las. Pada baja berkadar karbon rendah, dominasi ferit menjelaskan kombinasi keuletan, kemampuan pembentukan, dan kemudahan penyambungan yang menjadikannya sesuai untuk komponen umum. Penelitian mengenai pemanasan cepat pada baja karbon rendah menunjukkan bahwa laju pemanasan, temperatur puncak, dan waktu tahan dapat mengubah morfologi mikrostruktur serta sifat mekaniknya secara berarti (Castro Cerda et al., 2016).

Material substrat yang dikarakterisasi oleh Simbolon (2022) adalah baja ST41. Analisis komposisi menunjukkan kadar karbon 0,0989% massa dengan besi sebagai unsur utama sebesar 98,90% massa (Simbolon, 2022). Nilai karbon tersebut menempatkannya dalam karakter baja karbon rendah. Data aktual ini lebih penting bagi pembahasan mekanisme daripada hanya mengandalkan nama dagang atau kelas material, karena oksidasi dipengaruhi pula oleh unsur minor dan kondisi permukaan spesimen.

Tabel 1. 2 Komposisi kimia baja ST41 yang digunakan sebagai substrat

Unsur	Kadar (% massa)	Unsur	Kadar (% massa)
Fe	98,90	Mn	0,499
Si	0,239	C	0,0989
Cr	0,0419	Cu	0,0108
Ni	0,0199	Ta	0,0530
P	0,0174	S	0,0029
Ti	0,0133	Al	0,0435

Mangan pada komposisi tersebut membantu penguatan larutan padat dan mengikat sulfur, sedangkan silikon berperan sebagai deoksidator dalam pembuatan baja. Kadar kromium, nikel, dan aluminium sangat rendah sehingga tidak memadai untuk membentuk secara kontinu kerak kaya Cr_2O_3 atau Al_2O_3 yang lazim menjadi penghalang difusi pada paduan tahan oksidasi. Dengan demikian, respons permukaan ST41 pada temperatur tinggi terutama mengikuti perilaku oksidasi besi, bukan perilaku paduan pembentuk alumina atau kromia.

Kecenderungan tersebut sejalan dengan hasil Kwon et al. (2023) pada baja karbon rendah dan baja paduan rendah yang mengandung 0–0,98% massa Cr dalam udara lembap pada 600–1000°C. Peningkatan Cr menurunkan laju oksidasi dan mempercepat peralihan menuju pertumbuhan yang dikendalikan difusi, tetapi kadar di bawah 1% belum membentuk kromia kontinu. Karena kadar Cr ST41 hanya 0,0419% massa, ketahanannya secara intrinsik bahkan lebih terbatas. Perbandingan ini mendukung interpretasi Simbolon (2022) bahwa ST41 memerlukan sumber Al dan Cr dari lapisan, bukan mengandalkan unsur paduan substrat.

Secara mikrostruktural, ferit yang relatif lunak mendukung deformasi plastis dan mengurangi risiko retak saat fabrikasi. Fraksi perlit memberikan kontribusi terhadap kekuatan melalui susunan ferit–sementit. Keseimbangan tersebut menguntungkan pada temperatur ruang, tetapi tidak otomatis dipertahankan selama paparan panas. Difusi menjadi lebih cepat, dislokasi dapat mengalami pemulihan, karbida dapat berubah, dan sifat mekanik menurun seiring bertambahnya temperatur serta waktu paparan.

Temperatur uji 700°C berada dekat wilayah transformasi bawah baja karbon sederhana. Posisi transformasi aktual bergantung pada komposisi, riwayat termal, dan laju pemanasan; karena itu tidak tepat

mengasumsikan seluruh substrat langsung berubah menjadi austenit. Meskipun demikian, temperatur tersebut cukup tinggi untuk mengaktifkan difusi, pelunakan, pertumbuhan oksida, dan evolusi tegangan termal. Pada paparan berulang, kondisi awal setelah setiap pendinginan juga tidak sepenuhnya sama karena kerak dan mikrostruktur telah mengalami perubahan pada siklus sebelumnya.

Karakteristik lain yang penting adalah keadaan permukaan. Kekasaran, kontaminasi, sisa oksida, dan tegangan residual memengaruhi pembasahan partikel semprot serta penguncian mekanis lapisan. Pada proses pelapisan termal, persiapan permukaan harus menghasilkan profil jangkar yang memadai tanpa meninggalkan kontaminan yang menghambat ikatan. Ketebalan substrat juga menentukan respons termal; spesimen tipis lebih cepat mengikuti perubahan temperatur dan dapat mengalami gradien serta deformasi yang berbeda dari komponen tebal.

Keunggulan ST41 terletak pada kemudahan pemotongan, pembentukan, dan pengelasan serta biaya yang relatif rendah. Keterbatasan utamanya pada lingkungan bertemperatur tinggi ialah ketiadaan cadangan unsur pembentuk oksida protektif. Oleh sebab itu, ST41 tepat digunakan untuk menunjukkan manfaat rekayasa permukaan: substrat menyediakan fungsi mekanik, sementara lapisan dirancang sebagai reservoir aluminium dan kromium yang mengendalikan interaksi dengan lingkungan.

C. DEGRADASI BAJA KARBON PADA TEMPERATUR TINGGI

Degradasi temperatur tinggi mencakup perubahan kimia, mikrostruktur, dan mekanik yang menurunkan kemampuan material menjalankan fungsinya. Pada baja karbon, oksidasi biasanya menjadi gejala permukaan yang paling nyata, tetapi kerusakan tidak berhenti

pada pembentukan kerak. Pertumbuhan oksida mengonsumsi logam, mengubah dimensi, menciptakan tegangan, dan dapat mengurangi perpindahan panas. Secara bersamaan, logam dasar mengalami pelunakan dan, bila menerima tegangan dalam waktu lama, deformasi bergantung waktu.

Oksidasi bermula dari adsorpsi oksigen pada permukaan, disosiasi molekul, pembentukan inti oksida, dan pertumbuhan lapisan melalui perpindahan ion serta elektron. Pada besi, kerak pada temperatur tinggi dapat tersusun atas FeO di dekat logam, Fe_3O_4 pada bagian antara, dan Fe_2O_3 di sisi gas. Susunan aktual berubah menurut temperatur, tekanan parsial oksigen, waktu, dan keberadaan uap atau pengotor. Tahap awal sangat menentukan karena kontinuitas serta cacat kerak yang terbentuk akan mengendalikan jalur difusi berikutnya (Zhong & Webler, 2024).

Apabila kerak cukup rapat dan melekat, pertumbuhan oksida sering didekati dengan hukum parabolik. Hubungan ini menyatakan bahwa laju reaksi menurun ketika jarak difusi melalui kerak bertambah. Untuk pertambahan massa per satuan luas, bentuk sederhananya dituliskan sebagai:

$$(\Delta m/A)^2 = k_p t + C$$

dengan $\Delta m/A$ sebagai perubahan massa per satuan luas, k_p sebagai konstanta laju parabolik, t sebagai waktu, dan C sebagai konstanta yang mewakili keadaan awal. Nilai k_p sangat sensitif terhadap temperatur dan dapat dihubungkan dengan bentuk Arrhenius:

$$k_p = k_0 \exp(-Q/RT)$$

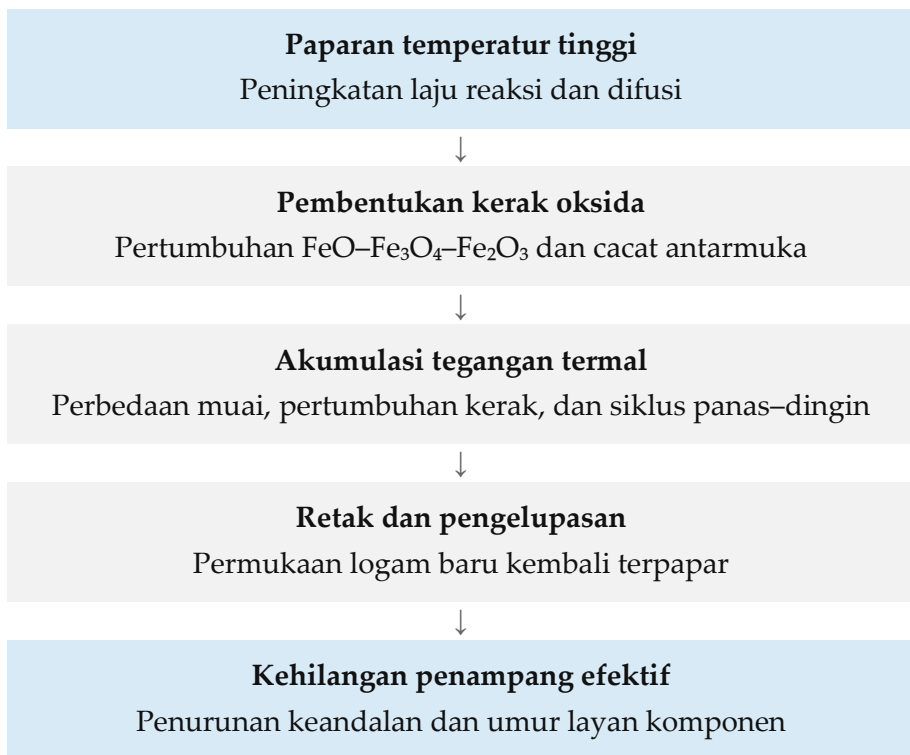
Pada persamaan tersebut, k_0 adalah faktor pra-eksponensial, Q energi aktivasi semu, R konstanta gas, dan T temperatur mutlak. Persamaan ini berguna untuk membandingkan sistem, tetapi penerapannya mensyaratkan mekanisme yang relatif tetap. Jika kerak

retak atau terkelupas, permukaan logam segar terbuka dan kurva massa dapat menyimpang dari perilaku parabolik. Penurunan massa bahkan tidak selalu menandakan ketahanan yang baik karena produk oksidasi mungkin telah terlepas dari spesimen.

Penelitian pada baja karbon Q275 memperlihatkan bahwa oksidasi 500–700°C mengikuti kecenderungan parabolik, tetapi pada 700°C terbentuk FeO dengan porositas sekitar 35%, ditutupi jarum Fe₂O₃, lalu mengalami pengelupasan (Zou et al., 2025). Hasil Simbolon (2022) pada ST41 tanpa lapisan juga menunjukkan pertambahan massa dan kerusakan permukaan yang lebih besar daripada spesimen berlapis pada 700°C. Kedua hasil tersebut konsisten mengenai ketidakstabilan oksida besi pada 700°C, meskipun nilai kinetiknya tidak dapat dipertukarkan karena komposisi, geometri, durasi, dan skema siklus pengujiannya berbeda.

Kerak oksida nyata mengandung pori, retak mikro, batas butir, dan ketidakseragaman komposisi. Cacat tersebut dapat menjadi jalur cepat bagi oksigen atau ion logam. Pada baja dengan kandungan kromium rendah, penambahan Cr yang terbatas belum tentu menghasilkan lapisan kromia kontinu; efeknya bergantung pada kemampuan Cr terkonsentrasi di antarmuka dan membentuk oksida yang stabil (Kwon et al., 2023). Kandungan Cr ST41 yang sangat kecil menjelaskan mengapa kerak berbasis oksida besi tetap dominan.

Siklus pemanasan dan pendinginan memperberat degradasi. Oksida dan logam mempunyai koefisien muai serta modulus yang berbeda. Pertumbuhan kerak menciptakan tegangan tekan, sedangkan pendinginan dapat menimbulkan tegangan tarik pada lokasi tertentu. Ketika tegangan melampaui kekuatan kohesif kerak atau kekuatan antarmuka, terbentuk retak dan spallation. Siklus berikutnya lalu mengoksidasi kembali daerah yang terbuka, sehingga kerusakan berkembang melalui pola pembentukan–retak–pembentukan ulang.



Gambar 1. 1 Rangkaian degradasi baja karbon pada paparan temperatur tinggi

(Sumber: Zhong dan Webler (2024), Burja et al. (2023), dan Zou et al. (2025).

Atmosfer mengubah laju dan morfologi oksida. Pada baja, uap air dapat memengaruhi transport spesies, porositas, dan adhesi kerak; laju aliran juga menentukan suplai reaktan dan pelepasan produk volatil. Eksperimen terkontrol pada baja menunjukkan bahwa kombinasi udara dan uap air perlu diperlakukan sebagai variabel pengujian, bukan sekadar kondisi latar (Gaiser et al., 2023). Impuritas dalam CO₂ juga dapat mengubah mekanisme dan laju oksidasi, sehingga data dari udara kering tidak selalu mewakili gas proses (Oleksak et al., 2020).

Kerusakan kimia tersebut berinteraksi dengan beban mekanik. Penipisan dinding meningkatkan tegangan nominal, sedangkan takik akibat kerak yang lepas atau korosi lokal meningkatkan konsentrasi tegangan. Di sisi lain, tegangan termal dapat mempercepat retak kerak. Penilaian umur karena itu idealnya menggabungkan kinetika kehilangan logam, stabilitas kerak, riwayat temperatur, dan beban. Pengukuran pertambahan massa saja perlu dilengkapi dengan pengamatan penampang, identifikasi fasa, dan evaluasi pori serta retak.

Pengamatan Zhong dan Webler (2024) menunjukkan pelepasan awal kerak baja karbon rendah setelah paparan singkat pada 1150°C, sedangkan Simbolon (2022) menemukan kerusakan kumulatif ST41 selama delapan siklus pada 700°C. Temperatur dan skala waktunya berbeda jauh, tetapi keduanya memperlihatkan peran adhesi kerak sebagai pengendali kerusakan. Pada temperatur sangat tinggi, pelepasan dapat dimulai dalam hitungan detik; pada temperatur lebih rendah, siklus panas–dingin mengakumulasi tegangan hingga retak dan pengelupasan. Perbandingan tersebut menegaskan bahwa strategi proteksi harus menghambat transport oksigen sekaligus mempertahankan integritas lapisan selama siklus termal.

D. OKSIDASI DAN KOROSI TEMPERATUR TINGGI

Oksidasi temperatur tinggi merupakan reaksi elektrokimia dalam skala padat antara logam dan oksigen, sedangkan korosi temperatur tinggi mencakup spektrum lingkungan yang lebih luas, termasuk uap, gas bersulfur, klorida, sulfat, karbon, dan deposit cair. Pembedaan ini penting karena lapisan yang efektif dalam udara kering belum tentu stabil di bawah deposit garam. Produk reaksi, jalur transport, dan

mode kegagalannya dapat berbeda walaupun temperatur pengujian sama.

Dalam oksidasi kering, kemampuan proteksi ditentukan oleh kontinuitas, kestabilan termodinamika, laju pertumbuhan, dan adhesi oksida. Cr_2O_3 dan terutama Al_2O_3 sering diinginkan karena laju difusinya relatif rendah pada kondisi yang sesuai. Sebaliknya, kerak oksida besi cenderung tumbuh lebih cepat dan dapat mengalami retak atau pengelupasan. Studi pada Fe–10Cr juga menunjukkan bahwa atmosfer dapat mengubah struktur serta mekanisme kerak, sehingga komposisi paduan harus dinilai bersama lingkungan aktual (Cheng et al., 2021).

Uap air menghadirkan mekanisme tambahan melalui pembentukan spesies hidroksida dan perubahan cacat oksida. Pada paduan FeCrAl, pembentukan alumina yang kontinu sangat menentukan ketahanan dalam uap temperatur tinggi. Pengujian 500–1500°C memperlihatkan perubahan mekanisme dan kinetika oksidasi FeCrAl menurut temperatur serta keadaan lapisan pelindung (Kim et al., 2022). Hal ini menunjukkan bahwa istilah “pembentuk alumina” bukan jaminan tunggal; komposisi, proses, dan kemampuan regenerasi skala tetap harus dikendalikan.

Klorida merupakan ancaman penting pada pembakaran biomassa, pengolahan limbah, lingkungan laut yang terbawa aerosol, dan proses yang menggunakan garam. Deposit klorida dapat merusak oksida protektif, membentuk klorida logam, lalu menghasilkan kembali oksida ketika spesies tersebut bergerak ke daerah dengan aktivitas oksigen lebih tinggi. Siklus yang dikenal sebagai korosi aktif ini menjaga jalur reaksi tetap terbuka dan menghasilkan kerak yang rapuh serta kurang protektif (Sadeghi et al., 2019b).

Garam sulfat dan campuran garam dapat mengalami pelelehan pada rentang temperatur operasi tertentu. Fasa cair membasahi

permukaan dan mempercepat transport ion, sehingga serangan menjadi jauh lebih cepat daripada oksidasi gas biasa. Pada kondisi demikian, kehilangan logam lokal dan pelarutan oksida pelindung lebih relevan daripada sekadar ketebalan kerak. Komposisi deposit, temperatur leleh, fluks deposit, dan gradien aktivitas oksigen harus dimasukkan ke rancangan pengujian.

Tabel 1. 3 Perbandingan mekanisme lingkungan temperatur tinggi

Lingkungan	Spesies penggerak	Ciri produk reaksi	Mode kegagalan utama	Pendekatan pengendalian
Udara kering	O ₂	Kerak oksida berlapis	Pertumbuha, retak, spallation	Oksida rapat dan melekat
Udara + uap	O ₂ , H ₂ O	Oksida dengan cacat/porosit as berubah	Transport dipercepat dan volatilitas spesies	Stabilkan alumina/kro mia
Gas pembakaran	O ₂ , CO ₂ , H ₂ O, pengotor	Kerak heterogen	Serangan tidak seragam dan deposit	Sesuaikan kimia lapisan dengan gas
Deposit klorida	Cl ⁻ /klorida logam	Oksida rapuh dan produk klorida	Korosi aktif dan pengelupasan	Penghalang padat; minimalkan pori
Deposit sulfat/cair	Sulfat dan garam cair	Produk kompleks; pelarutan kerak	Korosi panas dan kehilangan logam lokal	Lapisan stabil terhadap fluks garam

Sumber: Oleksak et al. (2020), Gaiser et al. (2023), dan Sadeghi et al. (2019b).

Simbolon (2022) mengevaluasi korosi siklik pada 700°C dengan penambahan 20% massa NaCl. Serangan pada kondisi bergaram lebih berat dibandingkan oksidasi tanpa garam, dan kemampuan lapisan mempertahankan penghalang rapat menjadi faktor penentu (Simbolon, 2022). NaCl dalam pengujian tersebut berfungsi sebagai akselerator untuk membedakan ketahanan relatif sistem lapisan, bukan sebagai representasi tunggal semua lingkungan industri.

Pengaruh lingkungan juga terlihat pada hasil Gaiser et al. (2023): penambahan uap air ke udara sintetik meningkatkan pertambahan massa besi, dan pada 1200°C kandungan 9,4% volume uap air menaikkan massa sekitar 30% dibandingkan udara sintetik. Sementara itu, Simbolon (2022) menggunakan NaCl untuk mengaktifkan jalur korosi yang berbeda dari oksidasi berbantuan uap. Besarnya perubahan tidak layak dibandingkan secara langsung karena temperatur, spesimen, dan spesies agresif berbeda; kesamaan pentingnya ialah komposisi atmosfer atau deposit dapat mengubah transport dalam kerak dan meniadakan proteksi yang tampak memadai dalam udara kering.

Interpretasi data massa dalam korosi panas memerlukan kehati-hatian. Pertambahan massa merekam pengikatan oksigen atau spesies lain, tetapi tidak langsung setara dengan sisa ketebalan logam. Produk korosi yang mengelupas dapat menyebabkan massa turun, sedangkan garam yang tertahan dapat menaikkan massa tanpa mewakili pertumbuhan oksida protektif. Karena itu, evaluasi yang kuat menggabungkan kurva massa, morfologi permukaan, penampang lintang, komposisi unsur, identifikasi fasa, dan bukti adhesi.

Pengujian siklik lebih dekat kepada kenyataan banyak instalasi dibandingkan paparan isothermal tunggal. Start-up, shutdown, fluktuasi beban, dan gangguan proses mengubah temperatur serta tekanan parsial gas. Namun, hasil laboratorium tetap harus

ditranslasikan secara konservatif karena geometri, aliran, tegangan, dan fluks deposit di lapangan lebih kompleks. Tujuan utama pengujian adalah menetapkan mekanisme, membandingkan kandidat secara adil, dan menyediakan parameter bagi validasi skala komponen.

Dengan demikian, oksidasi dan korosi temperatur tinggi membentuk suatu kontinum. Oksidasi dasar menyediakan kerangka untuk memahami pertumbuhan kerak, sedangkan uap dan deposit menambahkan jalur reaksi yang dapat meniadakan sifat protektifnya. Lapisan yang dipilih harus bekerja pada kedua tingkat tersebut: membentuk oksida penghalang dan menahan kerusakan mekanik serta kimia yang ditimbulkan oleh lingkungan kompleks.

E. URGENSI PENGEMBANGAN LAPISAN PELINDUNG

Penggantian seluruh komponen baja karbon dengan paduan tahan panas merupakan solusi langsung, tetapi tidak selalu paling efisien. Paduan berkadar Cr, Ni, atau Al tinggi lebih mahal, dapat menuntut prosedur pengelasan khusus, dan belum tentu diperlukan pada seluruh penampang. Lapisan pelindung memungkinkan fungsi dipisahkan: substrat membawa beban, sedangkan beberapa ratus mikrometer hingga beberapa milimeter permukaan menghadapi oksigen dan deposit. Pendekatan ini menarik untuk komponen baru maupun rekondisi.

Lapisan temperatur tinggi harus memenuhi persyaratan yang saling terkait. Komposisinya perlu menyediakan unsur pembentuk oksida protektif; struktur mikro harus cukup rapat untuk membatasi penetrasi gas dan garam; ikatan dengan substrat harus bertahan selama siklus termal; serta sifat muainya perlu kompatibel agar

tegangan antarmuka terkendali. Lapisan yang sangat tahan secara kimia dapat tetap gagal apabila berpori, rapuh, atau tidak melekat.

Sistem FeCrAl memanfaatkan Cr untuk mendukung selektivitas oksidasi dan Al sebagai pembentuk Al_2O_3 . Alumina yang kontinu mempunyai laju pertumbuhan rendah dan kestabilan tinggi, sedangkan penambahan unsur reaktif seperti Y dapat memperbaiki adhesi serta mengendalikan pertumbuhan kerak. Kajian FeCrAl untuk kelongsong bahan bakar juga menunjukkan bahwa kinerja korosi sangat bergantung pada keseimbangan Cr–Al, mikrostruktur, dan kondisi lingkungan (Raiman et al., 2020; Nagothi et al., 2024). Prinsip pembentukan oksida selektif tersebut relevan bagi lapisan, walaupun kondisi aplikasinya berbeda.

FeCrAlTiY dipilih sebagai matriks lapisan karena menggabungkan unsur pembentuk oksida dengan unsur yang mendukung kestabilan mikrostruktur. Penambahan MCrAlY, dengan M berupa Co atau Ni, dimaksudkan untuk memperluas reservoir Al–Cr dan meningkatkan ketahanan terhadap siklus termal. Pada penelitian terdahulu, lapisan FeCrAlTiY–MCrAlY yang disemprotkan pada baja karbon menunjukkan ketahanan oksidasi 700°C yang lebih baik daripada substrat tanpa lapisan; variasi dengan 30% massa MCrAlY memberikan respons terbaik di antara komposisi MCrAlY yang diuji (Simbolon et al., 2020).

Teknik semprot nyala menarik karena peralatannya relatif sederhana, laju deposisinya tinggi, dan dapat diterapkan pada area luas. Partikel umpan dipanaskan, dipercepat menuju substrat, lalu membentuk lamela ketika menumbuk permukaan. Struktur berlamela ini sekaligus menjadi sumber keterbatasan: oksida di antara lamela, pori, partikel yang tidak meleleh sempurna, serta retak dapat membentuk jalur cepat bagi lingkungan. Tinjauan mutakhir menempatkan porositas, adhesi, ketebalan, dan stabilitas produk

oksidasi sebagai variabel utama desain lapisan semprot termal untuk aplikasi oksidasi dan korosi panas (Lakkannavar et al., 2024).

Atmosfer selama penyemprotan memengaruhi mutu lapisan. Udara tekan dapat mengoksidasi sebagian partikel sebelum atau selama deposisi, sehingga kandungan unsur aktif yang tersedia untuk membentuk kerak protektif berkurang. Penggunaan nitrogen sebagai gas pembawa menekan paparan oksidatif dan dapat menghasilkan lapisan dengan pori serta retak yang lebih sedikit, meskipun tidak sepenuhnya menghapus oksida proses. Oleh sebab itu, kontrol atmosfer harus dipandang sebagai bagian dari rancangan material, bukan hanya parameter mesin.

Kebutuhan optimasi komposisi juga terlihat pada penelitian lapisan FeCrAlTiY dengan penambahan MoSi₂ pada ST41. Pane et al. (2023) memperoleh pertambahan massa 0,217 mg/mm² untuk 10% massa MoSi₂, lebih rendah daripada lapisan tanpa MoSi₂ sebesar 0,261 mg/mm². Penambahan 20% dan 30% justru menaikkan pertambahan massa menjadi 0,297 dan 0,308 mg/mm² karena porositas bertambah. Dibandingkan dengan hasil Simbolon et al. (2020), yang menunjukkan 30% massa MCrAlY sebagai komposisi terbaik dalam seri FeCrAlTiY–MCrAlY, kedua penelitian memperlihatkan bahwa kadar optimum bergantung pada sifat aditif. MCrAlY menambah reservoir Al–Cr, sedangkan MoSi₂ berlebih meningkatkan partikel tidak meleleh dan jalur pori; karena itu, persentase optimum satu aditif tidak dapat diterapkan kepada aditif lain.

Tabel 1. 4 Perbandingan hasil penelitian baja dan lapisan pada temperatur tinggi

Penelitian	Material dan Kondisi	Hasil Utama	Relevansi Terhadap Penelitian
Simbolon et al. (2020)	ST41 berlapis FeCrAlTiY–MCrAlY; <i>Flame Spray</i> ; 700°C; 8 siklus	30% massa MCrAlY memberi pertambahan massa terendah dalam seri pengujian	Menunjukkan efektivitas penambahan reservoir Al–Cr pada lapisan ST41
Pane et al. (2023)	ST41 berlapis FeCrAlTiY–MoSi ₂ ; 700°C; 8 siklus	10% MoSi ₂ terbaik (0,217 mg/mm ²); kadar 20–30% meningkatkan porositas dan massa	Membuktikan bahwa manfaat aditif bersifat nonlinier dan dikendalikan mikrostruktur
Zou et al. (2025)	Baja karbon Q275 tanpa lapisan; 500–700°C	Pada 700°C terbentuk FeO berpori sekitar 35%, Fe ₂ O ₃ berbentuk jarum, dan spallation	Menguatkan mekanisme kerusakan ST41 tanpa lapisan, tetapi bukan sumber nilai desain langsung
Burja et al. (2023)	Baja boiler 16Mo3, 13Cr, T24, dan P91; udara; 650°C	P91 berkadar Cr tinggi menunjukkan oksidasi	Menunjukkan alternatif proteksi melalui paduan curah;

Penelitian	Material dan Kondisi	Hasil Utama	Relevansi Terhadap Penelitian
		terendah; baja paduan rendah membentuk kerak lebih tebal	lapisan menawarkan efisiensi unsur paduan
Gaiser et al. (2023)	Besi/baja; udara dan uap air; 900–1200°C	Uap air dan laju aliran mengubah konstanta pertumbuhan serta morfologi kerak	Menegaskan perlunya menguji lapisan dalam lingkungan yang mewakili operasi

Sumber: Simbolon et al. (2020), Burja et al. (2023), Gaiser et al. (2023), Pane et al. (2023), dan Zou et al. (2025).

Pemilihan lapisan akhirnya perlu menggunakan kriteria jamak: laju kehilangan logam, adhesi, kemampuan menahan siklus, kompatibilitas termal, kemudahan aplikasi, reparabilitas, serta biaya. Pengujian laboratorium harus diikuti validasi pada geometri dan lingkungan yang mewakili operasi. Tinjauan lapisan tahan korosi untuk fasilitas energi menegaskan bahwa komposisi dan mikrostruktur tidak dapat dipisahkan dari kondisi deposit serta gas aktual (Sadeghi et al., 2019a, 2019b).

Urgensi pengembangan lapisan pelindung karena itu bersifat teknis dan ekonomis. Lapisan yang tepat dapat memperlambat konsumsi substrat, mengurangi frekuensi penggantian komponen, mempertahankan efisiensi perpindahan panas, dan menekan risiko penghentian tidak terencana. Bagi baja ST41 pada 700°C, sasaran

ilmiahnya ialah menciptakan penghalang $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3$ yang rapat dan melekat, sembari mengurangi pori, retak, serta oksidasi internal selama proses deposisi.

Keseluruhan bukti menempatkan lapisan FeCrAlTiY–MCrAlY sebagai respons terhadap keterbatasan intrinsik baja karbon, bukan sebagai perlakuan tambahan yang berdiri sendiri. Pembahasan desain komposisi, rute deposisi, karakterisasi, dan kinerja siklik perlu mempertahankan hubungan sebab–akibat berikut: lingkungan menentukan mekanisme serangan; mekanisme menentukan persyaratan lapisan; dan proses fabrikasi menentukan apakah persyaratan tersebut benar-benar terwujud dalam struktur mikro.

BAB 2

SISTEM PELAPIS FECRALTIY–MCRALY

A. KONSEP DASAR PELAPISAN LOGAM

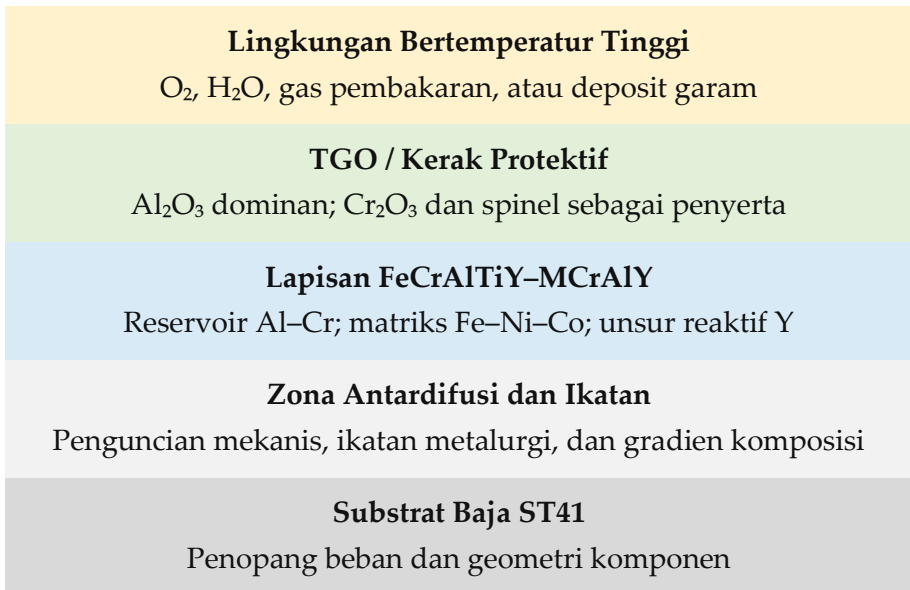
Pelapisan logam adalah rekayasa permukaan yang menempatkan material dengan sifat kimia atau fisik terpilih pada substrat. Tujuannya bukan selalu menggantikan sifat substrat, melainkan membagi fungsi secara efisien. Baja ST41 tetap menyediakan kekuatan, bentuk, dan kemampuan fabrikasi, sedangkan lapisan menyediakan unsur pembentuk oksida protektif pada permukaan yang langsung terpapar. Konsep ini memungkinkan material murah yang ekonomis digunakan bersama lapisan berkinerja tinggi dalam jumlah yang jauh lebih kecil daripada jika seluruh komponen dibuat dari paduan tahan panas. (Karaoglanli et al., 2020; Lakkannavar et al., 2024; Sadeghi et al., 2019a)

Sistem pelapis temperatur tinggi sekurang-kurangnya terdiri atas empat bagian: substrat, antarmuka, lapisan logam, dan kerak oksida yang tumbuh selama operasi. Kerak tersebut lazim disebut *thermally grown oxide* (TGO). Pada sistem yang dirancang dengan baik, TGO bukan produk samping yang dihindari, melainkan penghalang difusi yang dibentuk secara terkendali. Lapisan logam berfungsi sebagai reservoir Al dan Cr untuk membangun serta memperbaiki TGO, sementara antarmuka harus memindahkan beban tanpa mengalami delaminasi ketika temperatur berubah. (Karaoglanli et al., 2020; Lakkannavar et al., 2024; Sadeghi et al., 2019a)

Secara umum, lapisan tahan panas dapat berupa lapisan difusi atau lapisan overlay. Lapisan difusi dibentuk melalui perpindahan unsur ke dalam permukaan substrat sehingga komposisinya berubah secara bertahap. Lapisan overlay dideposisikan sebagai material tersendiri di atas substrat dan karena itu memberi kebebasan komposisi serta ketebalan yang lebih besar. FeCrAlTiY-MCrAlY dalam kajian ini diposisikan sebagai sistem overlay; setelah deposisi tetap dapat terjadi antardifusi yang membentuk gradien komposisi pada daerah ikatan. (Karaoglanli et al., 2020; Lakkannavar et al., 2024; Sadeghi et al., 2019a)

Ikatan lapisan dapat berasal dari penguncian mekanis, kontak metalurgi, gaya antarmolekul, atau gabungan ketiganya. Pada semprot termal, partikel panas menumbuk permukaan kasar, melebar menjadi lamela, lalu membeku cepat. Kekasaran substrat menyediakan profil jangkar dan luas kontak. Apabila temperatur serta kebersihan antarmuka memadai, difusi lokal dan ikatan metalurgi turut berkembang. Oksida, debu abrasif, minyak, dan kelembapan dapat mengurangi kontak efektif sehingga persiapan permukaan merupakan bagian integral dari desain, bukan langkah administratif. (Karaoglanli et al., 2020; Lakkannavar et al., 2024; Sadeghi et al., 2019a)

Mikrostruktur hasil semprot termal bersifat berlamela dan dapat memuat pori, batas antarlamela, oksida proses, retak mikro, serta partikel yang tidak meleleh sempurna. Cacat tersebut tidak selalu langsung menyebabkan kegagalan, tetapi keterhubungannya menentukan permeabilitas lapisan. Pori tertutup dapat lebih toleran daripada jaringan pori terbuka yang menghubungkan permukaan dengan substrat. Tinjauan lapisan semprot termal menegaskan bahwa komposisi harus dinilai bersama porositas, distribusi oksida, kekasaran, dan adhesi karena semua variabel itu mengendalikan korosi dan oksidasi (Lakkannavar et al., 2024; Sadeghi et al., 2019a).



Gambar 2. 1 Arsitektur fungsional sistem pelapis temperatur tinggi

Rute deposisi mengatur sejarah termal partikel dan, pada akhirnya, arsitektur lapisan. Atmospheric plasma spray dan *Flame Spray* memberi energi panas tinggi, sedangkan *high-velocity oxy-fuel* (HVOF) menambah kecepatan tumbukan sehingga umumnya menghasilkan lapisan lebih padat. *Cold gas dynamic spray* membatasi pemanasan, tetapi memerlukan deformasi plastis partikel yang memadai. Perbandingan beberapa teknik untuk CoNiCrAlY menunjukkan bahwa tingkat oksidasi internal, porositas, dan morfologi lamela berubah menurut proses, sehingga kinerja tidak dapat diprediksi hanya dari komposisi nominal (Karaoglanli et al., 2020).

Pada *Flame Spray*, oksigen di sekitar nyala atau udara pembawa dapat bereaksi dengan Al, Cr, dan unsur reaktif sebelum partikel menyatu dengan lapisan. Oksidasi dalam-lintas ini mengonsumsi unsur aktif dan membentuk stringer oksida di antara lamela. Penelitian CoNiCrAlY hasil *Flame Spray* memperlihatkan bahwa

DAFTAR PUSTAKA

- Abedi, M., Sovizi, S., Azarniya, A., Giuntini, D., Esmaeeli Seraji, M., Madaah Hosseini, H. R., Amutha, C., Ramakrishna, S., & Mukasyan, A. (2023). An analytical review on *Spark Plasma Sintering* of metals and alloys: From processing window, phase transformation, and property perspective. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 48(2), 169–214. <https://doi.org/10.1080/10408436.2022.2049441>
- Bai, M. W., Song, B., Reddy, L., & Hussain, T. (2019). Preparation of MCrAlY–Al₂O₃ composite coatings with enhanced oxidation resistance through a novel powder manufacturing process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 28, 433–443. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00830-y>
- Burja, J., Šetina Batič, B., Žužek, B., & Balaško, T. (2023). High-temperature oxidation of boiler steels at 650°C. *Metals*, 13(11), 1887. <https://doi.org/10.3390/met13111887>
- Castro Cerda, F., Goulas, C., Sabirov, I., Papaefthymiou, S., Monsalve, A., & Petrov, R. H. (2016). Microstructure, texture and mechanical properties in a low carbon steel after ultrafast heating. *Materials Science and Engineering: A*, 672, 108–120. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.06.056>
- Chen, H., Fan, M., Li, L., Zhu, W., Li, H. N., Li, J., & Yin, Y. (2021). Effects of internal oxide contents on the oxidation and β -phase depletion behaviour in HOVF CoNiCrAlY coatings. *Surface and Coatings Technology*, 424, 127666. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127666>

- Chen, H., Fan, M., Zhu, W., & Norton, A. D. (2020). High temperature oxidation behaviour of combustion *Flame Sprayed* CoNiCrAlY coatings. *Surface and Coatings Technology*, 385, 125431. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125431>
- Chen, Y., Zhao, X., & Xiao, P. (2018). Effect of microstructure on early oxidation of MCrAlY coatings. *Acta Materialia*, 159, 150–162. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.08.018>
- Chen, Y., Zhao, X., & Xiao, P. (2020). Effect of surface curvature on oxidation of a MCrAlY coating. *Corrosion Science*, 163, 108256. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108256>
- Cheng, L., Sun, B., Du, C., Gao, W., & Cao, G. (2021). High-temperature oxidation behavior of Fe–10Cr steel under different atmospheres. *Materials*, 14(13), 3453. <https://doi.org/10.3390/ma14133453>
- Eklund, J., Phother, J., Sadeghi, E., Joshi, S., & Liske, J. (2019). High-temperature corrosion of HVOF-sprayed Ni-based coatings for boiler applications. *Oxidation of Metals*, 91, 729–747. <https://doi.org/10.1007/s11085-019-09906-0>
- Fritscher, K. (2023). The reactive element effect. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 54, 64–74. <https://doi.org/10.1007/s11661-022-06840-w>
- Gaiser, G., Presoly, P., & Bernhard, C. (2023). High-temperature oxidation of steel under linear flow rates of air and water vapor—An experimentally determined set of data. *Metals*, 13(5), 892. <https://doi.org/10.3390/met13050892>
- Gao, Z., Wang, X., Zhou, D., Wu, Q., Li, C., Song, L., & Liu, S. (2023). The formation mechanism of a multilayer-structure oxide film during the oxidation of FeCrAl in air at 700°C. *Metals*, 13(2), 305. <https://doi.org/10.3390/met13020305>

- Ghadami, F., Sabour Rouh Aghdam, A., & Ghadami, S. (2021). Microstructural characteristics and oxidation behavior of the modified MCrAlX coatings: A critical review. *Vacuum*, 185, 109980. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109980>
- Hassannejad, H., Nouri, A., Assari, M. H., Mirfalah, S. H., & Bozorg, M. (2022). In situ formation of extremely high corrosion resistant Ni-Ni₃Si nanocomposite coating using *Spark Plasma Sintering* and subsequent heat treatment. *Metals and Materials International*, 28, 646–656. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00888-2>
- Jafari, R., Sadeghimeresht, E., Farahani, T. S., Huhtakangas, M., Markocsan, N., & Joshi, S. (2018). KCl-induced high-temperature corrosion behavior of HVOF-sprayed Ni-based coatings in ambient air. *Journal of Thermal Spray Technology*, 27, 500–511. <https://doi.org/10.1007/s11666-017-0684-9>
- Kalush, A., Texier, D., Ecochard, M., Sirvin, Q., Choquet, K., Gheno, T., Vanderesse, N., Jomaa, W., & Bocher, P. (2022). Size effects on high temperature oxidation of MCrAlY coatings processed via APS and HVOF depositions. *Surface and Coatings Technology*, 440, 128483. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128483>
- Karaoglanli, A. C., Ozgurluk, Y., & Doleker, K. M. (2020). Comparison of microstructure and oxidation behavior of CoNiCrAlY coatings produced by APS, SSAPS, D-gun, HVOF and CGDS techniques. *Vacuum*, 180, 109609. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109609>
- Khantisopon, K., Singh, S., Jitputti, J., Berndt, C. C., & Ang, A. S. M. (2024). High temperature corrosion resistant and anti-slagging coatings for boilers: A review. *High Temperature Corrosion of Materials*, 101, 1–55. <https://doi.org/10.1007/s11085-024-10251-0>

- Kim, C., Tang, C., Grosse, M., Maeng, Y., Jang, C., & Steinbrueck, M. (2022). Oxidation mechanism and kinetics of nuclear-grade FeCrAl alloys in the temperature range of 500–1500°C in steam. *Journal of Nuclear Materials*, 564, 153696. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.153696>
- Kwon, G.-H., Park, H., Choi, B., Lee, Y.-K., & Moon, K. (2023). Influence of Cr content on the high-temperature oxidation behavior and mechanism of low-alloy steels. *Materials*, 16(14), 4964. <https://doi.org/10.3390/ma16144964>
- Lakkannavar, V., Yogesha, K. B., Prasad, C. D., Phanden, R. K., Srinivasa, G., & Prasad, S. C. (2024). Thermal spray coatings on high-temperature oxidation and corrosion applications—A comprehensive review. *Results in Surfaces and Interfaces*, 16, 100250. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2024.100250>
- Laptev, A. M., Bram, M., Garbiec, D., Räthel, J., van der Laan, A., Beynet, Y., Huber, J., Küster, M., Cologna, M., & Guillon, O. (2024). Tooling in Spark Plasma Sintering technology: Design, optimization, and application. *Advanced Engineering Materials*, 26(5), 2301391. <https://doi.org/10.1002/adem.202301391>
- Liu, X., Chen, Y., Lu, J., Li, L., Huang, A., Zhang, H., Fan, X., Zhang, X., & Zhao, X. (2023). A comparative study on the oxidation behavior of Y-, Hf- and YHf-doped NiCoCrAl alloys: Effect of reactive elements. *Corrosion Science*, 218, 111160. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111160>
- Martins, J. P., Chen, Y., Wei, K., Gao, Z., Qin, S., Brewster, G., & Xiao, P. (2023). Unravelling the impact of CoNiCrAlY coating microstructure and composition on the formation of duplex oxide scales. *Corrosion Science*, 225, 111552. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111552>

- Nagothi, B. S., Qu, H., Zhang, W., Umretiya, R. V., Dolley, E., & Rebak, R. B. (2024). Hydrothermal corrosion of latest generation of FeCrAl alloys for nuclear fuel cladding. *Materials*, 17(7), 1633. <https://doi.org/10.3390/ma17071633>
- Negami, M., Morihashi, R., Yoshino, T., Sahara, R., & Yamabe-Mitarai, Y. (2024). Effect of reactive elements in MCrAlX bond coat for durability improvement of thermal barrier coatings. *Corrosion Science*, 237, 112329. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112329>
- Negami, M., Morihashi, R., Yoshino, T., Sahara, R., & Yamabe-Mitarai, Y. (2024). Effect of reactive elements in MCrAlX bond coat for durability improvement of thermal barrier coatings. *Corrosion Science*, 237, 112329. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112329>
- Nourpoor, P., Javadian, S., Sabour Rouh Aghdam, A., & Ghadami, F. (2022). Microstructure investigation and cyclic oxidation resistance of Ce–Si-modified aluminide coating deposited by pack cementation on Inconel 738LC. *Coatings*, 12(10), 1491. <https://doi.org/10.3390/coatings12101491>
- Oleksak, R. P., Tylczak, J. H., Holcomb, G. R., & Doğan, Ö. N. (2020). High temperature oxidation of steels in CO₂ containing impurities. *Corrosion Science*, 164, 108316. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108316>
- Pane, J., Simbolon, D. H., Izzudin, H., Afandi, A., Hermanto, B., Sebayang, K., Humaidi, S., Situmorang, M., & Sudiro, T. (2023). Cyclic oxidation resistance of MoSi₂ added FeCrAlTiY coatings on ST41 steel at 700 °C prepared by a *Flame Spraying* technique. *International Journal of Technology*, 14(1), 15–25. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v14i1.5092>

- Raiman, S. S., Field, K. G., Rebak, R. B., Yamamoto, Y., & Terrani, K. A. (2020). Hydrothermal corrosion of 2nd generation FeCrAl alloys for accident tolerant fuel cladding. *Journal of Nuclear Materials*, 536, 152221. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152221>
- Sadeghi, E., Markocsan, N., & Joshi, S. (2019a). Advances in corrosion-resistant thermal spray coatings for renewable energy power plants. Part I: Effect of composition and microstructure. *Journal of Thermal Spray Technology*, 28, 1749–1788. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00938-1>
- Sadeghi, E., Markocsan, N., & Joshi, S. (2019b). Advances in corrosion-resistant thermal spray coatings for renewable energy power plants: Part II—Effect of environment and outlook. *Journal of Thermal Spray Technology*, 28, 1789–1850. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00939-0>
- Sadeghimeresht, E., Reddy, L., Hussain, T., Markocsan, N., & Joshi, S. (2018). Chlorine-induced high temperature corrosion of HVOF-sprayed Ni-based alumina and chromia forming coatings. *Corrosion Science*, 132, 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.12.033>
- Shi, L., Li, M., Zhan, Z., Yuan, Z., & Wang, X. (2023). Effect of yttrium on the formation, microstructure and high-temperature oxidation resistance of the oxide film on the surface of FeCr alloy. *Surface and Coatings Technology*, 475, 130177. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130177>
- Simbolon, D. H., Pane, J., Hermanto, B., Afandi, A., Sebayang, K., Situmorang, M., & Sudiro, T. (2020). High temperature oxidation resistance of FeCrAlTiY–MCrAlY (M = Co and Ni) coatings on carbon steel prepared by *Flame Spray* technique. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 56(1), 169–179. <https://doi.org/10.1134/S2070205120010219>

- Tejero-Martin, D., Rezvani Rad, M., McDonald, A., & Hussain, T. (2019). Beyond traditional coatings: A review on thermal-sprayed functional and smart coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 28, 598–644. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00857-1>
- Tramošljika, B., Blečich, P., Bonefačić, I., & Glažar, V. (2021). Advanced ultra-supercritical coal-fired power plant with post-combustion carbon capture: Analysis of electricity penalty and CO₂ emission reduction. *Sustainability*, 13(2), 801. <https://doi.org/10.3390/su13020801>
- Ujah, C. O., Kallon, D. V. V., & Aigbodion, V. S. (2024). Corrosion characteristics of high-entropy alloys prepared by *Spark Plasma Sintering*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132, 63–82. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13452-8>
- Wang, J., Li, D., & Shao, T. (2022). Hot corrosion and electrochemical behavior of NiCrAlY, NiCoCrAlY and NiCoCrAlYT_a coatings in molten NaCl–Na₂SO₄ at 800°C. *Surface and Coatings Technology*, 440, 128503. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128503>
- Wang, X., & Shen, X. (2023). Research progress of ODS FeCrAl alloys—A review of composition design. *Materials*, 16(18), 6280. <https://doi.org/10.3390/ma16186280>
- Wu, K., Sun, W., Tan, A. W.-Y., Tan, S. C., Liu, E., & Zhou, W. (2022). High temperature oxidation and oxychlorination behaviors of cold sprayed Inconel 718 deposits at 700°C. *Corrosion Science*, 207, 110536. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110536>

- Yang, Z., Zhang, J., Luo, C., Yu, C., Li, M., & Han, W. (2024). Effect of pre-oxidation and sea salt on the hot corrosion behavior of MCrAlY coatings and Al-Si coatings. *Surface and Coatings Technology*, 477, 130354. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130354>
- Zakeri, A., Bahmani, E., & Sabour Rouh Aghdam, A. (2020). Impact of MCrAlY feedstock powder modification by high-energy ball milling on the microstructure and high-temperature oxidation performance of HVOF-sprayed coatings. *Surface and Coatings Technology*, 395, 125935. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125935>
- Zamani, P., & Valefi, Z. (2023). Comparative investigation of microstructure and high-temperature oxidation resistance of high-velocity oxy-fuel sprayed CoNiCrAlY/nano-Al₂O₃ composite coatings using satellited powders. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 30(9), 1779–1791. <https://doi.org/10.1007/s12613-023-2630-9>
- Zhong, M., & Weblar, B. A. (2024). High temperature oxidation behaviors of steels at initial stages in air. *Corrosion Science*, 229, 111838. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.111838>
- Zou, R., Xiao, X., Deng, Y., & Shi, Y. (2025). Investigating the high-temperature oxidation mechanisms of carbon steel Q275. *Frontiers in Materials*, 12, 1662645. <https://doi.org/10.3389/fmats.2025.1662645>

PROFIL PENULIS



Assoc. Prof. Dr. Dedi Holden Simbolon, S.Si., M.Pd lahir di Teluk Pule, 3 November 1987. Ia merupakan akademisi dan dosen di Universitas Quality Medan. Menyelesaikan pendidikan S-1 Program Studi Fisika dan S-2 Program Studi Pendidikan Fisika di Universitas Negeri Medan (UNIMED) serta S-3 Program Studi Ilmu Fisika di Universitas Sumatera Utara (USU). Bidang

kepakarannya meliputi fisika material, pendidikan fisika, pendidikan sains, inovasi pembelajaran, laboratorium virtual, serta pengembangan media dan model pembelajaran. Ia aktif menghasilkan publikasi ilmiah pada jurnal nasional dan internasional dalam bidang fisika material dan pendidikan, serta aktif dalam berbagai forum konferensi ilmiah nasional dan internasional. Dalam bidang penelitian, ia telah berhasil memperoleh berbagai hibah penelitian dan pengabdian kepada masyarakat, antara lain Program Dosen Pemula (PDP) tahun 2017, Penelitian Disertasi Doktor (PDD) tahun 2020, Program Kemitraan Masyarakat (PKM) tahun 2023, serta Penelitian Fundamental Reguler (PFR) tahun 2024. Ia juga terlibat dalam penelitian dan pengembangan pembelajaran berbasis laboratorium virtual PhET, inkuiri terbimbing, Project Based Learning (PjBL), Problem Based Learning (PBL), dan teknologi pembelajaran. Dalam bidang kepemimpinan, Dr. Dedi Holden Simbolon dipercaya menjabat sebagai Rektor Universitas Quality sejak tahun 2021. Sebelumnya, ia pernah menjabat sebagai Plt. Rektor dan Wakil Rektor Universitas Quality, serta mengemban berbagai tugas kepemimpinan akademik dan organisasi. Ia juga memiliki pengalaman sebagai Ketua

Senat Universitas Quality, asesor BKD, anggota Tim PAK LLDIKTI Wilayah I Sumatera Utara, reviewer penelitian dan pengabdian kepada masyarakat internal perguruan tinggi, serta pernah memimpin organisasi Resimen Mahasiswa di tingkat universitas dan provinsi. Melalui kiprah akademik, penelitian, publikasi, pengabdian, dan kepemimpinan perguruan tinggi, ia terus berkomitmen untuk berkontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, pendidikan, dan sumber daya manusia bagi kemajuan bangsa. Email : dedi.holden@universitasquality.ac.id

Buku "Rekayasa Lapisan FeCrAlTiY-MCrAlY pada Baja Karbon untuk Aplikasi Temperatur Tinggi : Pembentukan, Karakterisasi, Kinerja Oksidasi-Korosi, dan Prospek Aplikasi" berangkat dari persoalan nyata di dunia industri, buku monograf ini membahas keterbatasan baja karbon—material yang kuat, mudah difabrikasi, dan ekonomis—ketika harus beroperasi pada lingkungan bertemperatur tinggi. Pada kondisi tersebut, baja karbon rentan mengalami pembentukan kerak oksida, percepatan korosi, retak termal, dan penurunan integritas struktural, tantangan yang krusial bagi komponen boiler, sistem perpipaan, maupun pembangkit listrik. Sebagai jawaban, penulis mengangkat rekayasa lapisan pelindung berbasis sistem FeCrAlTiY-MCrAlY yang diaplikasikan pada baja karbon rendah ST41, memanfaatkan sinergi unsur Fe, Cr, Al, Ti, Y, Co, dan Ni untuk membentuk kerak oksida protektif seperti alumina, kromia, dan fasa spinel.

Alur pembahasan disusun runtut dalam lima bab. Dua bab awal meletakkan fondasi konseptual: karakteristik baja karbon ST41 serta mekanisme oksidasi dan korosi pada temperatur tinggi, dilanjutkan dengan prinsip dasar sistem pelapis FeCrAlTiY-MCrAlY dan peran spesifik tiap unsur penyusunnya dalam membangun mekanisme perlindungan. Bab ketiga memaparkan metodologi penelitian secara sistematis, mencakup preparasi substrat dan serbuk pelapis, variasi komposisi MCrAlY (0%, 10%, 20%, dan 30%), proses deposisi dengan teknik flame spray, hingga skema pengujian oksidasi siklik dan korosi NaCl pada 700°C yang dipadukan dengan karakterisasi difraksi sinar-X (XRD) dan SEM-EDS.

Inti temuan penelitian disajikan pada dua bab terakhir. Perbandingan empat variasi komposisi menempatkan FeCrAlTiY-30% MCrAlY sebagai formulasi dengan kinerja terbaik, dengan laju oksidasi yang turun signifikan—sekitar 67% lebih rendah dibandingkan baja ST41 tanpa lapisan. Buku ini juga mengupas dua strategi optimalisasi proses: penggunaan gas nitrogen sebagai gas pembawa pada flame spray, yang terbukti menekan oksidasi selama deposisi, serta penerapan spark plasma sintering (SPS), yang menghasilkan lapisan jauh lebih padat dengan porositas minimum dan kinerja oksidasi-korosi yang jauh melampaui hasil flame spray. Melalui triangulasi data perubahan massa, evolusi fasa, dan pengamatan mikrostruktur, penulis menegaskan bahwa kinerja lapisan tidak semata ditentukan oleh komposisi kimia, melainkan juga oleh porositas, homogenitas, dan integritas antarmuka lapisan-substrat.

Sebagai penutup, buku ini memetakan prospek aplikasi industri pada boiler, sistem perpipaan, dan komponen pembangkit, sekaligus secara jujur mengidentifikasi keterbatasan riset—seperti durasi pengujian yang masih terbatas dan perlunya validasi pada skala industri—serta arah pengembangan lanjutan, mulai dari rekayasa komposisi serbuk, arsitektur lapisan bergradasi (graded coating), hingga perbandingan dengan teknik deposisi berkecepatan tinggi seperti HVOF/HVAF. Dilengkapi glosarium istilah dan daftar pustaka yang ekstensif, buku ini diposisikan sebagai referensi ilmiah bagi mahasiswa, dosen, peneliti, dan praktisi di bidang ilmu material, rekayasa permukaan, serta teknologi pelapisan tahan panas.



IKAPI
INSTITUT KEMENTERIAN
INDONESIA

CV. Tahta Media Group

Sukoharjo, Jawa Tengah

Web : www.tahtamedia.co.id

Ig : tahtamedia group

Telp/WA : +62 896 5427 3996

