



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Eddy Agus Basuki

**PENGEMBANGAN PADUAN LOGAM
BERPERFORMA TINGGI DAN UPAYA INISIASI
PRODUKSINYA DI DALAM NEGERI.**

20 Maret 2021
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

**Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**
20 Maret 2021

Profesor Eddy Agus Basuki

**PENGEMBANGAN PADUAN LOGAM
BERPERFORMA TINGGI DAN UPAYA INISIASI
PRODUKSINYA DI DALAM NEGERI**



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: PENGEMBANGAN PADUAN LOGAM BERPERFORMA TINGGI DAN
UPAYA INISIASI PRODUKSINYA DI DALAM NEGERI.
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,
tanggal 20 Maret 2021.

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama **7 (tujuh) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)**.
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama **5 (lima) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)**.

Hak Cipta ada pada penulis

Eddy Agus Basuki

PENGEMBANGAN PADUAN LOGAM BERPERFORMA TINGGI DAN
UPAYA INISIASI PRODUKSINYA DI DALAM NEGERI.
Disunting oleh Eddy Agus Basuki

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2021
x+64 h., 17,5 x 25 cm
ISBN 978-602-6624-44-4
1. Metalurgi Fisik 1. Eddy Agus Basuki

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia sehingga naskah orasi ilmiah ini dapat penulis selesaikan. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Forum Guru Besar (FGB) Institut Teknologi Bandung atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menyampaikan orasi ilmiah dalam sidang terbuka Forum Guru Besar ITB.

Orasi ilmiah ini mengangkat tema mengenai upaya yang telah penulis lakukan dalam pengembangan paduan logam berperforma tinggi yang khusus dimaksudkan untuk turut serta menjawab tuntutan akan pemenuhan kebutuhan material kualitas tinggi di dalam negeri. Paduan logam tersebut merupakan bagian dari paduan-paduan logam berperforma tinggi yang digunakan sebagai bahan baku untuk produksi komponen dan barang serta peralatan di industri hilir yang selama ini masih tergantung impor. Kontribusi penelitian yang telah penulis lakukan dalam pengembangan berbagai jenis paduan logam yang dimaksud dimuka dipaparkan dalam orasi ilmiah ini.

Pada bagian akhir dari orasi ilmiah disampaikan upaya yang telah penulis lakukan bersama rekan peneliti lintas institusi untuk menginisiasi produksi paduan logam berperforma tinggi di Indonesia. Kerjasama dengan berbagai pihak, terutama badan-badan usaha milik negara yang masuk dalam industri strategis nasional, telah dilakukan dengan harapan

agar produksi paduan-paduan logam berperforma tinggi dapat segera terealisasi guna mendukung pemenuhan target Indonesia sebagai negara industri tangguh pada tahun 2035, sebagaimana tercantum dalam Rencana Induk Pembangunan Industri Nasional.

Penulis berharap semoga penyampaian orasi ilmiah ini memberi manfaat bagi pengembangan paduan logam berperforma tinggi dan upaya inisiasi produksi di Indonesia, sehingga ketergantungan impor akan material kualitas tinggi dapat segera diakhiri. Akhir kata, penulis berharap bahwa upaya yang telah penulis lakukan selama ini mendapat rohlo dari Allah SWT.

Bandung, 20 Maret 2021

Eddy Agus Basuki

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
SINOPSIS	vii
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Pemenuhan kebutuhan Dasar Manusia	1
1.2. Ketergantungan (masih) Terhadap Energi Fosil	3
2. PENINGKATAN EFISIENSI ENERGI DAN TANTANGANNYA .	5
2.1. Konsep Dasar Peningkatan Efisiensi Energi	5
2.2. Tantangan Terhadap Upaya Peningkatan Efisiensi Energi	6
3. PEMAKAIAN LOGAM PADA TEMPERATUR TINGGI	8
3.1. Kondisi Lingkungan Operasi Temperatur Tinggi	8
3.2. Pengembangan Paduan Logam Temperatur Tinggi	10
4. KONTRIBUSI KEILMUAN BAGI PENGEMBANGAN PADUAN LOGAM BERPERFORMA TINGGI	12
4.1. Pengembangan Paduan Logam Berbasis Fe dan Ni	13
4.2. Pengembangan Baja Feritik Diperkuat Dispersi Partikel Oksida	16
4.3. Pengembangan Superalloy Berbasis Nikel	18
4.4. Pengembangan Senyawa Intermetalik Berbasis Titanium	19
4.5. Pengembangan Sistem Proteksi Melalui Coating	20
4.6. Pengujian Ketahanan Korosi Temperatur Tinggi	22
4.7. Pengujian Interdifusi Dalam Sistem Coating	25

5. POTENSI PENERAPAN DI INDUSTRI NASIONAL	27
5.1. Rencana Induk Pembangunan Industri Nasional	27
5.2. Perlunya Kemandirian Dalam Pemenuhan Bahan Baku Bagi Industri Hilir	31
5.3. Prospek Ekonomi Produksi Paduan Berperforma Tinggi	31
5.4. Konsep Implementasi Yang Diusulkan	34
5.4.1. Konsep Integrasi Hulu-Hilir	34
5.4.2. Perlunya Dibangun Sebuah Teaching Industry	36
5.5. Jenis Produk Inovasi Yang Dapat Dihasilkan	38
5.6. Upaya dan Kerjasama Yang Telah Dirintis	40
6. PENUTUP	43
UCAPAN TERIMA KASIH	44
DAFTAR PUSTAKA	45
CURRICULUM VITAE	49

SINOPSIS

Meningkatnya jumlah penduduk yang diiringi dengan peningkatan taraf hidup secara global mengarah pada peningkatan kebutuhan akan energi dan material. Sementara itu, sejalan dengan upaya pemanfaatan energi baru dan terbarukan, pemakaian energi fosil yang tak terbarukan diperkirakan masih cukup tinggi hingga kurun 2050. Di sisi lain, pemakaian logam dan paduannya sebagai material teknik juga diperkirakan terus meningkat di tengah upaya penghematan efisiensi pemakaian material logam. Dorongan untuk penghematan pemakaian paduan logam teknik ini dilatarbelakangi oleh kenyataan akan keterbatasan sumber daya alam, sementara rantai produksi yang panjang, mulai dari kegiatan eksplorasi, penambangan, ekstraksi, rekayasa pepaduan logam hingga manufaktur, memerlukan pemikiran, energi dan biaya yang tidak kecil.

Peningkatan efisiensi energi pada fasilitas pembangkit energi dan daya dapat dilakukan salah satunya melalui peningkatan temperatur operasi. Hal ini mengarah pada pengembangan paduan-paduan logam teknik yang mampu bekerja pada temperatur yang semakin tinggi dalam lingkungan kerja yang semakin ekstrem, yaitu melibatkan beban yang semakin tinggi dan lingkungan yang semakin korosif. Sementara itu, dengan meningkatnya temperatur maka pergerakan atom dan ion yang semakin tinggi berpengaruh terhadap perubahan struktur logam yang

ujungnya menurunkan performanya dalam memenuhi fungsinya sebagai material teknik. Oleh sebab itu, pengembangan paduan logam berperforma tinggi yang mampu memberikan peningkatan efisiensi energi dan sekaligus upaya konservasi sumber daya alam serta penurunan emisi gas CO₂ yang merugikan menjadi target di beberapa lembaga dan institusi penelitian dan pengembangan di berbagai negara yang peduli terhadap keamanan pasokan energi dan kebersihan lingkungan. Selain ketahanan terhadap temperatur yang semakin tinggi, peningkatan kekuatan paduan logam akan memberikan penghematan energi dan pemakaian material, tidak saja untuk fasilitas pembangkit energi dan daya namun juga untuk fasilitas transportasi termasuk kendaraan listrik.

Kelompok Keahlian Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung, bekerjasama dengan beberapa institusi dan lembaga penelitian lain seperti Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN) serta Pusat Telimek LIPI, dalam beberapa dekade telah berupaya turut andil melakukan pengembangan paduan logam berperforma tinggi untuk dapat digunakan pada temperatur serta rasio antara kekuatan dan berat yang semakin tinggi. Beberapa paduan logam berperforma tinggi berbasis nikel dan besi-nikel (Fe-Ni) menjadi target utama, mengingat ketersediaan bijih yang memadai di dalam negeri. Hal ini juga didasari oleh target Pemerintah untuk menjadikan Indonesia sebagai negara industri tangguh pada tahun 2035, sebagaimana termaktub dalam Rencana Induk Pengembangan Industri Nasional

(RIPIN) tahun 2015-2035. Untuk menjadi negara industri tangguh yang mampu memproduksi peralatan yang dibutuhkan di industri pembangkit energi dan daya, pertambangan dan migas, transportasi, manufaktur, alutsista dan industri hilir lainnya, diperlukan bahan baku berupa paduan-paduan logam berperforma tinggi, seperti baja khusus (*special steels*) dan *superalloys*, sementara hingga kini kesemua material ini masih harus diimpor. Oleh sebab itu, sebagai tindak lanjut dari program hilirisasi, kemandirian produksi paduan-paduan logam berperforma tinggi perlu direalisasikan untuk mewujudkan target Indonesia menjadi negara industri tangguh pada tahun 2035.

Hasil pemahaman aspek metalurgi dan tekno-ekonomi dari penelitian serta pengembangan paduan-paduan logam bereperforma tinggi yang telah dilakukan di skala laboratorium, selanjutnya telah diupayakan dalam tahap awal untuk dapat diterapkan di dalam negeri, melalui kerjasama dengan PT. Karakatau Steel serta PT. Pindad. Model fasilitas produksi yang hendak dibangun adalah Teaching Industry atau Teaching Factory yang berisi peralatan produksi skala kecil berserta perangkat lunak perancangan paduan logam yang mampu digunakan untuk menghasilkan portofolio produksi berbagai paduan-paduan logam berperforma tinggi sebagai acuan untuk produksi di industri komersial, karena peralatannya yang bersifat generik.

Upaya realisasi produksi paduan logam berperforma tinggi di dalam negeri dimulai dari pembahasan bersama antara Tim Pengusul, Fakultas

Teknik Pertambangan dan Perminyakan ITB dan Direktorat Jenderal Penguatan Inovasi, Kemenristekdikti, pada tanggal 13 April 2017 di kampus ITB Bandung, yang menghasilkan rekomendasi untuk pengusulan proposal Teaching Industry. Pembahasan proposal dilakukan bersama Deputi Menteri, Kementerian BUMN di Jakarta pada tanggal 15 Mei 2017 merekomendasikan untuk menindaklanjuti kerjasama dengan perusahaan BUMN yang terkait. Tahap awal kerjasama telah disepakati antara ITB bersama PT. Pindad (Persero) dan PT. Krakatau Steel. Pembahasan rinci aspek tekno ekonomi dilakukan secara terpisah dengan ALD Jerman dan Consarc USA, dalam kurun waktu antara Agustus 2017 hingga November 2018. Usulan Teaching Industry untuk produksi paduan-paduan logam berperforma tinggi yang telah lengkap kemudian diajukan pendanaannya kepada Direktorat Jenderal Penguatan Inovasi, Kemenristekdikti, dengan beberapa kali perbaikan mengenai aspek kelayakan yang berlangsung dalam kurun waktu hingga September 2019. Karena adanya perubahan Kementerian, Pada Januari 2020 harus diusulkan kembali kepada Direktur Inovasi. Meskipun hingga kini usulan tersebut belum mendapat persetujuan pendanaannya, namun skema dan sumber pendanaan lain tetap diupayakan dalam rangka untuk mewujudkan kemandirian produksi material maju di tanah air.

PENGEMBANGAN PADUAN LOGAM BERPERFORMA TINGGI DAN UPAYA INISIASI PRODUKSINYA DI DALAM NEGERI

1. PENDAHULUAN

1.1 Pemenuhan Kebutuhan Dasar Manusia

Jumlah penduduk dunia saat ini telah melebihi 7 milyar dan diperkirakan akan terus meningkat terutama di negara-negara yang sedang tumbuh perekonomiannya, termasuk Indonesia. Meningkatnya jumlah penduduk ini diiringi pula dengan kecenderungan terhadap meningkatnya tuntutan kualitas hidup yang ujungnya berimbas terhadap semakin tingginya tuntutan terhadap pemenuhan akan kebutuhan dasar manusia, yaitu energi, material dan spiritual. Khusus dalam hal material dan energi, karena keduanya sebagian besar diperoleh dari dalam bumi berupa deposit mineral serta saat ini masih bertumpu pada energi fosil, maka sifatnya tak terbarui (*non-renewable*).

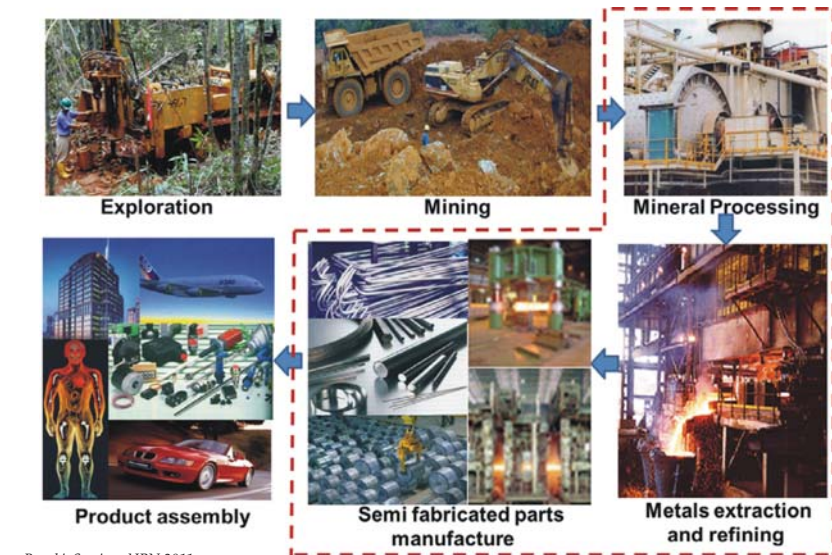
Di dalam mineral bijih terkandung unsur-unsur logam yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan, satu diantaranya yang paling banyak adalah menjadi material teknik (*engineering materials*) berupa paduan logam (*alloys*), seperti baja (*steels*), besi cor (*cast irons*), paduan nikel (*Ni-alloys*), paduan tembaga (*Cu-alloys*), paduan aluminium (*Al-alloys*), paduan titanium (*Ti-alloys*) dan paduan-paduan emas (*Au-alloys*) dengan unsur-unsur pepadu yang bervariasi seperti unsur-unsur

refraktori dan reaktif diantaranya Mo, W, Ta, Nb, V dan unsur-unsur tanah jarang. Paduan logam ini menjadi bagian dari material teknik lainnya, yaitu polimer, keramik dan komposit.

Untuk dapat diekstraksi menjadi logam secara ekonomis, maka mineral logam dalam endapan atau deposit mineral harus telah dipastikan masuk dalam kategori bijih yang dari padanya kemudian dapat diperoleh logam sebagai bahan baku setengah jadi melalui proses pengolahan meliputi konsentrasi mineral, ekstraksi dan pemurnian. Oleh sebab itu, agar dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku material teknik berupa paduan logam untuk pembuatan komponen dan peralatan di semua sektor industri seperti peralatan pertanian dan makanan, kesehatan, konstruksi, transportasi, elektronika dan telekomunikasi, pembangkit energi, pertahanan – keamanan, pertambangan dan industri kimia, maka mineral di dalam bijih perlu diolah melalui rantai produksi yang relatif panjang hingga menjadi paduan logam yang menjadi lingkup kegiatan metalurgi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.

Mengingat sifatnya yang tak terbarui, dari sumber daya yang terbatas dan semakin sulit terjangkau dengan kadar semakin rendah, maka rekayasa paduan logam yang merupakan kegiatan hilir dari rantai produksi material teknik berbasis logam, harus mempertimbangkan aspek keberlanjutan, yaitu umur pakai yang panjang dan mampu untuk didaur ulang. Dua aspek tersebut harus dimasukkan dalam tahap awal disain paduan logam selain pertimbangan terhadap persyaratan teknis,

ekonomis dan ekologis, seperti tahan korosi, kekuatan yang tinggi, sangat tangguh, mudah dibuat, relatif ekonomis dan tidak beracun.



Basuki, Seminar UPN 2011

Gambar 1. Rantai produksi pemenuhan kebutuhan logam dengan garis berarsir masuk dalam lingkup kompetensi metalurgi.

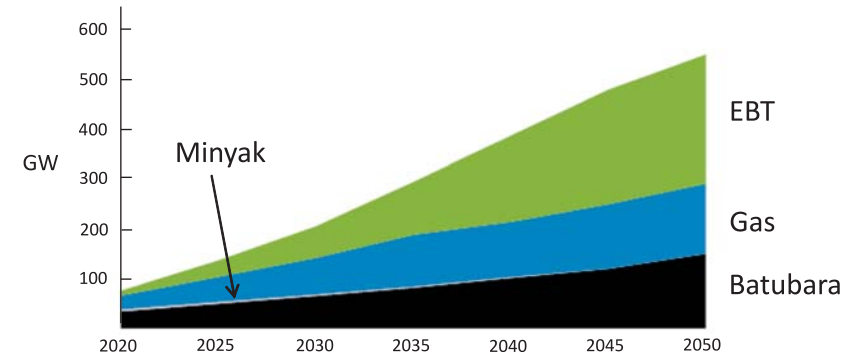
1.2. Ketergantungan (Masih) Terhadap Energi Fosil

Tuntutan kebutuhan energi yang terus meningkat telah mendorong upaya untuk memanfaatkan sumber energi baru dan terbarukan, seperti energi surya dan angin, gelombang dan arus laut serta panas bumi serta sumber daya hayati. Namun demikian, diperkirakan hingga tahun 2050 energi fosil berupa gas alam dan batubara masih cukup signifikan sebagai sumber energi bagi pemenuhan energi dunia sejalan dengan peningkatan

yang berlipat dari energi baru dan terbarukan serta energi nuklir seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Hal yang sama juga berlaku bagi pemenuhan energi listrik nasional, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Selain terbatas dan tak terbarukan, pemakaian energi fosil juga menghasilkan emisi CO₂ yang merugikan bagi lingkungan. Oleh sebab itu, beberapa lembaga dan pemerhati di berbagai belahan dunia yang peduli terhadap lingkungan dan pasokan energi yang aman telah memberikan peringatan akan perlunya pemberlakuan teknologi yang lebih efisien akan energi serta lebih ramah lingkungan, terutama untuk peralatan pembangkit listrik dan daya.



Gambar 2. Prediksi kebutuhan energi dunia hingga tahun 2050 (World Economic Forum 2019).



Gambar 3. Pangsa Kapasitas Pembangkit Listrik Sampai 2050 (Skenario BaU) (DEN 2019).

2. PENINGKATAN EFISIENSI ENERGI DAN TANTANGANNYA

2.1. Konsep Peningkatan Efisiensi Energi Pembangkit Listrik dan Daya

Mengingat sifatnya yang *non-renewable* maka pemakaian energi fosil yang seefisien mungkin merupakan tuntutan terhadap konservasi sumber daya dan sekaligus penurunan emisi CO₂. Upaya untuk meningkatkan efisiensi energi pada peralatan dan mesin pembangkit listrik dan daya berbahan bakar fosil selalu menuntut semakin meningkatnya performa material teknik yang menyertainya. Hal ini dilandasi oleh prinsip termodinamika yang mengharuskan temperatur operasi mesin pembangkit yang lebih tinggi untuk mendapatkan efisiensi yang semakin tinggi, yaitu $\eta = (T_h - T_c)/T_h$ dimana T_h dan T_c masing-masing adalah temperatur operasi mesin pembangkit energi dan temperatur kamar. Oleh

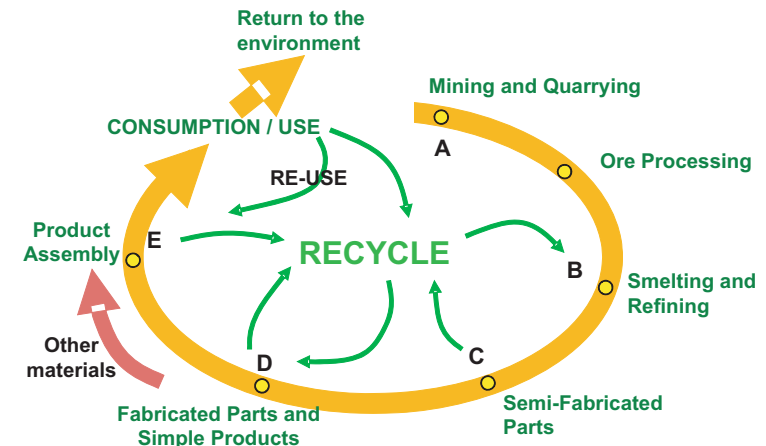
sebab itu, upaya untuk mendapatkan material yang mampu dioperasikan pada temperatur yang semakin tinggi menjadi salah satu jawaban terhadap efisiensi bahan bakar fosil dan isu lingkungan.

2.2. Tantangan Terhadap Upaya Peningkatan Efisiensi Energi

Paduan logam yang diperoleh dari hasil ekstraksi logam terhadap mineral yang ada di dalam bijih yang ditambang, kemudian dipadu (*alloying*) dengan unsur-unsur lain, pada dasarnya secara termodinamika dalam keadaan yang tidak stabil karena energi bebasnya yang semakin tinggi. Oleh sebab itu, paduan logam teknik akan selalu berkecenderungan untuk kembali ke bentuk semula seperti yang ada di alam, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4, yang prosesnya dikenal dengan korosi. Khususnya dalam pemakaian pada temperatur tinggi, peristiwa oksidasi menjadi moda korosi temperatur tinggi yang paling signifikan. Peristiwa kembalinya paduan logam ke bentuk alamiah semula akan semakin cepat bila logam dioperasikan pada temperatur yang semakin tinggi.

Berbeda dengan pemakaian pada temperatur kamar atau temperatur rendah, material teknik akan menghadapi kondisi operasi yang lebih berat pada temperatur tinggi. Karena pergerakan atau difusi atom-atom dalam paduan logam semakin cepat secara eksponensial terhadap temperatur, maka umumnya kekuatan material menjadi menurun terhadap temperatur. Selain itu, dengan semakin mudahnya atom bergerak maka

struktur mikro yang menyusun material juga akan lebih cepat berubah, namun sayangnya hal ini selalu menyebabkan penurunan performa dari material.



Gambar 4. Siklus pemanfaatan logam, dari mineral berkecenderungan kembali ke bentuk semula. (Mineral Resources to Manufactured Products, Toward a value-added Mineral and Metal Strategy for Canada, Government of Canada).

Bila pada temperatur rendah deformasi plastis logam berlangsung melalui mekanisme pergerakan dislokasi pada bidang slip dan pembentukan kembaran (*twinning*), maka pada temperatur tinggi akan ada tambahan mekanisme deformasi plastis yang mungkin terjadi yaitu perayapan (*creep*) yang disebabkan karena kemampuan dislokasi untuk memanjat (*dislocation climbing*) yang menyebabkan menurunnya kekuatan perayapan (*creep strength*). Dengan semakin meningkatnya temperatur maka kecepatan degradasi logam akan semakin tinggi, terlebih bila dalam

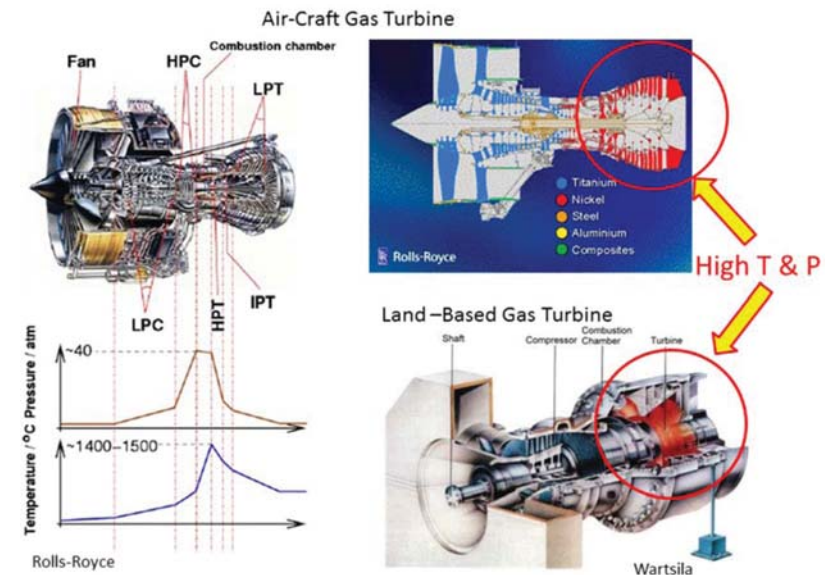
lingkungan terdapat spesi kimia lain yang reaktif dan merusak selain oksigen seperti belerang atau sulfur dan halida. Oleh sebab itu, kerusakan logam pada instalasi pembangkit listrik di daerah yang dekat pantai dan di kawasan industri relatif tinggi karena keberadaan garam halida seperti NaCl, terlebih bila kandungan belerang dalam bahan bakar semakin tinggi.

3. PEMAKAIAN LOGAM PADA TEMPERATUR TINGGI

3.1. Kondisi Lingkungan Operasi Temperatur Tinggi

Diantara teknologi pembangkit listrik dan daya yang paling menguras tenaga dan dana dalam hal pengembangan material temperatur tingginya adalah mesin turbin gas untuk pesawat terbang. Oleh sebab itu mesin turbin gas modern yang saat ini digunakan pada dasarnya telah mengadopsi teknologi, *knowhow* dan pengetahuan material dan metalurgi yang paling maju yang ada hingga saat ini, termasuk melibatkan paduan logam yang paling tahan pada kondisi yang paling ekstrim. Dari pengembangan paduan logam untuk komponen kritis pada mesin jet pesawat terbang tersebut selanjutnya hasilnya juga ditularkan atau digunakan untuk keperluan pada teknologi pembangkit listrik dan daya seperti PLTG, PLTU modern, PLTN, dan mesin turbo kendaraan bermotor dan kapal laut serta industri kimia. Dalam mesin turbin gas pesawat terbang tersebut, daerah yang paling kritis sehingga paling menantang bagi para praktisi dan peneliti untuk menaruh perhatian khusus adalah

daerah turbin inlet, yaitu komponen bilah turbin (*turbine blade*) yang berputar sangat kencang karena berinteraksi dengan gas hasil pembakaran yang bercampur dengan udara bertekanan dan bersuhu tinggi yang keluar dari ruang bakar (*combustion chamber*) dan diarahkan oleh *vanes* atau *nozzle* seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Konfigurasi mesin turbin gas pesawat terbang dan turbin gas pembangkit listrik (Rolls-Royce dan Wartsilla).

Dengan suhu gas hasil pembakaran mencapai lebih dari 1600°C, tekanan tinggi serta interaksinya dengan gas yang oksidatif dan sekaligus korosif, karena selain mengandung udara berlebih, gas ini juga mengandung spesi garam yang dapat leleh dan mengkorosi permukaan

material, seperti Na_2SO_4 yang terbentuk dari reaksi antara O_2 , SO_2 , H_2O dan NaCl , maka persyaratan pemakaian material di daerah ini adalah yang paling ketat.

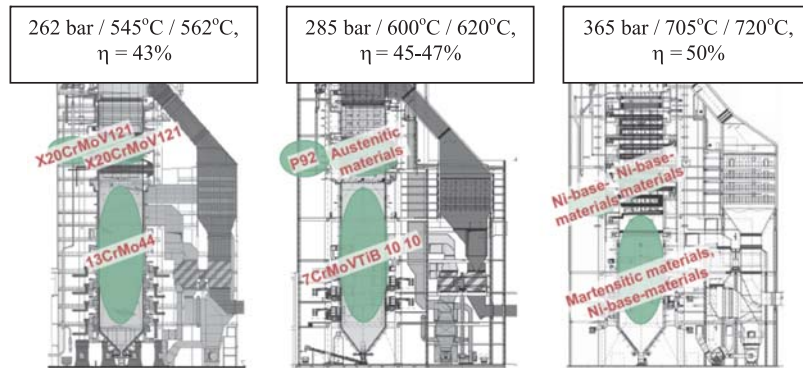
Persyaratan utama material yang digunakan dalam kondisi ekstrim seperti itu yaitu harus memiliki kombinasi sifat yang tinggi dalam hal titik leleh, kekuatan, ketangguhan, ketahanan perayapan (*creep resistance*), ketahanan leleh termal (*thermal fatigue*), ketahanan oksidasi dan *hot corrosion* (korosi karena garam leleh) serta kestabilan struktur mikro, kesemuanya pada temperatur tinggi. Hal yang terakhir ini termasuk penting karena pemakaian pada temperatur tinggi cenderung mengaktivasi atom-atom di dalam paduan logam sehingga transformasi fasa yang dikontrol oleh difusi dan menyebabkan pembentukan fasa baru yang merugikan dan/atau memperbesar ukuran partikel endapan penguat hasil perlakuan panas tidak dapat dihindari sehingga kekuatan material menjadi menurun terhadap waktu karena jarak antar partikel menjadi semakin renggang, padahal dipahami bahwa kekuatan paduan logam sebanding dengan seperjarak antar partikel atau $\sigma_y \sim 1/\lambda$, dimana λ adalah jarak rata-rata antar partikel.

3.2. Pengembangan Paduan Logam Temperatur Tinggi

Paduan logam temperatur tinggi merupakan salah satu dan yang paling intensif dikembangkan dari kelompok paduan logam berperforma tinggi. Hingga kini turbin gas untuk pesawat jet dibuat dari paduan super

berbasis nikel (*nickel based superalloy*) yang diperkuat oleh partikel endapan fasa intermetalik γ' $\{\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})\}$ yang teratur (*ordered*) di dalam matriks larutan padat Ni (γ). Namun demikian, karena paduan logam ini dibatasi kemampuannya hingga kira-kira 1150°C saja maka komponen ini memerlukan pendingin dan atau *thermal barrier coating*. Karena keterbatasan tersebut, upaya pengembangan paduan dan material lain yang mengarah ke "*beyond superalloy*" yang mampu dioperasikan pada temperatur yang lebih tinggi dipandang sebagai semangat dan keseriusan upaya manusia untuk meningkatkan efisiensi energi dan pengurangan emisi gas yang merugikan.

Kalaupun paduan super berbasis nikel yang menjadi material utama dalam mesin turbin gas pesawat terbang pada akhirnya nanti dapat diganti oleh paduan logam atau material lain yang berperforma lebih baik, paduan super dipercaya masih akan tetap berperan di industri pembangkit lainnya, terutama karena dalam waktu ke depan akan banyak dilakukan penggantian material di PLTU dan PLTG terutama di negara-negara yang sedang berkembang yang sebelumnya menggunakan paduan logam yang hanya memberikan efisiensi rendah karena tuntutan harga material yang murah. Oleh sebab itu, paduan super berbasis nikel mungkin akan semakin banyak digunakan untuk pembangkit listrik tenaga gas dan tenaga uap, yang besar kemungkinan dapat mengurangi emisi gas dan meningkatkan efisiensi energi dari kira-kira 40% saat ini menjadi 50%, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Kondisi operasi PLTU dan material yang digunakan untuk operasi temperatur tinggi (Wiswanathan 2004).

4. KONTRIBUSI KEILMUAN BAGI PENGEMBANGAN PADUAN LOGAM BERPERFORMA TINGGI

Paduan-paduan logam yang didedikasikan untuk pemakaian pada temperatur yang semakin tinggi dalam upaya mendapatkan efisiensi energi yang lebih tinggi untuk mesin pembangkit energi dan daya telah dilakukan di Laboratorium Kehandalan Logam dan Korosi serta di Kelompok Keahlian Teknik Metalurgi, FTTM-ITB. Paduan-paduan logam tersebut menjadi bagian dari paduan logam berperforma tinggi lainnya yang digunakan dalam produksi komponen berbagai peralatan produksi, seperti pengembangan baja ultra kekuatan tinggi atau *advanced high strength steels* (AHSS) yang memberikan rasio antara kekuatan dan berat jenis (*strength to weight ratio*) yang semakin tinggi untuk kendaraan, termasuk kendaraan listrik, sehingga lebih hemat energi. Beberapa

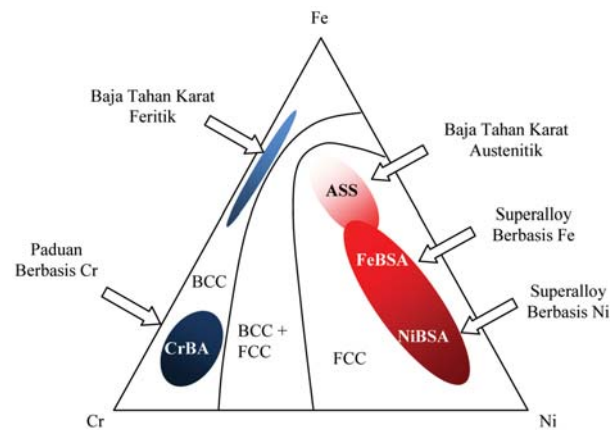
diantara hasil pengembangan yang telah dilakukan diberikan dalam sub-bab berikut.

4.1. Pengembangan Paduan Logam Berbasis Fe dan Ni

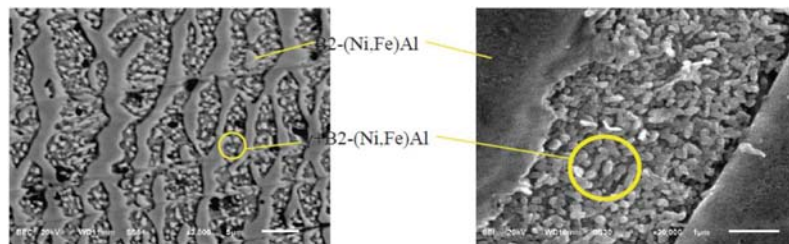
Beberapa uji coba dan pengembangan paduan logam berbasis Fe-Ni-Cr dan Fe-Ni-Cr-Al dengan modifikasi penambahan unsur-unsur logam tanah jarang telah dilakukan melalui peleburan menggunakan tanur busur listrik dengan variasi komposisi kimia. Basis pengembangan paduan ini mengacu sistem terner Fe-Ni-Cr seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Beberapa logam yang telah diproduksi di dalam negeri dimanfaatkan untuk pengembangan paduan logam ini, yaitu fero-nikel (Fe-Ni) karbon rendah yang diproduksi PT. Antam Tbk. dan *ingot* aluminium murni dari PT. Inalum. Logam-logam lain yang diperlukan namun belum diproduksi di dalam negeri dibeli dari Sigma Aldrich.

Pengurangan atau penggantian Cr dengan Al sebagai unsur penguat utama dalam sistem Fe-Ni-Cr mendapat perhatian khusus karena Al lebih murah, sifat ketahanan oksidasi dari Al_2O_3 lebih tinggi dibandingkan Cr_2O_3 , lebih ringan dan memberikan penguatan yang lebih besar melalui pengendapan partikel penguat $B_2-(Fe,Ni)Al$. Percobaan mengenai pengaruh komposisi kimia terhadap evolusi struktur mikro paduan Fe-Ni-Al-Cr pada temperatur tinggi telah dilakukan. Beberapa paduan yang telah dibuat diantaranya adalah Fe-13.7Ni-35Al-2Cr, Fe-13Ni-35Al-5Cr dan Fe-12Ni-35Al-10Cr (dalam proses berat).

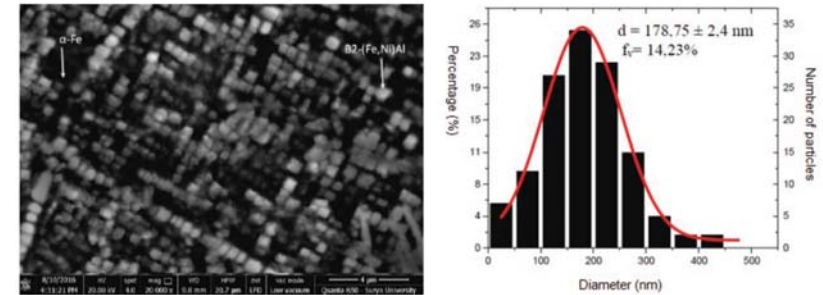
Beberapa struktur mikro yang diperoleh hasil dari perlakuan panas menunjukkan terbentuknya partikel B2-(Fe,Ni)Al berukuran nano yang terdistribusi merata di dalam matriks serta beragam morfologi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8, 9, 10 dan 11 yang ditemukan dalam paduan-paduan logam dengan komposisi kimia yang berbeda.



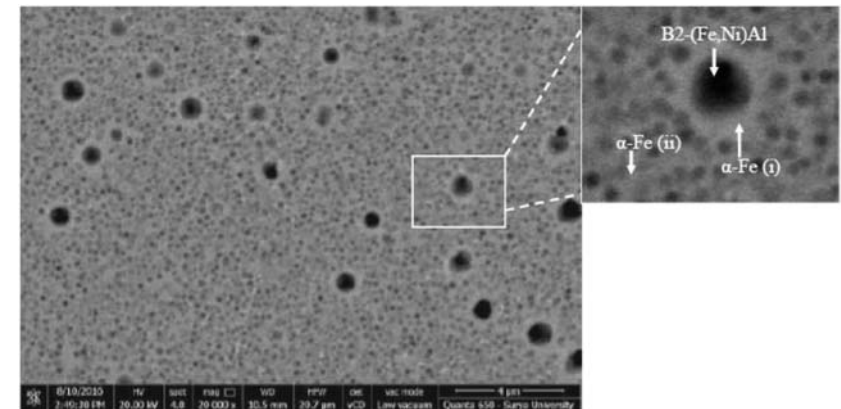
Gambar 7. Variasi paduan logam yang dapat diproduksi dari basis Fe-Ni-Cr (Jonsson dkk. 2005).



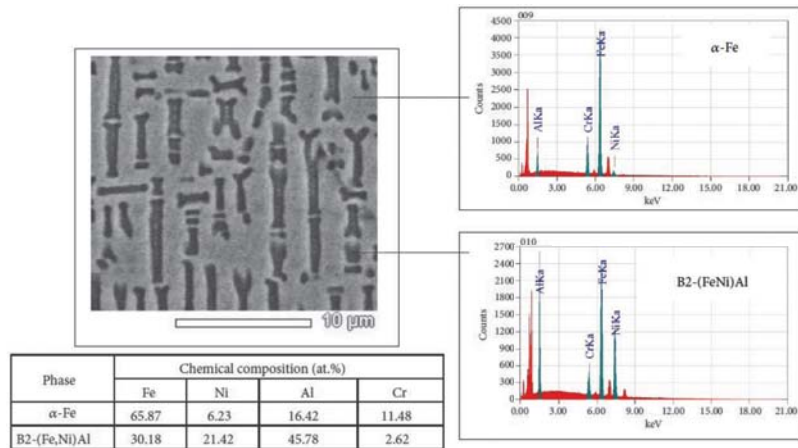
Gambar 8. Struktur mikro paduan Fe-21Ni-20Al, yang di-ageing pada 700°C selama 24 jam (K. A. Fitriani and E. A. Basuki, 214).



Gambar 9. Struktur mikro yang menunjukkan pembentukan partikel penguat B2-(Fe,Ni)Al berukuran nano (I. Fantowi dan E.A. Basuki, 2016).



Gambar 10. Distribusi partikel B2-(Fe,Ni)Al primer dan sekunder berukuran nano dalam paduan Fe-Ni-Cr-Al yang di-ageing pada 650°C selama 48 jam (Y.G. Yanas dan E.A. Basuki, 2016).



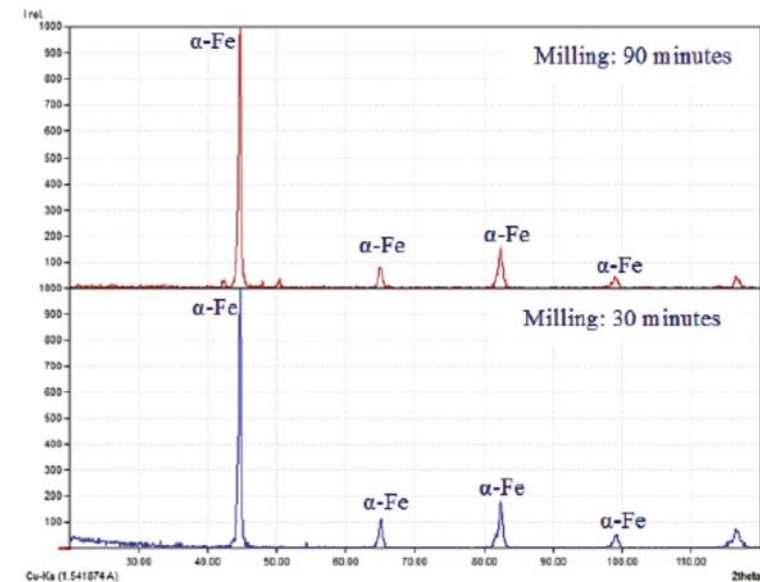
Gambar 11. Dispersi partikel “bone-like” B2-(Fe,Ni)Al dalam matriks ferit α (Basuki dkk 2019).

4.2. Pengembangan Baja Feritik Diperkuat Dispersi Partikel Oksida

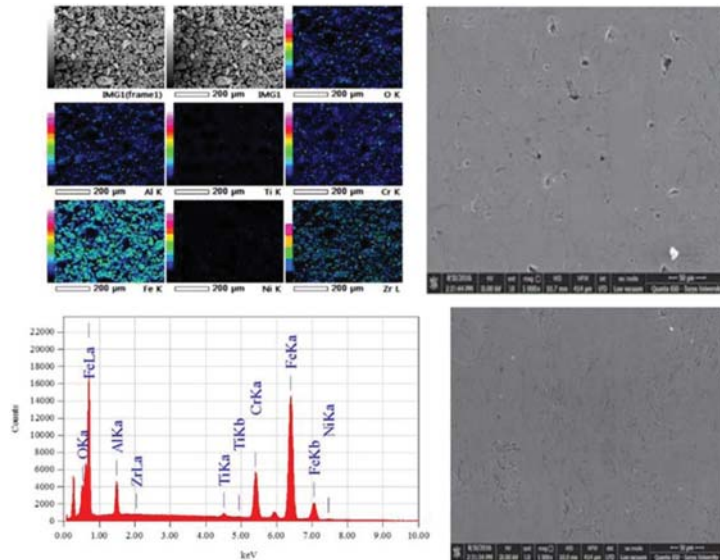
Persoalan utama paduan diperkuat B2-(Fe,Ni)Al dan γ' -Ni₃(Al,Ti) adalah peristiwa pengkasaran ketika dioperasikan pada temperatur tinggi sehingga kekuatannya menurun terhadap waktu. Oleh sebab itu, paduan *oxide dispersion strengthening* (ODS) yang diperkuat oleh dispersi partikel oksida berukuran nano memberikan kestabilan partikel penguat oksida karena tidak akan mengalami pengkasaran.

Pengembangan baja feritik ODS telah dilakukan terutama untuk komponen temperatur tinggi khususnya untuk reaktor nuklir PLTN, bekerjasama dengan Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN). Paduan logam ini diperkuat oleh dispersi partikel oksida Y₂O₃ dan ZrO₂ berukuran

nano. Gambar 12 menunjukkan hasil XRD terhadap matriks dari proses pepaduan mekanik (*mechanical alloying*) yang menunjukkan fasa feritik yang homogen. Komposisi baja feritik ODS yang telah dicoba di adalah Fe-16Cr-0,4Y₂O₃, Fe-16Cr-4Al-0,4Y₂O₃ dan Fe-16Cr-4Al-1Ni-0,4Y₂O₃. Pepaduan mekanik dilakukan menggunakan *planetary ball mill* yang hasilnya kemudian dikenakan kompaksi dan sintering pada temperatur antara 900 hingga 1100°C.



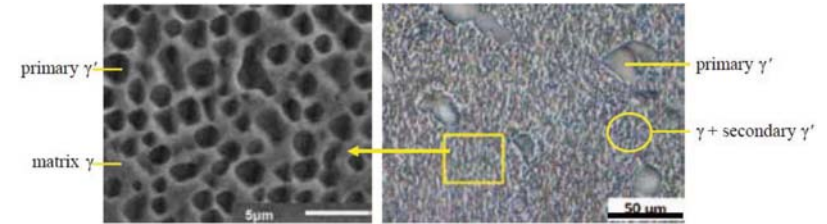
Gambar 12. XRD terhadap matriks baja feritik ODS (Basuki dkk., 2018).



Gambar 13. Serbuk yang digunakan untuk ODS dan struktur mikro baja feritik ODS hasil sintering (Triastomo, Prajitno dan Basuki dkk., 2018).

4.3. Pengembangan Superalloy Berbasis Nikel

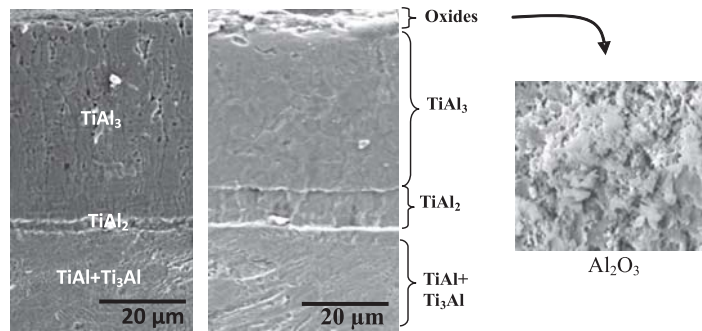
Paduan super yang telah dikembangkan memiliki komposisi kimia Ni-12Al-9Cr-4Ti dengan modifikasi molybdenum (Mo) yang bervariasi. Komposisi kimia yang paling memberikan fraksi volume partikel penguat γ' -Ni₃(Al,Ti) yang paling tinggi adalah Ni-11,1Al-9Cr-3,6Ti-2,2Mo. Struktur mikro paduan ini ditunjukkan pada Gambar 14. Modifikasi dengan penambahan unsur pemadu germanium (Ge) dan zirkonium (Zr) telah dilakukan. Diantaranya yang memberikan performa ketahanan oksidasi yang baik adalah Ni-21Cr-2,7Ti-0,9Al-0,005C-2Ge-0,5Zr.



Gambar 14. Struktur mikro paduan Ni-11,1Al-9Cr-3,6Ti-2,2Mo (Basuki dkk., 2018).

4.4. Pengembangan Senyawa Intermetalik Berbasis Titanium

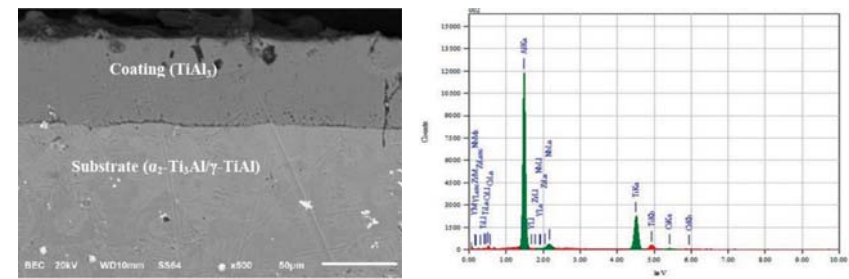
Pengembangan material sebagai pengganti superalloy berbasis nikel yang digunakan untuk komponen peralatan industri pembangkit listrik dan daya, diarahkan pada penggunaan senyawa-senyawa intermetalik berbasis aluminida yang memiliki titik leleh yang lebih tinggi dan lebih ringan. Salah satu yang paling banyak mendapat perhatian adalah paduan berbasis titanium aluminida γ -TiAl. Namun demikian, paduan ini relatif getas. Pengembangan telah dilakukan mengarah pada paduan dua fasa γ -TiAl+ α_2 -Ti₃Al yang lebih tangguh dan lebih ulet. Namun demikian, karena kandungan aluminiumnya lebih sedikit atau berkurang, maka dominasi pembentukan oksida TiO₂ yang cepat menyebabkan paduan ini kurang tahan terhadap oksidasi temperatur tinggi. Solusi untuk ketahanan oksidasi temperatur tinggi adalah dengan menerapkan coating berbasis TiAl₃. Modifikasi lain dilakukan dengan penambahan Y dan Zr menghasilkan paduan Ti-40Al-2Cr-2Nb-0,4Y-0,2Zr yang di coating dengan TiAl₃. Gambar 15 menunjukkan paduan tersebut yang di coating dan dikenakan oksidasi dengan oksida luar Al₂O₃ yang sangat stabil.



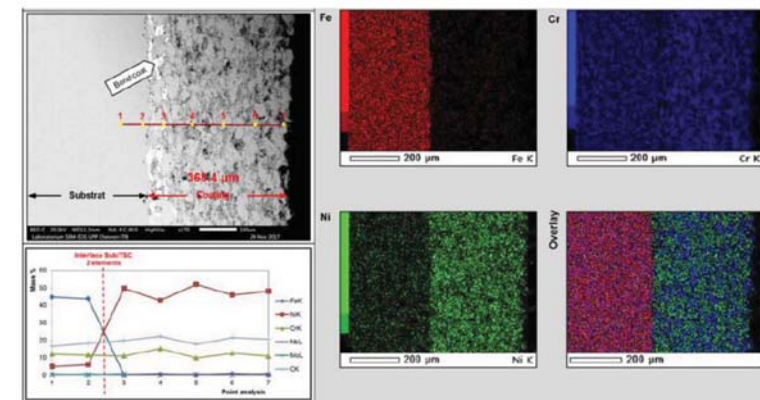
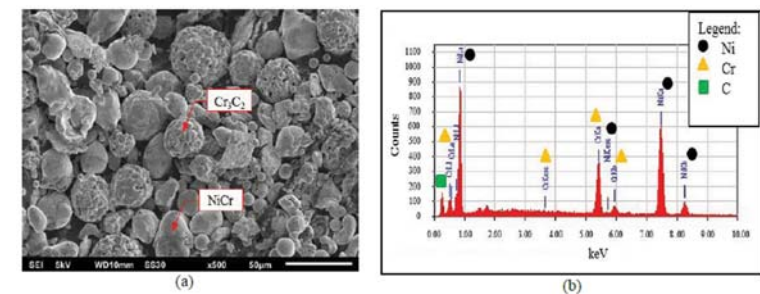
Gambar 15. Paduan Ti-40Al-2Cr-2Nb-0.4Y-0.2Zr yang di *coating* dengan TiAl₃ menghasilkan lapisan protektif Al₂O₃ (Eddy A. Basuki dkk, 2015).

4.5. Pengembangan Sistem Proteksi Melalui *Coating*

Paduan-paduan untuk aplikasi temperatur tinggi memerlukan ketahanan oksidasi dan *hot corrosion*. Oksida protektif yang biasanya diterapkan adalah Al₂O₃ dan Cr₂O₃. Namun demikian, penambahan Al dan Cr ke dalam paduan seringkali tidak kompatibel dengan sifat mekanis yang disyaratkan. Oleh sebab itu, *coating* dengan kandungan Al dan Cr yang relatif tinggi menjadi solusi. Pengembangan *coating* telah dilakukan menggunakan beberapa metoda, diantaranya adalah *pack cementation*, *enamel coating* dan *overlay coating* menggunakan *high velocity oxy-fuel* (HVOF) bekerja sama dengan Pusat Telimek LIPI dan Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN). Gambar 16 dan 17 adalah contoh hasil *coating* yang telah dilakukan terhadap paduan intermetalik γ -TiAl+ α_2 -Ti₃Al menggunakan metoda *pack aluminizing* dan paduan baja untuk temperatur tinggi yang di *coating* dengan teknik *spray coating* HVOF.



Gambar 16. *Coating* TiAl₃ pada paduan intermetalik γ -TiAl+ α_2 -Ti₃Al (E.A. Basuki, M.I. Yuliansyah, F.M. Rahman, F. Muhammad, D. H. Parjitno, (2016).

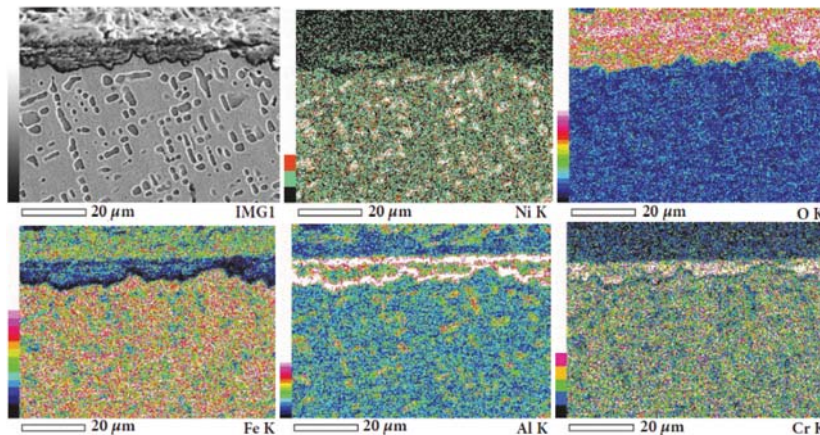


Gambar 17. Bahan baku untuk *spray coating* Cr₃C₂ menggunakan teknik HVOF (M. Walid, E.A. Basuki, B. Prawara, (2018).

4.6. Pengujian Ketahanan Korosi Temperatur Tinggi

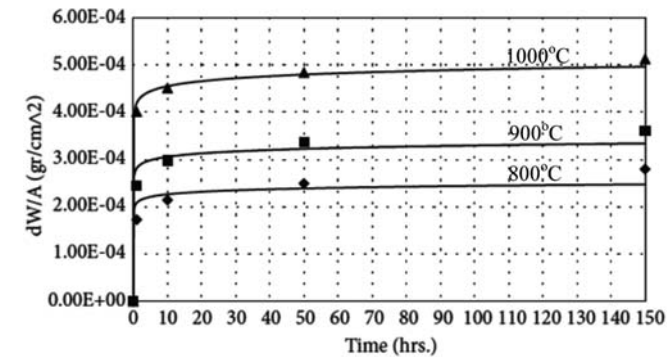
Salah satu sifat yang paling penting dari paduan logam yang didedikasikan untuk pemakaian pada temperatur yang semakin tinggi adalah ketahanan korosi temperatur tinggi, yang mekanisme degradasinya berbeda dengan korosi pada lingkungan *aqueous*.

Oksidasi dan *hot corrosion* merupakan dua moda kerusakan pada temperatur tinggi yang utama. Selain temperatur yang tinggi, lingkungan pembangkit energi dan daya dapat bersifat oksidatif maupun reduktif tergantung spesi sisa hasil pembakaran. Paduan-paduan logam yang telah dikembangkan telah diuji ketahanan oksidasi maupun ketahanan *hot corrosion*-nya.



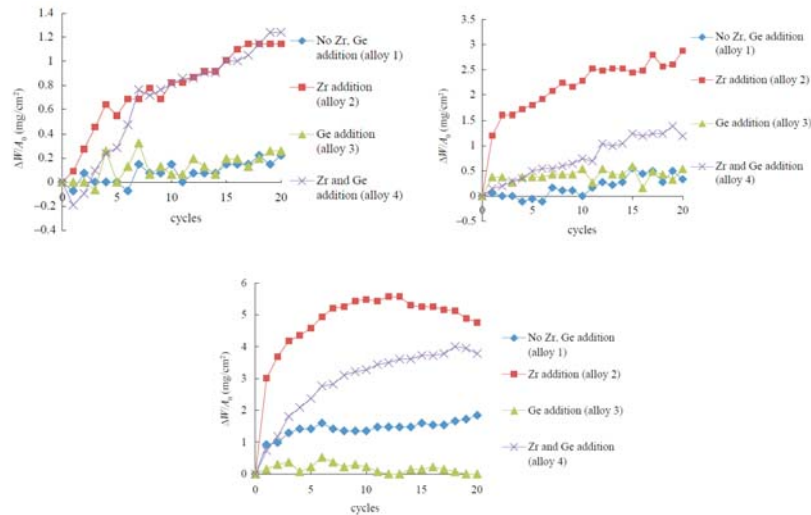
Gambar 18. Struktur mikro dan *x-ray mapping* baja feritik 69.5Fe-14Ni-9Al-7.5Cr oksidasi isothermal pada 800, 900 dan 1000°C (E.A. Basuki, D.C. Nababan, F. Muhammad, A.A. Korda, D.H. Prajitno, 2019).

Dalam sub bab ini disampaikan beberapa hasil pengujian yang telah dilakukan yang menunjukkan diperolehnya ketahanan korosi temperatur tinggi yang sangat baik. Baja feritik 69.5Fe-14Ni-9Al-7.5Cr telah diuji oksidasi isothermal pada 800, 900 dan 1000°C dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 18. Berdasarkan kurva kinetika pada Gambar 19 terlihat bahwa paduan logam yang dikembangkan memiliki ketahanan oksidasi isothermal yang sangat baik dengan pola logaritmik, semakin melambat dalam waktu pemakaian yang semakin lama.



Gambar 19. Hasil uji oksidasi baja feritik 69.5Fe-14Ni-9Al-7.5Cr pada 800, 900 dan 1000°C, (E.A. Basuki, D.C. Nababan, F. Muhammad, A.A. Korda, D.H. Prajitno, 2019).

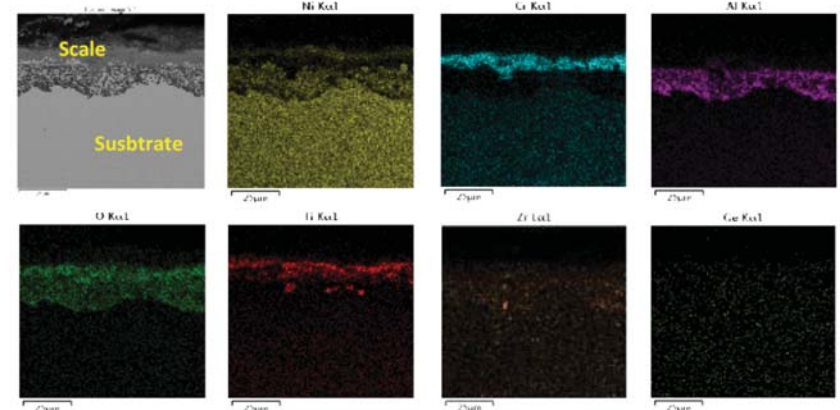
Pengujian oksidasi siklik telah dilakukan terhadap paduan *superalloy* berbasis nikel Ni-5.6Al-9.6Cr-2.4Ti -0.05C yang dimodifikasi Zr dan Ge (germanium). Pengujian pada temperatur 900, 1000 dan 1100°C diperoleh hasil bahwa paduan yang dimodifikasi dengan Ge memiliki ketahanan terhadap oksidasi siklik yang baik, Gambar 20 dan 21.



Gambar 20. Hasil uji oksidasi siklik paduan *superalloy* Ni-5.6Al-9.6Cr-2.4Ti -0.05C yang dimodifikasi Zr dan Ge pada 900, 1000 dan 1100°C, (E.A. Basuki, F. Pangestu, F.Adam, A.A. Korda, M. Fadhli, D. Prajitno, 2018).

Namun demikian, modifikasi tunggal dengan Zr tidak sebaik yang ditunjukkan oleh modifikasi dengan Ge dan kombinasi Zr dan Ge. Bila modifikasi dengan Zr telah dilakukan oleh peneliti lain, modifikasi dengan Ge baru dicoba dalam paduan ini.

Dari struktur mikro yang ditunjukkan oleh sample paduan yang dimodifikasi oleh Zr dan Ge diperoleh kesimpulan bahwa lapisan protektif oksida yang terbentuk bersifat kompak. Lapisan protektif ini didominasi oleh bagian luar Cr_2O_3 dan TiO_2 dan bagian dalam Al_2O_3 .

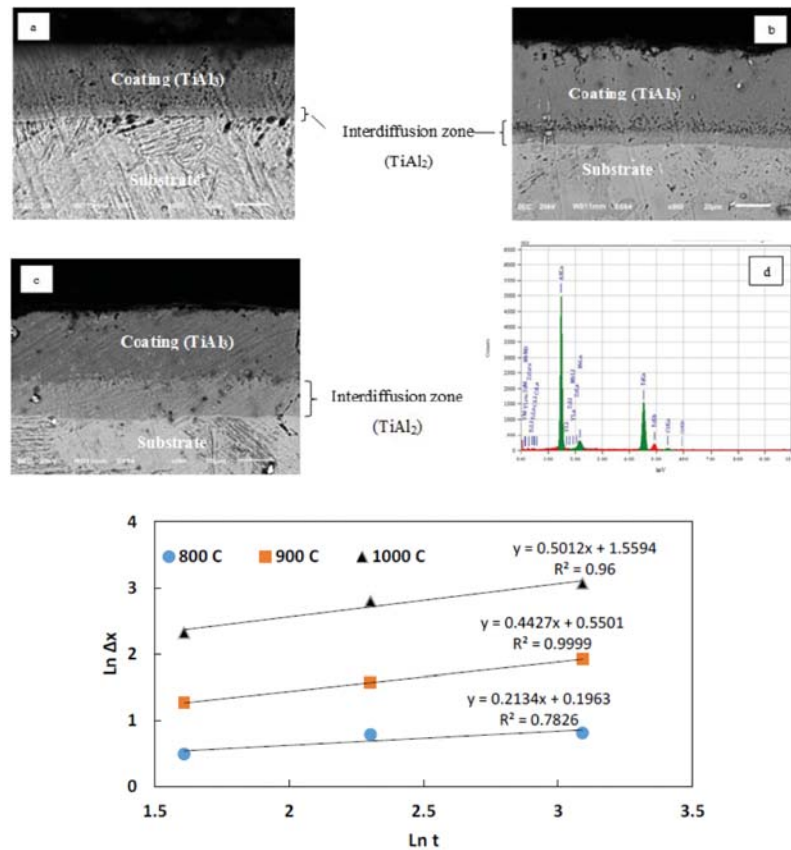


Gambar 21. X-ray mapping paduan 4 yang dioksidasi siklik pada 1100°C, (E.A. Basuki, F. Pangestu, F.Adam, A.A. Korda, M. Fadhli, D. Prajitno, 2018).

4.7. Pengujian Interdifusi Dalam Sistem *Coating*

Paduan ringan berbasis titanium Ti-47Al-2Nb-2Cr-0.5Y-0.5Zr berfasa ganda $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}+\gamma\text{-TiAl}$ yang diproteksi dengan *coating* berbasis aluminida TiAl_3 telah dikembangkan. Selain terhadap ketahanan oksidasinya, paduan ini juga telah diuji sifat interdifusinya antara matriks $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}+\gamma\text{-TiAl}$ dan *coating* pada 800, 900 dan 1000°C. Perubahan struktur mikro yang disebabkan karena berlangsungnya interdifusi dan kecepatannya ditunjukkan oleh kurva kinetika pada Gambar 22. Selain terjadinya penebalan fasa intermediet TiAl_2 , juga berlangsung penebalan *coating* secara total yang mengindikasikan berlangsungnya proses homogenisasi. Hingga kini belum ditemukan dalam literatur paduan pengujian pada sistem paduan logam sejenis yang di-*coating*. Pengembangan lebih lanjut

dengan pembentukan *diffusion barrier* sedang disiapkan yang diharapkan dapat menurunkan kecepatan interdifusi sehingga dapat meningkatkan umur pakai komponen.



Gambar 22. Struktur mikro dan kinetika hasil pengujian interdifusi paduan Ti-47Al-2Nb-2Cr-0.5Y-0.5Zr pada 800, 900 dan 1000°C, (E.A. Basuki, M.I. Yuliansyah, F.M. Rahman, F. Muhammad, D.H. Prajitno, 2016).

5. UPAYA PENERAPAN DI INDUSTRI NASIONAL

Pengetahuan yang diperoleh dari pengembangan paduan logam berperforma atau berkualitas tinggi yang dilakukan di laboratorium perlu diarahkan untuk implementasinya di industri nasional. Sementara itu, fakta menunjukkan bahwa hampir semua komponen yang dibuat dari paduan logam kualitas tinggi yang digunakan di Indonesia di berbagai sektor industri, tidak saja di industri pembangkit listrik dan daya, melainkan juga di industri manufaktur terutama di industri-industri strategis nasional, masih diimpor dari luar negeri. Paduan-paduan logam yang penting seperti *superalloy* dan baja khusus (*special steels*) belum dapat diproduksi di Indonesia. Menyadari hal ini, maka beberapa upaya untuk inisiasi produksi paduan-paduan berperforma tinggi di Indonesia perlu dilakukan. Dalam bab ini diuraikan upaya yang telah dilakukan penulis dan sejawat lintas institusi dengan terlebih dahulu melihat kebijakan pengembangan industri nasional yang ada.

5.1. Rencana Induk Pembangunan Industri Nasional

Dalam Rencana Induk Pembangunan Industri Nasional (RIPIN) 2015-2035, pembangunan industri prioritas nasional oleh Kementerian Perindustrian Republik Indonesia ditetapkan untuk dilakukan dalam tiga tahap capaian, yaitu:

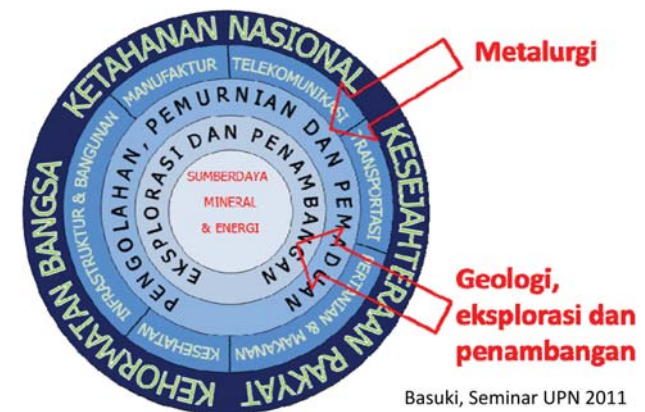
1. Tahap I (2015 - 2019): peningkatan nilai tambah sumber daya alam pada industri hulu termasuk mineral logam.

2. Tahap II (2020 - 2024): pencapaian keunggulan kompetitif dan berwawasan lingkungan melalui penguatan struktur industri dan penguasaan teknologi.
3. Tahap III (2025 - 2035): menjadikan Indonesia sebagai Negara Industri Tangguh, berdaya saing tinggi di tingkat global, berbasis inovasi dan teknologi.

Pemanfaatan sumber daya mineral dan energi di dalam negeri terutama diarahkan untuk kepentingan sebesar-besarnya bagi kepentingan nasional, sebagaimana diamanahkan dalam UUD 45 dan secara diagramatik ditunjukkan pada Gambar 23. Sebagai hasil dari capaian pada Tahap 1, program peningkatan nilai tambah mineral logam tengah berjalan, setelah ditetapkannya Undang-Undang Minerba tahun 2009, dengan upaya mengolah bijih menjadi produk bernilai tambah tinggi di dalam negeri. Produk dari pengolahan bijih ini sebagian besar berupa logam dan paduan logam setengah jadi, seperti timah (Sn), ferro-nickel (FeNi), nickel-pig iron (NPI), tembaga (Cu) dan aluminium (Al). Sebagian dari logam ini diekspor dan sebagian digunakan untuk produksi paduan logam jadi yang lebih hilir.

Bila FeNi yang produksi PT. Antam diekspor seluruhnya dalam bentuk setengah jadi, di kawasan IMIP Sulawesi Tenggara produk setengah jadi berupa NPI dan FeNi telah diolah lebih lanjut menjadi baja tahan karat seri 200 dan 304, yaitu *grade* baja tahan karat yang paling sederhana dan umumnya digunakan untuk arsitektural dan rumah

tangga serta peralatan produksi yang tidak menuntut kekuatan yang tinggi. Sementara itu, *grade* baja tahan karat yang lebih tinggi seperti baja tahan karat martensitik dan *precipitation hardened* (PH-stainless steel) yang banyak digunakan untuk keperluan dimana kombinasi kekuatan yang tinggi dan ketahanan korosi menjadi sangat penting, misalnya untuk komponen pesawat terbang dan konstruksi misil peralatan tempur, termasuk komponen untuk peralatan pemroses di industri kimia dan pengeboran minyak dan gas, belum diproduksi di Indonesia. Rekayasa paduan logam kualitas tinggi yang diperlukan untuk pembuatan komponen peralatan modern, termasuk baja berketangguhan tinggi dan *superalloy* tersebut, membutuhkan unsur-unsur logam yang variatif sebagai unsur-unsur pepadu namun belum atau tidak dapat diproduksi di dalam negeri.



Gambar 23. Konsep dasar pemanfaatan sumber daya mineral dan energi nasional (Basuki, Seminar Nasional di UPN 2011).

Oleh sebab itu, menyadari tidak semuanya unsur-unsur logam yang diperlukan dalam rekayasa paduan logam maju dapat dihasilkan atau diproduksi di dalam negeri, maka pada Tahap-2 dalam Rencana Induk Pembangunan Industri Nasional telah mencanangkan target keunggulan kompetitif. Dari kebijakan ini diharapkan pembangunan industri nasional tidak hanya bertumpu pada keunggulan komparatif yang semata mengandalkan hasil pengolahan bahan tambang dalam negeri namun harus pula siap untuk berkompetisi dengan produk impor yang bahan bakunya tidak tersedia di dalam negeri.

Dalam Tahap-3 rencana pembangunan industri nasional menargetkan Indonesia sebagai negara industri yang tangguh. Untuk mewujudkan target ini maka penguatan industri, terutama industri yang masuk dalam kategori strategis, harus menjadi perhatian utama. Untuk menghasilkan produk di industri strategis ini, baik berupa peralatan, mesin, atau komponen yang bernilai tambah tinggi, selalu diperlukan material teknik yang sebagian besar terbuat dari paduan logam dengan komposisi kimia yang semakin kompleks. Produk industri hilir berupa peralatan, mesin, atau komponen yang dihasilkan di industri strategis umumnya masuk dalam kategori teknologi tinggi sehingga kebutuhan akan material maju seringkali menjadi keharusan karena tuntutan persyaratan teknik yang semakin tinggi dan ketat.

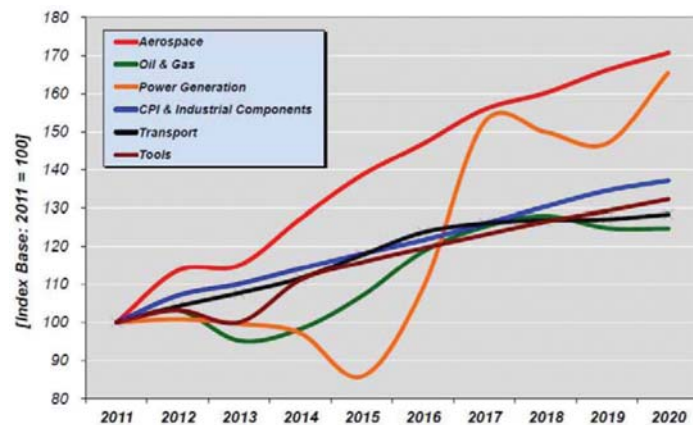
5.2. Perlunya Kemandirian Dalam Pemenuhan Bahan Baku Bagi Industri Hilir

Kemandirian produksi peralatan modern nasional berbasis teknologi tinggi menjadi keharusan pada tahun 2035, bila target Indonesia sebagai negara industri tangguh dapat diwujudkan. Saat ini produksi peralatan modern dan penting telah berkembang di Indonesia, diantaranya yaitu alutsista yang diproduksi di PT. Pindad (Persero), pesawat terbang dan helikopter di PT. Dirgantara Indonesia, berbagai jenis kapal di PT. PAL, kereta api di PT. KAI, serta mesin pembangkit energi di beberapa industri nasional seperti PT. Barata, selain industri manufaktur swasta nasional. Untuk memproduksi peralatan ini diperlukan berbagai jenis material maju diantaranya adalah baja khusus berketangguhan tinggi dan *superalloy* sebagai bahan bakunya. Namun demikian, saat ini hampir seluruh material maju seperti ini diimpor dari luar negeri karena belum terbangunnya industri yang dapat memproduksi material berperforma tinggi seperti ini di tanah air. Oleh sebab itu, guna mewujudkan Indonesia sebagai negara industri tangguh sebagaimana telah dicanangkan dalam Tahap-3 RIPIN, maka industri produsen paduan logam yang mampu menghasilkan baja khusus berketangguhan tinggi dan paduan logam kualitas tinggi lainnya, seperti *superalloy*, harus segera dipersiapkan.

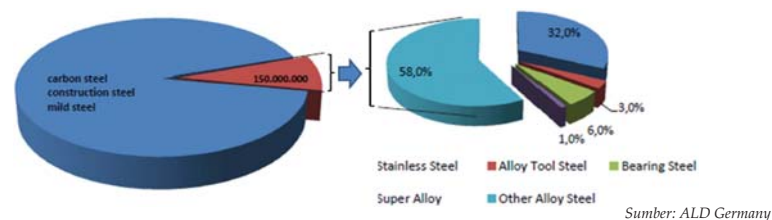
5.3. Prospek Ekonomi Produksi Paduan Berperforma Tinggi

Selain posisinya yang penting dalam mendukung industri nasional, secara global paduan logam berperforma tinggi untuk pemakaian di

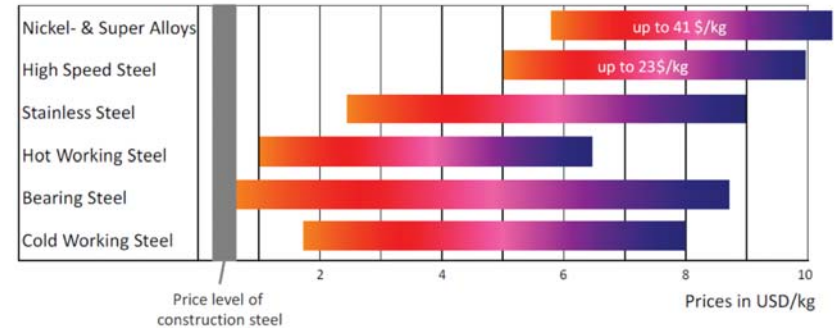
berbagai sektor industri meningkat secara signifikan, seperti ditunjukkan pada Gambar 24. Selain itu, meskipun dalam porsi yang sedikit, kira-kira 5% dari total produksi baja, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 25, namun harga dari paduan-paduan berperforma tinggi jauh lebih besar dibandingkan baja struktur (*construction steel*), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 26.



Gambar 24. Pertumbuhan konsumsi baja berketangguhan tinggi dunia (Steel and Metals Market Research GmbH, ALD Technology).

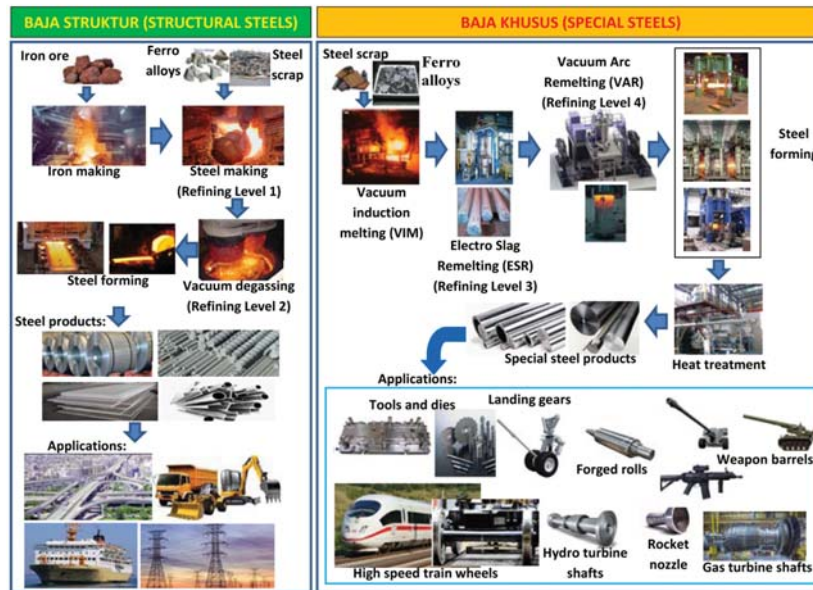


Gambar 25. Statistik produksi baja struktur dan paduan logam khusus.
(Sumber: ALD Germany, sudah mendapatkan permissi).



Gambar 26. Nilai tambah paduan logam kualitas tinggi. (Sumber: ALD Technology).

Rata-rata kebutuhan paduan logam berperforma tinggi yaitu *special steel* dan *super alloy* secara nasional kurang lebih 5% dari kebutuhan baja secara keseluruhan (Informasi personal dari ALD Jerman). Bila kebutuhan baja nasional saat ini kira-kira adalah 15 juta ton pertahun, maka keperluan paduan logam berperforma tinggi kira-kira adalah 750.000 ton pertahun. Meskipun jumlahnya relatif sedikit dibandingkan baja struktur, harga paduan-paduan logam berperforma tinggi ini 20 hingga lebih dari 100 kali dari harga baja struktur. Oleh sebab itu, nilai tambah yang dapat diperoleh bila paduan logam berperforma tinggi ini dapat diproduksi di dalam negeri diperkirakan melebihi yang diperoleh dari baja struktur. Bila *special steels* dapat diproduksi di dalam negeri maka secara lengkap pemenuhan kebutuhan bahan baku untuk semua sektor di industri hilir dapat dipenuhi sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 27.



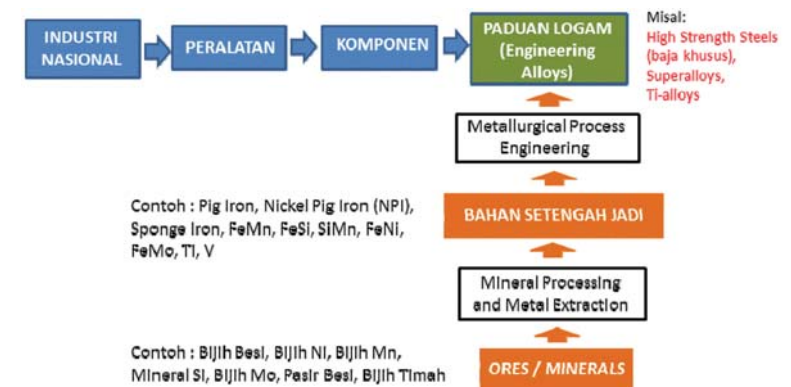
Gambar 27. Skematika proses pembuatan baja struktur dan baja khusus serta pemakaiannya. Baja struktur telah diproduksi di Indonesia, sementara baja khusus masih diimpor.

5.4. Implementasi Yang Diusulkan

5.4.1. Konsep Integrasi Hulu-Hilir

Pohon industri komoditas logam yang diproduksi di dalam negeri, seperti Fe-Ni, Al, Cu, Ni dan baja telah dibuat oleh Kementerian Perindustrian, yang menunjukkan alur pemakaiannya hingga industri hilir. Namun demikian, konsep integrasi holistik hulu-hilir yang diusulkan oleh penulis dirasa lebih menjawab persiapan pemenuhan kebutuhan bahan baku berupa paduan logam yang harus disediakan

untuk pembuatan komponen bagi peralatan yang diproduksi di semua industri nasional, sebagaimana alurnya ditunjukkan secara diagramatik pada Gambar 28.



Gambar 28. Integrasi holistik hulu-hilir logam.

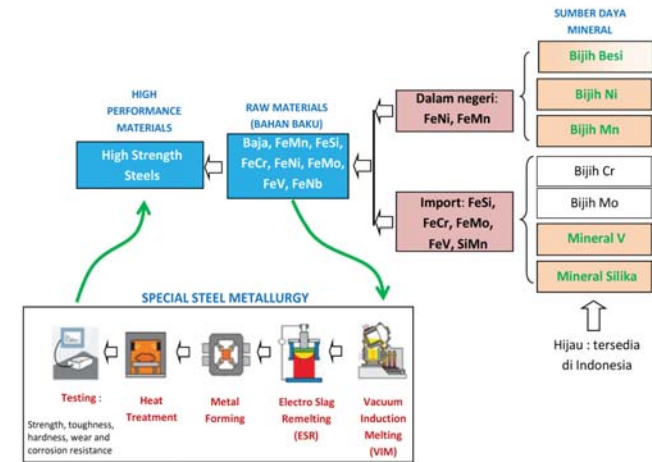
Dengan pendekatan ini dapat diprediksi bahan baku logam setengah jadi mana saja yang dapat dimanfaatkan dari produksi dalam negeri dan bahan baku setengah jadi apa saja yang masih harus diimpor karena sumber daya mineral yang tidak tersedia, atau karena proses ekstraksinya yang belum dapat dilakukan secara ekonomis di dalam negeri. Dengan pendekatan ini semestinya dapat dilakukan untuk menentukan kebijakan hilirisasi yang lebih integratif untuk menjawab permasalahan nasional dalam hal kemandirian pemenuhan bahan baku terutama untuk paduan-paduan logam berperforma tinggi.

5.4.2. Perlunya Dibangun Sebuah Teaching Industry

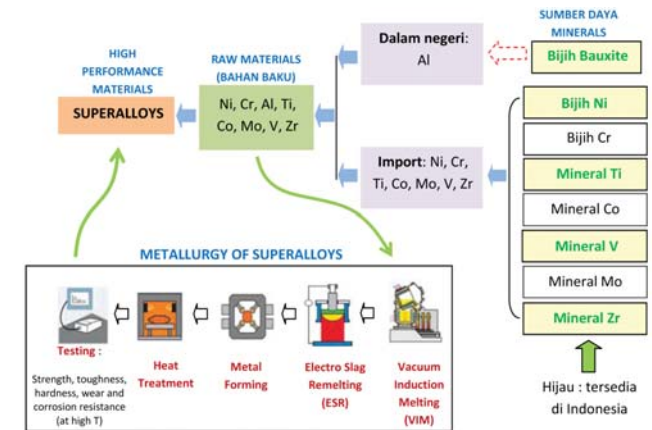
Memperhatikan kondisi sebagaimana dibahas di muka maka semestinya pembangunan fasilitas produksi paduan logam kualitas tinggi dalam rangka mendukung produksi peralatan modern di industri nasional menjadi keharusan. Namun demikian, produksi paduan logam berperforma tinggi di level industri komersial memerlukan persiapan secara bertahap dari mulai level laboratorium.

Model yang diusulkan adalah perlunya dibangun sebuah Teaching Industry atau Teaching Factory yang selain berfungsi sebagai sarana uji coba produksi, fasilitas seperti ini juga dapat dimanfaatkan untuk pengembangan lebih lanjut menyiapkan produksi paduan-paduan logam maju yang berkecenderungan semakin beragam dan semakin kompleks. Dengan demikian Teaching Industry ini dapat berfungsi sebagai tempat melakukan inovasi yang melibatkan praktisi di industri serta peneliti dari institusi pendidikan dan penelitian.

Gambar 29 dan 30 masing-masing menunjukkan rantai proses produksi baja khusus (*special steels*) atau baja berketangguhan tinggi dan paduan logam super (*superalloy*) yang akan berlangsung dalam sebuah Teaching Industry yang diusulkan. Dalam rantai produksi ini juga ditunjukkan pasokan bahan baku yang diperlukan, baik bahan baku yang telah tersedia di dalam negeri maupun bahan baku yang harus didatangkan dari luar negeri karena tidak tersedianya sumber mineral di dalam negeri atau belum dapat diekstraksinya logam tersebut secara ekonomis.



Gambar 29. Skenario proses produksi untuk baja khusus (*special steels*).



Gambar 30. Skenario proses produksi untuk *superalloy*.

Saat ini baja-baja struktur telah diproduksi di dalam negeri oleh beberapa industri baja seperti PT. Krakatau Steel dan PT. Krakatau Posco

dan industri baja berkapasitas kecil lain. Teknologi yang menjadi kunci keberhasilan dari produksi paduan-paduan logam berperforma tinggi adalah teknologi yang berfungsi sebagai *tertiary metallurgy* yaitu teknologi untuk proses *remelting*, seperti Electro Slag Remelting (ESR) dan Vacuum Arc Remelting (VAR) yang umumnya diawali dengan proses pemaduan menggunakan Vacuum Induction Melting (VIM).

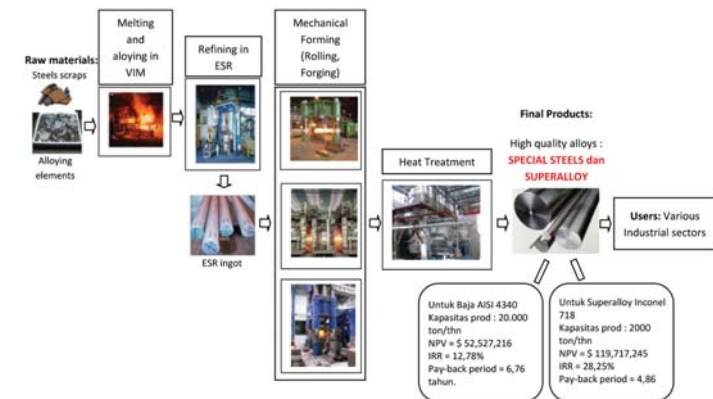
5.5. Jenis Produk Inovasi Yang Dapat Dihasilkan

Konsep Teaching Industry yang diusulkan bersifat generik dimana fasilitas ini dapat digunakan untuk inisiasi produksi berbagai jenis paduan logam berperforma tinggi berbasis Fe, Ni, Co dan Ti. Oleh sebab itu, beberapa jenis paduan logam berperforma tinggi yang sangat diperlukan untuk kebutuhan bahan baku di industri strategis nasional yang dapat dipersiapkan produksinya melalui Teaching Industry ini diantaranya yaitu:

1. Baja berketangguhan tinggi (*special steels*) untuk industri pertahanan dan peralatan berat, industri penerbangan, industri perkapalan, industri pembangkit listrik dan daya, industri otomotif termasuk untuk *electric vehicles*, mold dan dies peralatan mesin pemroses serta perkakas untuk industri manufaktur.
2. *Superalloy* untuk industri pertahanan dan industri pembangkit listrik dan daya serta industri petrokimia.

Pembuatan material seperti ini memerlukan proses pemurnian

hingga metalurgi terner (*ternary metallurgy*) menggunakan teknologi *remelting* seperti VIM-VAR atau VIM-ESR untuk menghasilkan beragam jenis *special steel* dan *superalloy*, seperti ditunjukkan pada Gambar 31.



	DEFENCE	Gun barrel, cannon barrel, artillery barrel, missile casings, pistols barrels, rocket nozzle.
	AEROSPACE	Compressor blades, discs, vanes, turbine blades, fasteners, landing gears
	OIL & GAS	Drilling comp., refinery reactors, valves, pressure vessels, heat exchangers.
	POWER GENERATION	Turbine shafts, turbine blades, bearings, combustor, compressors, exhaust fan.
	INDUSTRIAL COMPONENTS	Shafts, crankshaft, die casting comp., heat treatment comp., pumps, pipes.
	TRANSPORT	Bearings, axis, gears, wheels, injection, exhaust systems, turbochargers.
	TOOLS	Forged-rolls, mold-dies, high-speed tools, hot-rolling tools, casting dies.
	OTHERS	Cutting wheels, bolts, nuts, springs, gears, valves.

Gambar 31. Proses produksi di dalam Teaching Industry yang direncanakan dan kemungkinan pemakaian produknya.

5.6. Upaya dan Kerjasama Yang Telah Dirintis

Proposal Teaching Industry atau Teching Factory untuk inisiasi produksi baja khusus, *superalloy* dan paduan-paduan logam kualitas tinggi lainnya untuk substitusi impor telah disiapkan sejak tahun 2016 untuk diajukan kepada Kemenristekdikti pada tahun 2017.

Jejak rekam yang telah dilakukan diantaranya yaitu:

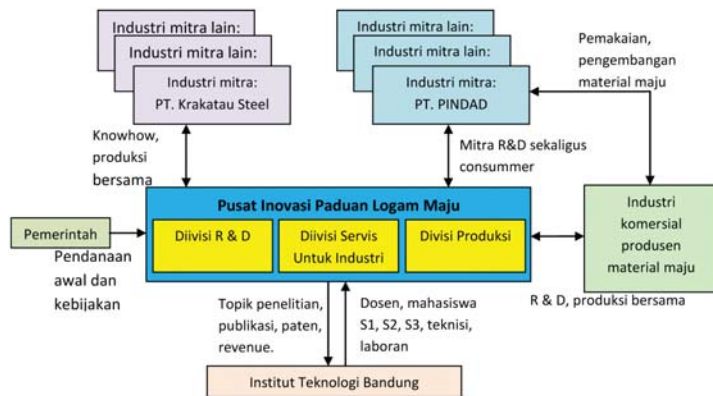
- Telah dibahas bersama antara Tim Pengusul, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan ITB dan Direktorat Jenderal Penguatan Inovasi, Kemenristekdikti, pada tanggal 13 April 2017 di kampus ITB Bandung, yang menghasilkan rekomendasi untuk pengusulan proposal Teaching Industry.
- Usulan telah didiskusikan bersama Deputy Menteri, Kementerian BUMN, Jakarta, 15 Mei 2017, dengan rekomendasi untuk menindaklanjuti kerjasama dengan perusahaan BUMN yang terkait.
- Telah didiskusikan di PT. Pindad (Persero), Bandung, 27 Juli, 2017.
- Telah didiskusikan di PT. Krakatau Steel, Cilegon, 2 Agustus 2017.
- Telah dibahas lebih mendalam di Direktorat Inovasi Industri, Kemenristekdikti, Jakarta, pada tanggal 23 November 2017.
- Diperoleh bentuk kerjasama yang ditandatangani oleh Rektor ITB, Dirut PT. Krakatau Steel dan PT. Pindad (Persero), pada Februari 2018.
- Teknologi yang akan diterapkan untuk produksi paduan logam performa tinggi di fasilitas Teaching Industry yang diusulkan telah

didiskusikan kelayakannya bersama antara ITB, PT. Krakatau Steel, PT. Pindad, serta secara terpisah dengan ALD Jerman dan Consarc USA, dalam kurun waktu antara Maret hingga November 2018.

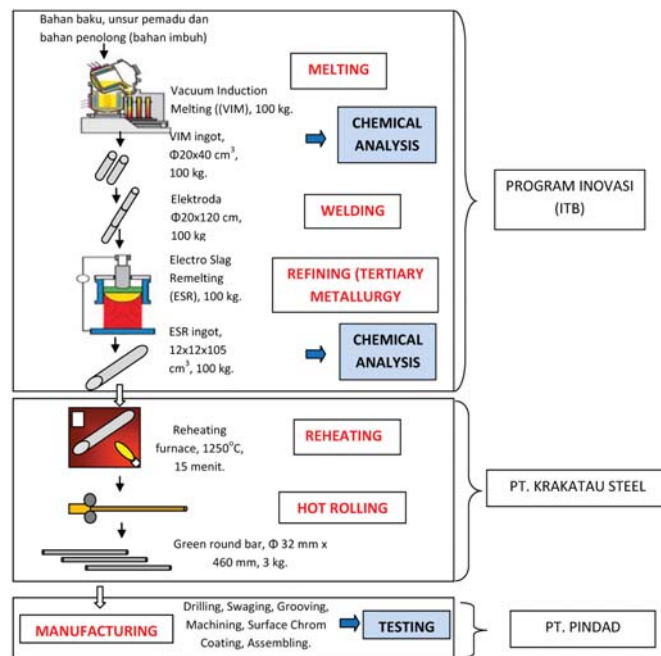
- Proposal yang lengkap telah diajukan kepada Direktorat Jenderal Penguatan Inovasi, Kemenristekdikti, dengan beberapa kali perbaikan mengenai aspek kelayakan dalam kurun waktu hingga September 2019.
- Karena adanya perubahan Kementerian, Pada Januari 2020 diusulkan kembali kepada Direktur Inovasi untuk dimasukkan dalam Flagship Program Riset Nasional (PRN) 2020-2024.

Model kerjasama yang direncanakan antara ITB, PT. Krakatau Steel dan PT. Pindad (Persero) ditunjukkan pada Gambar 32. Target pertama produk luaran utama dari kegiatan ini adalah material maju berupa paduan logam berperforma tinggi, salah satu yang utama adalah baja kualitas tinggi (*high grade steels*) atau baja berketangguhan tinggi yang dapat digunakan sebagai bahan baku untuk produksi alutsista di PT. PINDAD (Persero).

Baja berketangguhan tinggi yang dihasilkan dari skema Teaching Industry ini berupa ingot hasil proses *tertiary metallurgy* di fasilitas Teaching Industry ITB dan kemudian setelah dibentuk di PT. Krakatau Steel dan di laku panas (*heat treatment*) di Teaching Industry, selanjutnya akan diuji-coba di PT. PINDAD (Persero), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 33. Diharapkan pada tahun ke tiga telah diperoleh prosedur baku



Gambar 32. Model bisnis Program Inovasi yang diusulkan.



Gambar 33. Skenario alur proses yang direncanakan pada tahun 1-3.

untuk produksi paduan logam agar selanjutnya diperoleh portofolio untuk mempersiapkan produksi secara komersial atau dalam skala industri di perusahaan BUMN yang telah ada atau pembentukan perusahaan baru di bawah kementerian BUMN.

Pada tahun ke empat diperkirakan paduan-paduan logam kualitas tinggi lainnya, terutama beragam *superalloy*, dapat dicoba untuk diproduksi sehingga fasilitas Teaching Industry yang diusulkan dapat menghasilkan semakin banyak paduan-paduan logam berperforma tinggi lainnya, yaitu paduan logam berperforma tinggi yang akan digunakan untuk komponen berbagai produk teknologi di industri strategis nasional serta industri manufaktur lain yang kebutuhannya selama ini tergantung dari impor.

6. PENUTUP

Upaya untuk dapat memproduksi paduan-paduan logam berperforma tinggi guna dimanfaatkan sebagai bahan baku komponen peralatan modern dan strategis yang selama ini masih harus diimpor telah dilakukan dalam skala laboratorium dengan hasil yang baik. Implementasi untuk penerapannya di industri nasional telah diupayakan melalui konsep pembangunan fasilitas Teaching Industry atau Teaching Factory di ITB yang dimaksudkan sebagai sarana untuk inovasi serta uji coba produk paduan-paduan logam berperforma tinggi sebelum hasilnya kemudian diterapkan untuk diproduksi di industri komersial di dalam

negeri. Dari keberadaan Teaching Industry tersebut diharapkan dapat menginisiasi terbangunnya industri komersial yang mampu memproduksi paduan-paduan logam berperforma tinggi di Indonesia yang selama ini masih diimpor. Industri komersial yang diharapkan adalah yang berbadan hukum milik negara dalam upaya untuk mendukung pemenuhan bahan baku bagi produksi produk-produk bernilai tambah tinggi di industri-industri strategis nasional, sehingga target Indonesia sebagai negara industri tangguh, berdaya saing tinggi di tingkat global, berbasis inovasi dan teknologi pada tahun 2035 dapat terwujud.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terlebih dahulu puji dan syukur saya panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala atas limpahan rahmat dan karunia kepada saya, keluarga dan seluruh keluarga besar sivitas akademik Institut Teknologi Bandung.

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya saya sampaikan kepada yang saya hormati Pimpinan dan seluruh Anggota Forum Guru Besar ITB beserta jajarannya atas kesempatan yang diberikan kepada saya untuk menyampaikan orasi ilmiah.

Selanjutnya ucapan terima kasih yang tiada hingga saya sampaikan kepada, kedua orang tua saya yang saya cintai yang hingga kini tak henti senantiasa mendukung dan mendoakan saya, kemudian kepada para Guru saya yang telah mendidik dan mentransfer ilmu pengetahuan yang

sangat berguna untuk keberlangsungan kehidupan yang lebih baik, selanjutnya untuk Prof. Sudarto Notosiswoyo, Prof. Made Astawa Rai, Prof. Syoni Soepriyanto, Prof. Irwandy Arif, Prof. Rudy Sayoga Gautama dan rekan-rekan dosen, khususnya di lingkungan Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan yang di tengah kesibukan tridarmanya berkesempatan meluangkan waktu berbagi pengalaman dan pengetahuan; kepada Rektor dan Wakil Rektor ITB, Dekan dan Wakil Dekan Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan; teman-teman peneliti, khususnya di lingkungan LIPI dan BATAN, serta di Industri dan perguruan tinggi lain yang sangat peduli terhadap pengembangan ilmu pengetahuan khususnya di bidang metalurgi; kawan-kawan Tendik yang dengan dedikasi dan kegembiraannya bekerjasama melaksanakan tugas-tugasnya dengan sangat baik; istri saya tercinta Ir. Eka Nurseha, ketiga anak dan seluruh keluarga saya yang saya cintai yang telah memberikan dukungan, pengertian dan kesabaran; kawan-kawan alumni Tambang dan Metalurgi yang telah berbagi pengalaman praktisnya di industri, terutama yang telah dan sedang berkontribusi dalam pelaksanaan hilirisasi di industri pengolahan mineral dan industri logam di tanah air.

DAFTAR PUSTAKA

1. Darolia, R., Development of strong, oxidation and corrosion resistant nickel-based superalloys: critical review of challenges, progress and prospects, International Materials Reviews, Vol. 64, 2019, 355-38.

2. Eddy A. Basuki, Muhammad I. Yuliansyah, Farhan M. Rahman, Fadhli Muhammad and Djoko Prajitno, Interdiffusion Behavior of Aluminide Coated Two-Phase α_2 -Ti₃Al/ γ -TiAl Alloys at High Temperatures, Journal of Engineering and Technological Science, Vol. 48, No. 5, 2016, 534-549.
3. Eddy Agus Basuki, Djoko Hadi Prajitno and Fadhli Muhammad, Alloys Developed for High Temperature Applications, Proceedings of the 1st International Process Metallurgy Conference (IPMC 2016), AIP Conference Proceedings, 1805, 020003-15, 2016.
4. Eddy A. Basuki, Ikhsan Setiansyah, Akhmad A. Korda, Effect of Welding Microstructure on Fracture Toughness and Crack Propagation of API 5L-X65 Pipe, International Journal of Engineering & Science, Vol. 17, 2017.
5. E.A. Basuki, F. Pangestu, F. Adam, A.A. Korda, M. Fadhli, D. Prajitno, "Solid-Phase Oxidation Processes-High Temperature Oxidation Resistance of Ni-Based Alloys, Oxidation Communications, Vol. 41, No. 4, 465-476, 2018.
6. E.A. Basuki, F. Ramaputra, N.A., Rabbani, S. Ardiansyah, A.M., Khan, A. Korda, F. Muhammad, D.H. Prajitno, Effects of milling time on the microstructures of sintered Fe-16Cr-4Al-0.4Y₂O₃ ODS ferritic steel, Nanotechnology Perceptions, Vol. 14, 99-108, 2018.
7. Eddy Agus Basuki, Dedi Chandra Nababan, Fadhli Muhammad, Akhmad Ardian Korda, Djoko Hadi Prajitno, Isothermal Oxidation

Behaviour of 69.5Fe-14Ni-9Al-7.5Cr Alloy at High Temperatures, International Journal of Corrosion, Volume 2019, Article ID 8517648, <https://doi.org/10.1155/2019/8517648>.

8. Eddy Basuki, Djoko Prajitno and Pawawoi., Oxidation Behavior of Aluminide Coated Ti-Al-Cr-Nb-Zr-Y Alloys at High Temperatures, Solid State Phenomena, Vol 227 (2015) 345 – 348.
9. Eddy Basuki, Fadhli Mohamad, Ahmad Fauzi and Djoko Prajitno, Hot Corrosion of Aluminide Coated Ti-Al-Cr-Nb-Zr-Y Intermetallic Alloys, Advance Materials Research, Vol. 1112 (2015), pp 363-366.
10. Eddy A. Basuki, Dita Siti Hajar, Farhan Rahman, Djoko H. Prajitno, Cyclic Oxidation of Aluminide Coated of Two Phase Ti₃Al/TiAl Alloys at 1000°C, Procedia Chemistry, Vol. 16, Elsevier, 47-52, 2015.
11. Eddy Agus Basuki, Inovasi dan Rekayasa Material Superalloy Serta Upaya Pengembangannya di Indonesia, Seminar Nasional Material dan Metalurgi, LIPI, Serpong, 27 November 2013.
12. Jowitt, S.M., Mudd, G.M., Thompson, J.F.H., Future availability of non-renewable metal resources and the influence of environmental, social, and governance conflicts on metal production, Communication Earth & Environment, 1 September 2020.
13. Kholidah Akbar Fitriani and Eddy Agus Basuki, Microstructural Evolution and Oxidation Behavior of Fe-Ni-Al Alloys at High Temperatures, paper dipresentasikan pada Seminar Internasional CHEMMPRO 2014, Chemical Engineering, ITB, 30-31 Oktober 2014

14. Lesch, C., Kwiaton, N. dan Klose, F.B., Advanced High Strength Steels (AHSS) for Automotive Applications - Tailored Properties by Smart Microstructural Adjustments, Steel Research International, 25 August 2017.
15. Viswanathan R., Materials technology for coal-fired power plants, Advanced Materials and Processes, August, 2004, p. 73-7.
16. Walid, M., Basuki, E.A., Prawara, B., Quality characterization of HVOF thermal spray coating with NiCr matrix composite for protection of coal fired boiler tubes, The 1st Materials Research Society Indonesia Conference and Congress, IOP Publishing, Materials Science and Engineering, 432, 2018.
17. Watari, T., Nansai, K., Nakajima, K., Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: A critical review, Resources Conservation and Recycling 164(105107), January 2021.

CURRICULUM VITAE



1. Nama : **EDDY AGUS BASUKI**
2. TTL : Tawangmangu, 31 Agustus 1955
3. NIP : 195508311985031003
4. Kel. Keahlian : Teknik Metalurgi
5. Fakultas : Fakultas Teknik Pertambangan
dan Perminyakan
6. Bid. Keahlian : Metalurgi Fisik
7. Alamat : Jl. Senam V, No. 21, Arcamanik, Bandung
8. Data Keluarga :
 - Orang tua : Sugeng Basuki, B.A. dan Surani
 - Istri : Ir. Eka Nurseha
 - Anak : 1. Annisa Puji Miranda, S.S., M. Phil.
2. Faisal Libran Basuki, B.Eng.
3. Katya Putri Utami

9. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Sarjana Teknik, Option Metalurgi, Jurusan Teknik Pertambangan, Institut Teknologi Bandung, 1984.
Skripsi: Pengaruh Aluminium, Besi dan Nikel Terhadap Sifat Mekanis Paduan Aluminium Bronze.
- Master of Science (M.Sc), School of Materials Science and Engineering, University of New South Wales, 1990.

Thesis: Effect of Elevated Temperature Exposure on Nickel Based Superalloys.

- Doctor of Philosophy (Ph.D), School of Materials Science and Engineering, Univeresity of New South Wales, 1998.

Thesis: The High Temperature Structural Stability of Aluminide Coated Nickel-Based Alloys.

10. RIWAYAT JABATAN STRUKTURAL

- a) Sekretaris Jurusan Teknik Pertambangan : 2002-2004
- b) Ketua Jurusan Teknik Pertambangan: 2004-2005.
- c) Ketua Program Studi Teknik Metalurgi: 2006-2008
- d) Wakil Dekan Bidang Sumber Daya, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan: 2012-2014.

11. RIWAYAT PENGAJARAN

a. Tingkat Sarjana:

- i. Mengajar : Mata kuliah yang pernah diajarkan: Metalurgi Fisika I, Transformasi Fasa dan Perlakuan Panas, Pengecoran Logam, Metalurgi Pengelasan, Rancangan Paduan Logam, Difusi Dalam Padatan, Metalurgi Umum, Degradasi Logam Temperatur Tinggi, Pengantar Teknologi Mineral.
- ii. Membimbing Tugas Akhir: Telah membimbing lebih dari 100 mahasiswa.

b. Tingkat Magister:

- i. Mengajar : Mata kuliah yang pernah diajarkan: Metalurgi Fisika Lanjut, Termodinamika Lanjut, Topik Khusus RMM, Coating untuk Proteksi Suhu Tinggi, Difusi dan Stabilitas Struktur Mikro, Enjiniring Proses Metalurgi, Korosi Temperatur Tinggi, Paduan Logam Performa Tinggi.
- ii. Membimbing : Telah membimbing lebih dari 25 mahasiswa.

c. Tingkat Doktor:

Menjadi Ko-Promotor Dr. Djoko Hadi Prajitno dan Dr. Enung Nurlia, serta penguji beberapa kandidat doktor di ITB dan di luar ITB. Sedang membimbing sebagai promotor dua orang mahasiswa Program Doktor di Program Studi Magister dan Doktor Rekayasa Pertambangan.

12. RIWAYAT PENELITIAN

1. Preliminary study of pack aluminide coating on nickel based alloys, OPF-ITB Research Grant, 1993. Pembentukan coating pada paduan nikel menggunakan metoda pack-cementation.
2. Diffusion coating on iron and nickel based alloys by pack aluminizing and siliconizing for high temperature protection, RUT-III Research Grant, Directorate General of Higher Education, Indonesia, 1998-2000.
3. Study on priority of the prototypical products to be considered for

trial prototypical service of the project on supporting industries development for casting technology, JICA-Japan-Department of Industrial and Trade–ITB, 1999.

4. Y-Zr-Cr modified aluminide coatings on nickel based alloys, The Young Academics Program, Batch IV, URGE, 1999-2001, 2000.
5. Interdiffusion and Oxidation Behaviour of Aluminide Coatings on binary γ -TiAl at High Temperatures, The Asahi Glass Foundation Research Grant, 2002-2004.
6. High Temperature Oxidation Behaviour of Fe-Ni-Al-Cr Based Alloys Developed From Ferro-Nickel, SDPA-ITB Research Grant, 2004-2005.
7. Utilization of low grade iron ores for national steel industries, ITB research grant, 2005-2006.
8. Added value on Indonesian Minerals and Low Rank Coal, PHKI, Directorate General of Higher Education, 2008–2010.
9. High Temperature Coatings on multi element TiAl based alloys, 2011 – 2013. Penelitian mengenai penerapan aluminide coating pada paduan multi elemen berbasis TiAl untuk pengganti superalloy. Penelitian bersama dengan BATAN.
10. High Temperature Oxidation and Hot Corrosion of Aluminide Coated TiAl alloys, 2013-2015. Penelitian untuk menguji ketahanan oksidasi dan korosi paduan logam multi elemen berbasis TiAl pada temperatur tinggi. Penelitian bersama dengan

BATAN.

11. Development of intermetallic compounds based on nickel-aluminium and iron-nickel-aluminium, 2013-2016. Penelitian untuk mempelajari sifat temperatur tinggi dari paduan senyawa intermetalik berbasis Ni-Al dan Fe-Ni-Al untuk pengganti atau alternatif superalloy.
12. Oxide dispersion Strengthening (ODS) of Ferritic Steel, 2016. Penelitian untuk pengembangan paduan logam berbasis Fe-Cr yang diperkuat partikel nano Y₂O₃ dan ZrO₂ melalui mechanical alloying untuk pemakaian fasilitas pembangkit energi. Penelitian bersama dengan BATAN.
13. Development of Ferritic Superalloys, 2017. Paduan berbasis Fe-Ni-Cr dengan matriks ferit dan penguat fasa B₂-FeNi(Al) untuk pemakaian pada temperatur tinggi. Penelitian bersama dengan BATAN.
14. Coatings for Coal Based Boilers, 2018-2020. Penelitian bersama TELIMEK, LIPI.

13. RIWAYAT PENGABDIAN PADA MASYARAKAT

Telah terlibat dalam aktivitas, baik sebagai ketua (koordinator) maupun anggota tim, dalam lebih dari 50 kegiatan solusi permasalahan industri di berbagai perusahaan swasta maupun BUMN, memberikan pelatihan dan kursus kepada masyarakat dan

industri, serta turut serta dalam kegiatan membina aktivitas produksi di UMK masyarakat.

14. RIWAYAT ORGANISASI PROFESI

- a) Anggota ASM International (American Society for Materials) : 2005–2012.
- b) Anggota Perhapi (Perhimpunan Ahli Pertambangan Indonesia) : 2002 - sekarang.
- c) Pengurus INDOCOR (Indonesian Corrosion): 2004 - 2009.
- d) Anggota Tin Innovation Network (TIN) : 2006 - 2008.
- e) Ketua Badan Kejuruan Teknik Metalurgi, Persatuan Insinyur Indonesia, periode 2016 - sekarang.

15. PUBLIKASI ILMIAH

15.1. Buku Referensi:

Eddy Agus Basuki, Ph.D., Paduan Logam Untuk Aplikasi Temperatur Tinggi dan Penghematan Energi, Cetakan 1, Penerbit ITB, ISBN: 978-602-7841-1, 2016, 480 halaman.

15.2. Makalah ilmiah (Sejak 2004 untuk pengajuan Guru Besar)

1. **Eddy A. Basuki**, Arief Sudarsono, Zaki Mubarak, Ismi Handayani, Steel Slag Granulation, Proceedings of International Conference on Minerals Resource Management and Environment, Kyushu University, 12-13 December 2005.

2. Okti, J.P. Manalu, Rizal Astrawinata, Nurulkamal Mohd. Sharif, and **Eddy A. Basuki**, The Effect of Aluminium Content on Properties of TiAl Based Binary Alloys, Proceeding of 6th Field-Wise Seminar for Materials Engineering on Biomaterials, Nanomaterials, Advanced Materials & Composites, 16-17th May 2005, AUN/SEED-Net, Jica, Penang, Malaysia, 2005.
3. **Basuki, E.A.**, Ekawan, R, and Arief, I., Future Trend of Mining Education, Indonesian Mining Association Conference, Jakarta, 21-24 September 2005.
4. **Eddy A. Basuki**, Arifin, Pawawoi and Alexaner Senaputra, Interdiffusion and Oxidation Behaviour of Two Phase α_2 -Ti₃Al/ γ -TiAl Titanium Aluminide Alloys, Seminar Proceeding, 7th- Field-Wise Seminar on Materials Processing and Performance, Savoy Homann, Bandung, Indonesia, January, 25 - 26, 2006.
5. **Eddy Agus Basuki** dan Safrizal, Sumber Bahan Paduan Nikel di Indonesia, Seminar Material Metalurgi 2006, Pusat Penelitian Metalurgi, LIPI, Serpong, 20 Desember 2006.
6. Okti, J.P. Manalu, Rizal Astrawinata, Nurulkamal Mohd. Sharif, and **Eddy A. Basuki**, The Effect of Heat Treatment on Microstructures, Properties and Oxide-scale Thickness of TiAl-Based Intermetallic Alloys, Malaysian Journal of Microscopy, Volume 2, 2006.
7. **Eddy Agus Basuki**, Syoni Soeprijanto, Sunara Purwadaria, Rudianto Ekawan, Peningkatan Nilai Tambah Bahan Tambang,

- Peluang dan Tantangan, Prosiding Temu Profesi Tahunan ke XVI Perhapi, Makasar, 4-7 September, 2007.
8. Widi S. Raharjo and **Eddy A. Basuki**, Microstructural Characterization of FeNi Alloying in Aluminium Based Alloys, Proceedings of Conference on Indonesian Process Metallurgy, Bandung, September 4-5, 2008.
 9. **Eddy A. Basuki** dan Waspodo Martoyo, Potensi Pengembangan Paduan Berbasis Nikel di Indonesia, Prosiding Seminar Metalurgi Expo, Bandung, 27-28 Juni 2008.
 10. **Eddy Agus Basuki**, Arief Sudarsono, and Hamzah Kurniadani, Beneficiation of Low Grade Iron Sand, Proceedings of Seminar, AUN/SEED Net, Jogjakarta, May, 5-6, 2009.
 11. **Eddy Agus Basuki**, Korosi Temperatur Tinggi, Proceeding Seminar-Workshop Korosi dan Konferensi Nasional Coating Inspector Indonesia (CCIPP)-II, Bandung, 25 April 2009.
 12. **Eddy Agus Basuki**, Pengembangan Paduan Untuk Aplikasi Power Plant, Prosiding Seminar Nasional Besi dan Baja, Bandung, 26-27 Oktober 2009.
 13. Djoko HP, Syoni Soepriyanto, **Eddy Agus Basuki**: "Sintesis dan Karakterisasi Paduan Terner Zr-Nb-Y". Prosiding Seminar Material Metalurgi 2010, 13 Oktober 2010, Graha Widya Bakti, DRN, Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan, Banten. ISSN:2085-0492.

14. Muhammad Iqbal Gumay dan **Eddy Agus Basuki**, Pembentukan dan Laju Pertumbuhan Oksida Superalloy Ni-Cr-Al-Mo pada 1000oC, Proceeding Indonesian Process Metallurgy (IPM 2011), Bandung, 21-22 Juli 2011.
15. Zulfiadi Zulhan dan **Eddy Agus Basuki**, Pembuatan Baja Tahan Karat dengan Rute Dupleks AOD: Aspek Teknologi dan Ekonomi, Proceeding Seminar Nasional Besi dan Baja II, Bandung, 20-21 Oktober 2011.
16. Akhmad A. Korda, **Eddy A. Basuki**, Amung Somantri dan Zaenal A. Muslim, Penerapan Thermomechanical Control Process di PT. Krakatau Steel, Proceeding Seminar Nasional Besi dan Baja II, Bandung, 20-21 Oktober 2011.
17. Abdurahim, Waspodo Martoyo, dan **Eddy Agus Basuki**, Tinjauan Teknis-Metalurgis Keping Roda Kereta Api (Solid Wheel) dan Kemungkinan Pembuatannya di Indonesia, Proceeding Seminar Nasional Besi dan Baja II, Bandung, 20-21 Oktober 2011.
18. **Eddy Agus Basuki**, "Tantangan Industri Metalurgi Era Global", Seminar Nasional Kebumihan 2011, tanggal 8-9 Desember 2011. FTMUPN "Veteran" Yogyakarta
19. Pawawoi, **E.A. Basuki**, "Pengaruh Unsur Khrom (Cr) Terhadap Perilaku Pembentukan Oksida Paduan TiAl-Cr Pada 900°C", 3rd Indonesian Process Metallurgy Conference (IPM III), ITB, 4-5 December 2012.

20. F. Muhammad, **E.A. Basuki**, "Pengaruh Temperatur Pack Aluminizing Paduan Intermetalik Dua Fasa α_2 -Ti₃Al/ γ -TiAl terhadap hot corrosion dalam lelehan garam Na₂SO₄ + NaCl pada temperatur 850°C", 3rd Indonesian Process Metallurgy Conference (IPM III), ITB, 4-5 December 2012.
21. D.H. Prajitno, S. Soepriyanto, **E.A. Basuki**, S. Wiryolukito, "Pengembangan Paduan Ternary Zr-2.5%Nb-Y Untuk Kelongsong Elemen Bahan Bakar Nuklir", 3rd Indonesian Process Metallurgy Conference (IPM III), ITB, 4-5 December 2012.
22. D.H. Prajitno, S. Soepriyanto, **E.A. Basuki**, S. Wiryolukito, Isothermal Oxidation Behaviour of Ternary Zr-Nb-Y Alloys at High Temperature, International Conference on Mathematics and Natural Science III, Bandung, November 2012.
23. Enung Nurlia, Sunara Purwadaria, **Eddy Agus Basuki**, Evaluasi Pengaruh Perlakuan Panas RRA Terhadap Kekuatan Mekanik dan Peningkatan Ketahanan SCC Paduan Aluminium 7075, Proceeding Seminar Material Metalurgi 2012, 30 Desember 2012.
24. **Eddy Agus Basuki**, Abdurrahman, Djoko H.P., Pawawoi, Fadhli Mohammad: "Hot Corrosion and Interdiffusion Behaviour Of Aluminide Coated Ti-40Al-2Mo Intermetallic Alloys At 800°C". Revue de Metallurgie International Journal of Metallurgy Steel and Other Metals-From Making to Using. Cambridge University Press. 2013.

25. **Eddy Agus Basuki**, Inovasi dan Rekayasa Material Superalloy Serta Upaya Pengembangannya di Indonesia, Seminar Nasional Material dan Metalurgi, LIPI, Serpong, 27 November 2013.
26. Fadhi Muhammad, **Eddy Agus Basuki**: "Effect of Pack Aluminizing Temperatures α_2 - Ti₃ Al/ γ -TiAl Intermetallics towards Hot Corrosion Behavior at 850°C". Inovasi Online. Vol. 21. No. 1 Juni 2013. Penerbit: PPI Jepang. ISSN: 2085-871X.
27. Enung Nurlia, Sunara Purwadaria, **Eddy Agus Basuki**: "Retrograsi dan Reaging Paduan Aluminium 7075 dan Evaluasi Prosedur yang Digunakan". Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir PTNBR - BATAN. Bandung, 04 Juli 2013. ISSN 1858-3601
28. **Eddy Basuki**, Sutarno, Samuel, Interdiffusion of Elements in Aluminium 2024 Clad During Reheat Treatment Process at 495°C, Advanced Materials Research, Vol. 896 (2014), 605-608.
29. Fauzi, A., Prajitno, D.H., and **Basuki, E. A.**, Investigation on Hot Corrosion Behavior of Aluminide Coated TiAl Alloys, Proceeding International Seminar of CHEMMPRO 2014, Chemical Engineering, ITB, 30-31, October, 2014.
30. Kholidah Akbar Fitriani and **Eddy Agus Basuki**, Microstructural Evolution and Oxidation Behavior of Fe-Ni-Al Alloys at High Temperatures, paper dipresentasikan pada Seminar Internasional CHEMMPRO 2014, Chemical Engineering, ITB, 30-31 Oktober 2014

31. Fadhli Muhammad and **Eddy Agus Basuki**, Two Phase Intermetallic Compound of α_2 -Ti₃Al / γ -TiAl as Candidate to Replace Nickel-Based Superalloys, paper dipresentasikan pada Seminar Nasional Indonesian Process Metallurgy IV, Institut Teknologi Bandung, 5-7 Nopember 2014
32. Mohammad Aly Fikri, **Eddy Agus Basuki**, Budi Prawara, Spalling Resistance of Thermal Barrier Coating Systems Using the Intermediate Layer Ni20Cr-7YSZ with Ni20Cr Feed Stock Powder Size Reduction in Stainless Steel 316L, paper dipresentasikan pada Seminar Nasional Indonesian Process Metallurgy IV, Institut Teknologi Bandung, 5-7 Nopember 2014.
33. Djoko Hadi Prajitno, Syoni Soepriyanto, **Eddy Agus Basuki**, Slameto Wiryolukito, Isothermal Oxidation Behavior of Ternary Zr-Nb-Y Alloys at High Temperature, 4th International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS 2012), AIP Conf. Proc. 1589, 182-186 (2014).
34. **Eddy Basuki**, Djoko Prajitno and Pawawoi., Oxidation Behavior of Aluminide Coated Ti-Al-Cr-Nb-Zr-Y Alloys at High Temperatures, Solid State Phenomena, Vol 227 (2015) 345–348.
35. **Eddy Basuki**, Fadhli Mohamad, Ahmad Fauzi and Djoko Prajitno, Hot Corrosion of Aluminide Coated Ti-Al-Cr-Nb-Zr-Y Intermetallic Alloys, Advance Materials Research, Vol. 1112 (2015), pp 363-366.

36. Fadhli Muhammad, Ichlas Juliansyah dan **Eddy Agus Basuki**: "The Interdiffusion Modeling of Aluminide Coated Ti-47Al-2Cr-2Nb-0.5Y Intermetallic Alloy". Indonesian journal of Physics. Vol. 26. No. 1. July 2015.
37. **Eddy A. Basuki**, Dita Siti Hajar, Farhan Rahman, Djoko H. Prajitno, Cyclic Oxidation of Aluminide Coated of Two Phase Ti3Al/TiAl Alloys at 1000°C, Procedia Chemistry, Vol. 16, Elsevier, 47-52, 2015.
38. Mohammad Jajar Pambudi, **Eddy Agus Basuki**, Djoko Hadi Prajitno, Hot Corrosion of Two Phases Ti₃Al/TiAl Alloys Intermetallic Alloys With Pack Aluminizing and With Enamel Coating at 850°C, International Seminar on Corrossion, 29 June–03 July 2015, Sapporo, Japan.
39. Djoko Hadi Prajitno, Syoni Soepriyanto, **Eddy Agus Basuki** and Slameto Wiryolukito, High Temperature Oxidation of Zr-2.5wt Nb Alloys Doped with Yttrium, Journal of Materials Science and Engineering, A5 (2015) 154-15.
40. Komang Anggayana, Agus H. Widayat, Arie N. H. Hede, Wahyudi Zahar, **Eddy A. Basuki**, Evaluasi Parameter Karakteristik Batubara Untuk Penentuan Kualitas Kokas Sebagai Bahan Baku Industri Besi Baja, Prosiding Seminar Nasional Besi Baja, Bandung, 2016.
41. Zulfiadi Zulhan, **Eddy Agus Basuki**, Adil Jamali, Nuryadi Saleh,

Anistasia Milandia, I.B. Sumbranang, Atneral Fuadi, Indah Suryani, Ferdiand Lo, Edward Armanda Wardaya, Abdullah Abiyyu, Sakabumi Wahyudi, Studi Reduksi Langsung Pasir Besi dengan Reduktor Batubara Pada Kondisi Isotermal dan Isotermal – Temperatur Gradien, Seminar Nasional Besi dan Baja IV, ITB, 27-28 April 2016.

42. **Eddy A. Basuki**, Muhammad I. Yuliansyah, Farhan M. Rahman, Fadhli Muhammad and Djoko Prajitno, Interdiffusion Behavior of Aluminide Coated Two-Phase $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}/\gamma\text{-TiAl}$ Alloys at High Temperatures, Journal of Engineering and Technological Science, Vol. 48, No. 5, 2016, 534-549.
43. **Eddy Agus Basuki**, Djoko Hadi Prajitno and Fadhli Muhammad, Alloys Developed for High Temperature Applications, Proceedings of the 1st International Process Metallurgy Conference (IPMC 2016), AIP Conference Proceedings, 1805, 020003-15, 2016.
44. **Eddy A. Basuki**, Ikhsan Setiansyah, Akhmad A. Korda, Effect of Welding Microstructure on Fracture Toughness and Crack Propagation of API 5L-X65 Pipe, International Journal of Engineering & Science, Vol. 17, 2017.
45. **E.A. Basuki**, F. Pangestu, F.Adam, A.A. Korda, M. Fadhli, D. Prajitno, "Solid-Phase Oxidation Processes-High Temperature Oxidation Resistance of Ni-Based Alloys, Oxidation Communications, Vol. 41, No. 4, 465-476, 2018.

46. **E.A. Basuki**, F. Ramaputra, N.A., Rabbani, S. Ardiansyah, A.M., Khan, A. Korda, F. Muhammad, D.H. Prajitno, Effects of milling time on the microstructures of sintered Fe-16Cr-4Al-0.4Y2O3 ODS ferritic steel, Nanotechnology Perceptions, Vol. 14, 99-108, 2018.
47. M. Walidi, **E.A. Basuki**, B. Prawara, Quality characterization of HVOF thermal spray coating with NiCr matrix composite for protection of coal fired boiler tubes, The 1st Materials Research Society Indonesia Conference and Congress, IOP Publishing, Materials Science and Engineering, 432, 2018.
48. **Eddy Agus Basuki**, Dedi Chandra Nababan, Fadhli Muhammad, Akhmad Ardian Korda, Djoko Hadi Prajitno, Isothermal Oxidation Behaviour of 69.5Fe-14Ni-9Al-7.5Cr Alloy at High Temperatures, International Journal of Corrosion, Volume 2019, Article ID 8517648, <https://doi.org/10.1155/2019/8517648>.
49. N.A. Rabani, **E.A. Basuki**, T. Sudiro, A. Afandi, Microstructural and Oxidation Resistance of Spark Plasma Sintered Yttria-Zirconia ODS Steels, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 541(1), 012028, 2019.
50. Akhmad A. Korda, S. Munawaroh, **Eddy A. Basuki**, The Antimicrobial Activity and Characterization of the Cast Titanium Copper Alloys with Variations of Copper Content, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 8, 2019.

