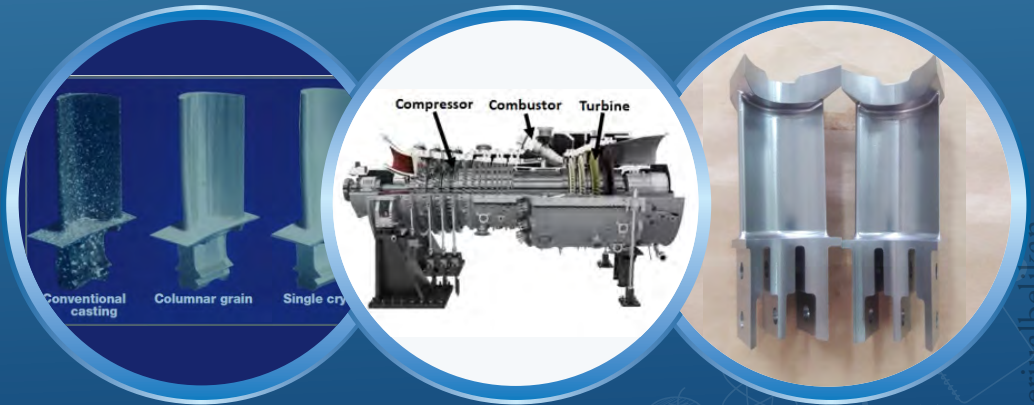


## **ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET BIDANG METALURGI DAN MATERIAL**

# **DESAIN PADUAN LOGAM UNTUK KOMPONEN TURBIN PEMBANGKIT LISTRIK**



**OLEH:  
EFENDI**

**LEMBAGA ILMU PENGETAHUAN INDONESIA  
JAKARTA, 27 JULI 2021**

DESAIN PADUAN LOGAM  
UNTUK KOMPONEN TURBIN  
PEMBANGKIT LISTRIK

Dilarang mereproduksi atau memperbanyak seluruh atau sebagian dari buku ini dalam bentuk atau cara apa pun tanpa izin tertulis dari penerbit.

© Hak cipta dilindungi oleh Undang-Undang No. 28 Tahun 2014

*All Rights Reserved*

Buku ini tidak diperjualbelikan.



**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET  
BIDANG METALURGI DAN MATERIAL**

**DESAIN PADUAN LOGAM  
UNTUK KOMPONEN TURBIN  
PEMBANGKIT LISTRIK**

**OLEH:  
EFENDI**

**LEMBAGA ILMU PENGETAHUAN INDONESIA  
JAKARTA, 27 JULI 2021**

© 2021 Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)  
Pusat Penelitian Metalurgi dan Material

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Desain Paduan Logam untuk Komponen Turbin Pembangkit Listrik/Efendi. Jakarta: LIPI Press, 2021.

ix + 68 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-602-496-237-1 (cetak)  
978-602-496-238-8 (e-book)

1. Paduan-super berbasis nikel
2. Baja tahan karat
3. Sudu turbin

621.313

*Copy editor* : Risma Wahyu Hartiningsih  
*Proofreader* : Sonny Heru Kusuma  
*Penata Isi* : Dhevi E.I.R. Mahelingga  
*Desainer Sampul* : Meita Safitri  
*Gambar Sampul* : (Dari kiri ke kanan)  
- Gambar tiga buah sudu turbin gas: polikristal, kolumnar, dan kristal tunggal diambil dari referensi no. 33  
- Gambar mesin turbin gas diambil dari referensi no. 1  
- Gambar dua buah sudu turbin uap diambil dari koleksi penulis

Cetakan : Juli 2021



Diterbitkan oleh:  
LIPI Press, anggota Ikapi  
Gedung PDDI LIPI, Lantai 6  
Jln. Jend. Gatot Subroto 10, Jakarta 12710  
Telp.: (021) 573 3465  
*e-mail*: [press@mail.lipi.go.id](mailto:press@mail.lipi.go.id)  
*website*: [lipipress.lipi.go.id](http://lipipress.lipi.go.id)

 LIPI Press  
 @lipi\_press  
 @lipi.press

## BIODATA RINGKAS



**Efendi**, lahir di Cirebon pada 5 Januari 1970, adalah anak ketujuh dari Bapak Mabruri (*rohimahullah*) dan Ibu Rutami (*rohimahallah*). Menikah dengan Heppi Dewayani, S.Si. dan dikaruniai delapan anak, yaitu Imam Ali Muthahhari, S.Tr.T., Yumna Salma Azzahra, Mujadid Izhharulhaq, Aliyudin Muhammad, Qonita Fillah Muwaffaqoh, Muhammad Izhharuddin Al-Falah, Abbad Prawira Madani, dan Ahmad Ash-Shiddiq Fathuddin.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 11/M Tahun 2019 tanggal 13 Februari 2019, yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama terhitung mulai 1 Mei 2019.

Berdasarkan Surat Keputusan Kepala Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia Nomor 165/A/2021 tanggal 21 Juni 2021 tentang Pembentukan Majelis Pengukuhan Profesor Riset, yang bersangkutan dapat melakukan pidato Pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Negeri Suradinaya Cirebon, tahun 1982; Sekolah Menengah Pertama Negeri 5 Cirebon, Tahun 1985; dan Sekolah Menengah Atas Negeri 2 Cirebon, tahun 1988. Memperoleh gelar Sarjana Teknik dari Institut Teknologi Bandung tahun 1995, gelar Magister Teknik dari Institut Teknologi Bandung tahun 2002, dan gelar Doktor bidang Ilmu dan Teknik Material dari Nagoya University, Jepang, tahun 2008.

Mengikuti pelatihan yang terkait bidang kompetensinya, di antaranya Pelatihan SEM dan XRD di Bandung pada tahun

1998, *Heat Treatment Training Course* di Jepang pada tahun 1999, dan Pelatihan Reviewer Penelitian Kemenristekdikti di Tangerang Selatan pada tahun 2019.

Pernah menduduki jabatan struktural sebagai Kepala Bidang Sarana Penelitian pada tahun 2009–2010, dan Kepala Bidang Konservasi Bahan pada tahun 2010–2014, keduanya di Pusat Penelitian Metalurgi LIPI.

Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Ajun Peneliti Muda golongan III.c tahun 2002 yang berubah menjadi Peneliti Muda golongan III.c tahun 2009, Peneliti Madya golongan IV.b tahun 2013, dan memperoleh jabatan Peneliti Ahli Utama golongan IV.d bidang Metalurgi dan Material tahun 2019.

Menghasilkan 112 karya tulis ilmiah (KTI), baik yang ditulis sendiri maupun bersama penulis lain, dalam bentuk jurnal dan prosiding. Sebanyak 38 KTI ditulis dalam bahasa Inggris dan 74 KTI dalam bahasa Indonesia.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing jabatan fungsional peneliti pada Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI, pembimbing skripsi (S1) pada Universitas Sultan Ageung Tirtayasa, Universitas Diponegoro, Sekolah Tinggi Teknologi PLN, Institut Teknologi dan Sains Bandung, pembimbing tesis (S2) pada Universitas Indonesia, Institut Sains dan Teknologi Nasional, dan pembimbing disertasi (S3) pada Universitas Indonesia.

Aktif dalam organisasi ilmiah, yaitu sebagai anggota Japan Institute of Metals (2005–2008), anggota Himpunan Peneliti Indonesia (2019–sekarang) dan anggota Asosiasi Profesi Metalurgi Indonesia (2021–sekarang).

Menerima tanda penghargaan Satyalancana Karya Satya X tahun (2008) dan XX tahun (2017) dari Presiden Republik Indonesia.

## DAFTAR ISI

BIODATA RINGKAS.....	v
DAFTAR ISI .....	vii
PRAKATA PENGUKUHAN .....	ix
I. PENDAHULUAN.....	1
II. PERKEMBANGAN PADUAN LOGAM UNTUK SUDU TURBIN PEMBANGKIT LISTRIK.....	5
2.1 Paduan Logam untuk Sudu Turbin Gas.....	5
2.2 Paduan logam untuk Sudu Turbin Uap.....	9
III. DESAIN PADUAN LOGAM UNTUK SUDU TURBIN PEMBANGKIT LISTRIK.....	11
3.1 Desain Paduan-Super Berbasis Nikel untuk Sudu Turbin Gas ...	11
3.2 Desain Baja Tahan Karat Martensitik untuk Sudu Turbin Uap..	15
3.3 Desain Baja Tahan Karat Austenitik untuk Sudu Turbin Uap....	19
IV. HILIRISASI HASIL DESAIN PADUAN LOGAM UNTUK INDUSTRI PEMBANGKIT LISTRIK DI INDONESIA .....	21
V. KESIMPULAN.....	24
VI. PENUTUP .....	25
UCAPAN TERIMA KASIH .....	26
DAFTAR PUSTAKA.....	28
LAMPIRAN .....	39
DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH.....	46
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	59



Buku ini tidak diperjualbelikan.

## PRAKATA PENGUKUHAN

*Bismillaahirrohmaanirrohiim*

*Assalamu'alaikum wa rohmatullaahi wa barokaatuh.*

Salam sejahtera untuk kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset yang mulia dan hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama marilah kita panjatkan puji dan syukur ke hadirat Allah Swt. atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya sehingga dalam kesempatan ini kita dapat berkumpul dan bersama-sama hadir pada acara orasi ilmiah Pengukuhan Profesor Riset di Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya menyampaikan orasi ilmiah dengan judul :

**DESAIN PADUAN LOGAM UNTUK KOMPONEN TURBIN  
PEMBANGKIT LISTRIK**

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## I. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan faktor yang sangat vital dalam kehidupan manusia. Kebutuhan akan energi listrik terus meningkat seiring dengan kehidupan masyarakat yang semakin berkembang pada berbagai bidang kehidupan. Sampai dekade ini, pembangkit listrik berbasis bahan bakar fosil, baik pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) maupun tenaga uap (PLTU), masih merupakan pilihan yang realistis untuk memenuhi kebutuhan listrik yang semakin meningkat. Pada tahun 2017, bahan bakar fosil menyuplai 64,5% kebutuhan listrik dunia dan akan terus meningkat pada dekade selanjutnya. Pada tahun 2050, diprediksi kapasitas listrik dunia lebih dari 2,2 terawatt (TW) akan disuplai oleh pembangkit listrik berbasis batu bara (PLTU). Di Indonesia, penggunaan pembangkit listrik berbahan bakar fosil masih mendominasi kapasitas pembangkit nasional sebesar lebih dari 75% dengan kapasitas PLTU dan PLTG masing-masing sebesar 49,9% dan 28,6%.

Pada pembangkit listrik berbahan bakar fosil ini, turbin merupakan bagian yang paling penting yang berfungsi mengubah energi kinetik gas panas atau uap air menjadi energi mekanik yang memutar generator untuk menghasilkan listrik. Pada turbin gas, udara luar dipampatkan dengan kompresor yang dialirkan ke ruang pembakaran (*combustion chamber*) dengan kecepatan beberapa ratus km/jam untuk dicampur dengan bahan bakar. Campuran udara dan bahan bakar dibakar pada suhu sekitar 1.100°C menghasilkan gas panas bertekanan tinggi yang mengalir ke bagian turbin dan memutar sudu turbin dengan kecepatan tinggi 2.000–10.000 rpm (*rounds per minute*). Putaran sudu turbin menggerakkan poros turbin (*turbine shaft*) yang dihubungkan ke generator untuk memutar magnet dan

menghasilkan listrik. Sedangkan pada turbin uap, misalnya pada turbin uap superkritis, untuk memutar sudu turbin digunakan uap air dengan suhu sekitar 565°C dan tekanan sekitar 25 MPa yang dialirkan dari ketel uap (*boiler*). Aliran uap air memutar tiga tahapan turbin, yaitu turbin tekanan tinggi, turbin tekanan menengah, dan terakhir turbin tekanan rendah. Putaran sudu turbin ini menggerakkan poros turbin yang dihubungkan ke generator listrik. Gambar 1a menunjukkan contoh mesin turbin gas SGT6-8000H dan Gambar 1b mesin turbin uap SST-6000 yang dibuat oleh Siemens<sup>1</sup>.

Dari gambaran mekanisme kerja di atas, turbin gas dan turbin uap beroperasi pada kondisi yang ekstrim dengan beban mekanik tinggi dan lingkungan suhu tinggi yang korosif. Pada kondisi operasi ini, kegagalan pada sistem turbin seringkali terjadi terutama pada komponen sudu turbin (*turbine blade*) yang merupakan komponen paling kritis. Mekanisme kegagalan atau kerusakan sudu turbin gas adalah deformasi *creep*, fatik (*fatigue*), korosi panas (*hot corrosion*), dan pemanasan berlebih (*overheating*)<sup>2,3</sup>. Selain itu, kerusakan sudu turbin uap pada umumnya diakibatkan oleh retak korosi-tegang (*SCC/stress corrosion cracking*), fatik-korosi (*corrosion fatigue*/kombinasi fatik dan korosi), dan korosi sumuran (*pitting*)<sup>4,5,6</sup>. Komponen sudu turbin yang rusak harus dilakukan perbaikan atau penggantian komponen dengan komponen yang baru.

Ada beberapa strategi untuk meningkatkan umur pakai komponen sudu turbin yang biasanya dilakukan. Pada turbin gas, biasanya dilakukan dengan pembuatan lubang internal pada sudu turbin sebagai pendingin dan penggunaan material pelapis sudu turbin yang dinamakan pelapis penghalang termal (*TBC/Thermal Barrier Coating*)<sup>7</sup>. Pelapis penghalang termal biasanya terdiri dari kombinasi NiAl sebagai lapisan pengikat (*bondcoat*)

dan keramik zirkonia sebagai lapisan luar (*topcoat*). Pada turbin uap, biasanya digunakan *stellite* (paduan Co) atau paduan boron (*boronizing*) sebagai pelapis sudu turbin<sup>8</sup>. Beberapa pelapisan dikembangkan untuk digunakan pada sudu turbin uap yaitu, lapisan difusi nitrogen (*nitriding*)<sup>9,10</sup>, celup panas aluminium (*hot dip aluminizing*)<sup>11,12,13</sup>, lapis listrik komposit Ni/BN<sup>14</sup>, lapis nonlistrik (*electroless*) Ni-P<sup>15,16,17,18</sup> dan komposit Ni-P/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>19,20</sup>, serta deposisi listrik pulsa (*pulse electrodeposition*) Ni dan komposit Ni/SiC<sup>21,22,23</sup>. Selanjutnya, untuk meningkatkan umur pakai komponen perlu dilakukan desain paduan untuk meningkatkan kestabilan struktur mikro, kekuatan mekanik, dan ketahanan korosi/oksidasi komponen sudu turbin.

Paduan-super (*superalloy*) dan baja tahan karat (*stainless steel*) telah secara luas digunakan masing-masing pada turbin gas dan turbin uap. Pada turbin gas, paduan-super digunakan untuk sudu turbin (*bucket* dan *nozzle*) dan komponen pembakaran (*combustor*), sedangkan baja tahan karat digunakan untuk sudu kompresor<sup>24</sup>. Pada turbin uap superkritis, baja tahan karat martensitik (*12 Cr Steel*) mendominasi pemakaian komponen turbin yang meliputi sudu turbin, *rotor*, *casing*, dan baut<sup>25</sup>. Pengembangan paduan-super dan baja tahan karat untuk masing-masing turbin gas dan turbin uap saat ini masih terus dilakukan untuk meningkatkan umur pakai komponen atau meningkatkan efisiensi proses.

Dalam pengembangan paduan logam untuk sudu turbin gas, penulis telah mendesain komposisi kimia dan struktur mikro untuk paduan-super berbasis nikel kristal tunggal generasi baru berdasarkan interaksi unsur-unsur paduan pada suhu tinggi. Paduan-super generasi baru ini dicirikan oleh kandungan unsur refraktori yang tinggi untuk meningkatkan kekuatan *creep* dan kandungan unsur yang menekan presipitasi fasa yang merusak

pada suhu tinggi. Interaksi unsur-unsur paduan pada suhu tinggi dievaluasi dengan menganalisis data interdifusi di dalam paduan nikel yang diperoleh secara eksperimen. Berkaitan dengan paduan logam untuk sudu turbin uap, penulis melakukan desain baja tahan karat martensitik dan baja tahan karat austenitik, baik dari sisi komposisi kimia maupun perlakuan panasnya. Desain menghasilkan baja tahan karat martensitik dengan komposisi modifikasi yang memiliki kekuatan mekanik, ketahanan abrasi, dan ketahanan korosi sumuran yang lebih baik dari baja tahan karat martensitik standar 410. Selain itu, dihasilkan juga komposisi baja tahan karat austenitik Fe-25Ni-15Cr modifikasi yang memiliki kekerasan dan ketahanan korosi sumuran yang lebih baik dari baja tahan karat austenitik Fe-25Ni-15Cr standar.

Buku orasi ini menyajikan permasalahan yang terjadi pada turbin gas dan turbin uap, perkembangan dan desain paduan-super berbasis nikel untuk aplikasi sudu turbin gas, serta perkembangan dan desain baja tahan karat untuk aplikasi sudu turbin uap. Hilirisasi hasil desain paduan-paduan ini untuk turbin pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) dan tenaga uap (PLTU) di Indonesia juga disajikan dalam buku orasi ini.

## II. PERKEMBANGAN PADUAN LOGAM UNTUK SUDU TURBIN PEMBANGKIT LISTRIK

Secara prinsip, sistem operasional turbin gas dan turbin uap memiliki persamaan. Perbedaannya terletak pada fluida penggerak turbin dan suhu operasi turbin. Pada turbin gas, penggerak turbin adalah fluida gas yang beroperasi pada suhu sekitar 1.000–1.100°C. Untuk turbin uap, penggerak turbin adalah fluida uap air dan beroperasi pada suhu yang lebih rendah daripada turbin gas, yaitu sekitar 565°C untuk uap superkritis. Sebagai konsekuensinya, material yang digunakan untuk komponen sudu pada kedua jenis turbin tersebut berbeda, di mana material sudu turbin gas harus memiliki ketahanan pada suhu yang lebih tinggi.

### 2.1 Paduan Logam untuk Sudu Turbin Gas

Paduan logam yang biasa digunakan untuk sudu turbin gas adalah jenis paduan-super (*superalloy*) berbasis nikel atau kobal. Paduan-super adalah paduan logam yang menunjukkan ketahanan *creep*, korosi, dan oksidasi yang unggul pada suhu tinggi di atas 650°C. Paduan-super berbasis nikel adalah tipe yang banyak digunakan di dalam turbin gas karena memiliki kekuatan dan ketahanan *creep* yang lebih tinggi dari jenis paduan-super yang lain. Paduan-super berbasis nikel memiliki struktur mikro yang terdiri dari fasa  $\gamma$  (FCC) sebagai matrik dan diperkuat oleh fasa  $\gamma'$  berbasis  $\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$  sebagai presipitat. Presipitat  $\gamma'$  atau  $\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$  ini menyumbangkan kekuatan suhu tinggi dan ketahanan terhadap deformasi *creep*. Di dalam paduan-super berbasis nikel kristal tunggal modern, fraksi volume fasa  $\gamma'$  umumnya sekitar 65-70% untuk memberikan efek penguatan yang maksimum<sup>26</sup>.

Efek penguatan maksimum dicapai apabila matrik fasa  $\gamma$  merupakan fasa homogen dan fasa  $\gamma'$  terdistribusi dengan



merata. Mekanisme penguatan lainnya berasal dari penambahan unsur padu untuk membentuk larutan padat di dalam matrik seperti Mo dan W serta penambahan unsur yang mengisi kisi Al di dalam fasa  $\gamma'$ , seperti Nb dan Ta<sup>27,28</sup>.

Pengembangan paduan-super sangat dipengaruhi oleh empat teknologi berikut: komposisi paduan, peleburan vakum, tempa (*forging*) dan turbin gas mesin jet pesawat terbang, dan pembangkit listrik. Dari keempat teknologi tersebut, teknologi turbin gas merupakan gaya penggerak (*driving force*) yang paling berpengaruh terhadap perkembangan paduan-super<sup>29</sup>. Sudu turbin gas merupakan komponen kritis, baik pada mesin jet pesawat terbang maupun pembangkit listrik. Kinerja mesin sangat terkait erat dengan kemampuan material untuk tahan suhu yang lebih tinggi lagi. Material yang tahan suhu tinggi dapat mempertahankan kekuatan mekaniknya, tahan terhadap deformasi *creep*, serta tahan terhadap oksidasi suhu tinggi. *Creep* merupakan fenomena deformasi pada suhu tinggi yang menjadi salah satu penyebab utama kegagalan pada sudu turbin gas. Secara singkat, *creep* dapat diartikan sebagai deformasi progresif suatu material pada tegangan konstan, salah satu manifestasi yang penting dari perilaku anelastik, yang terjadi pada suhu tinggi khususnya untuk logam<sup>30</sup>.

Beberapa kemajuan telah dicapai untuk meningkatkan sifat mekanik suhu tinggi pada paduan-super melalui perbaikan komposisi paduan dan inovasi dalam teknologi pengecoran. Perbaikan komposisi paduan ditujukan untuk meningkatkan fraksi volume presipitat dan meningkatkan jumlah unsur penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*). Dikembangkannya metode baru dalam teknologi pengecoran pada tahun 1970 di Amerika Serikat seperti pembekuan terarah (*directional solidification*) atau kristal tunggal (*single crystal*) ditujukan untuk

menghilangkan batas butir di dalam paduan-super sebagian atau seluruhnya. Hal ini dikarenakan batas butir merupakan daerah retakan selama deformasi *creep* melalui mekanisme pergeseran batas butir (*grain boundary sliding*) dan dislokasi panjat (*climb*)<sup>31</sup>. Kondisi ini yang menyebabkan kedua jenis teknologi pengecoran ini dapat menghasilkan paduan-super dengan ketahanan *creep* yang lebih tinggi dari paduan-super konvensional (polikristal)<sup>32</sup>. Ilustrasi sudu turbin kristal tunggal, kolumnar, dan polikristal ditunjukkan oleh Gambar 2<sup>33</sup>.

Komposisi kimia paduan-super berbasis nikel kristal tunggal telah mengalami perkembangan yang signifikan semenjak paduan generasi pertama dikembangkan sampai paduan generasi ketiga yang lebih maju<sup>27</sup>. Pada umumnya, paduan-super berbasis nikel kristal tunggal mengandung sekitar sepuluh unsur pepadu yang berpartisipasi ke fasa matrik  $\gamma$  atau ke presipitat  $\gamma'$ . Unsur pepadu yang berpartisipasi ke fasa matrik  $\gamma$  untuk membentuk larutan padat adalah Co, Cr, Mo, W, Re, sedangkan yang berpartisipasi ke presipitat  $\gamma'$  adalah Al, Ti, Nb dan Ta. Unsur pembentuk fasa  $\gamma$  memperkuat matrik, sementara unsur pembentuk  $\gamma'$  mengontrol morfologi, fraksi volume, dan distribusi presipitat  $\gamma'$ . Penambahan unsur refraktori ke dalam paduan-super berbasis nikel kristal tunggal memainkan peranan yang penting dalam peningkatan kekuatan mekanik suhu tinggi khususnya ketahanan *creep*<sup>34,35</sup>. Komposisi kimia ketiga generasi paduan-super berbasis nikel kristal tunggal ini dicirikan dengan kandungan unsur refraktori rhenium (Re). Pada paduan generasi pertama, tidak mengandung Re, sedangkan paduan generasi kedua mengandung 3% berat Re dan paduan generasi ketiga mengandung maksimum 6% berat Re<sup>27</sup>. Sebagai contoh, komposisi kimia (%berat) generasi pertama CMSX-2: 5.6Al-1Ti-8Cr-5Co-0.6Mo-8W-6Ta, generasi kedua CMSX-4: 5.6Al-1Ti-6.5Cr-9Co-0.6Mo-6W-6.5Ta-3Re-

0.1Hf, dan generasi ketiga CMSX-10: 5.7Al-0.2Ti-0.1Nb-2Cr-3Co-0.4Mo-5W-8Ta-6Re-0.03Hf.

Kandungan total unsur refraktori (Re, W, Ta) semakin meningkat pada paduan-super berbasis nikel kristal tunggal sampai pada generasi ketiga. Peningkatan kandungan unsur refraktori ini dapat menyebabkan kondisi lewat jenuh (*supersaturation*) pada unsur-unsur tersebut di dalam larutan padat fasa matrik  $\gamma$ . Selain itu, dapat mengakibatkan segregasi mikro unsur ini di dalam inti dendrit selama proses pengecoran. Segregasi mikro ini meningkatkan kecenderungan terjadinya presipitasi fasa lain yang dinamakan TCP (*Topologically Closed Pack*) pada pemanasan suhu tinggi saat operasi turbin terutama antara suhu 900-1100°C<sup>36</sup>. Fasa TCP ini umumnya berbentuk seperti jarum (*needle-like*) dengan kandungan yang kaya akan unsur-unsur refraktori terutama Re dan W<sup>37</sup>. Fasa TCP ini bersifat getas dan menurunkan kandungan unsur penguatan larutan padat di dalam fasa matrik sehingga melemahkan paduan-super berbasis nikel kristal tunggal terutama menurunkan ketahanan *creep*<sup>38</sup>. Kemunculan paduan-super berbasis nikel kristal tunggal generasi berikutnya diiringi dengan upaya menghilangkan presipitasi fasa TCP ini<sup>39,40</sup>.

Perspektif pengembangan paduan sudu turbin gas di masa depan selanjutnya dipengaruhi oleh isu lingkungan di mana turbin gas harus meningkatkan suhu operasi untuk menurunkan emisi gas CO<sub>2</sub>. Seiring dengan itu, material sudu turbin gas perlu ditingkatkan ketahanannya pada suhu tinggi untuk memenuhi peningkatan suhu sudu turbin. Ada dua pendekatan yang bisa dilakukan, yaitu dengan peningkatan ketahanan suhu tinggi paduan-super berbasis nikel dengan peningkatan kandungan unsur refraktori tanpa presipitasi fasa TCP atau dengan penggunaan paduan baru. Pada dekade terakhir, bermunculan upaya riset untuk mendapatkan pengganti paduan-super berbasis nikel untuk

aplikasi sudu turbin gas, misalnya paduan berbasis logam grup platina (Pt)<sup>41</sup> dan paduan antar-logam (*intermetallic alloys*)<sup>42</sup>. Kedua jenis paduan logam ini masih menghadapi berbagai kendala untuk sampai kepada aplikasi. Kendala yang dihadapi misalnya, paduan refraktori yang merupakan paduan yang relatif berat serta harganya mahal dan paduan antar-logam yang masih memiliki sifat getas.

## 2.2 Paduan Logam untuk Sudu Turbin Uap

Turbin uap beroperasi pada suhu yang jauh lebih rendah dari turbin gas sehingga paduan yang digunakan untuk sudu turbin uap tidak menggunakan paduan-super berbasis nikel, tetapi cukup dengan paduan berbasis besi terutama kelompok baja tahan karat martensitik (12% / 13% Cr) yang jauh lebih murah dari paduan nikel. Baja tahan karat martensitik memiliki kombinasi yang baik antara kekuatan, ketangguhan (*toughness*), dan ketahanan korosi. Selain digunakan untuk sudu turbin uap, tipe baja ini juga digunakan pada berbagai aplikasi, misalnya pada fasilitas industri minyak dan gas, industri petrokimia, industri pertambangan, peralatan kesehatan, berbagai macam alat potong dan lain-lain. Selain untuk PLTU, baja ini juga digunakan untuk sudu turbin pada pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) yang beroperasi pada suhu yang lebih rendah yaitu di bawah 200°C<sup>43</sup>.

Baja tahan karat martensitik tipe 403/410 dan 422 merupakan baja yang umum digunakan untuk sudu turbin uap subkritis dan superkritis<sup>44</sup>. Untuk penggunaan pada turbin uap dengan suhu yang lebih tinggi sampai 650°C, dikembangkan *grade* 410 modifikasi (*grade* 410M2) yang mengandung tambahan unsur paduan 0,38% Nb dan 0,84% Mo<sup>45</sup>. Baja modifikasi ini memiliki ketahanan *creep* yang lebih tinggi dari baja 410 karena adanya pembentukan presipitat halus NbC yang stabil pada rentang

suhu tersebut. Beberapa baja modifikasi tipe 12% Cr / 13% Cr ini masih terus dikembangkan karena termasuk tipe yang paling murah di dalam baja tahan karat. Misalnya, penambahan unsur nitrogen (N) untuk meningkatkan kekuatan dan yttrium (Y) untuk meningkatkan ketangguhan<sup>46,47</sup>.

Dalam rangka menurunkan emisi gas buang, mulai dikembangkan teknologi PLTU generasi terbaru untuk masa depan yang menggunakan uap *advanced ultra supercritical* dengan suhu 700 °C atau lebih. Para peneliti mulai melakukan pengujian terhadap paduan-super berbasis nikel yang mempunyai kapabilitas suhu tinggi yang lebih baik untuk digunakan sebagai pengganti baja tahan karat martensitik untuk material sudu turbin uap<sup>48</sup>. Paduan-super berbasis nikel ini harganya jauh lebih mahal sehingga akan meningkatkan biaya operasional PLTU. Baja tahan karat dengan struktur austenitik merupakan alternatif yang lebih murah yang memiliki kekuatan *creep* dan ketahanan korosi paling tinggi di antara kelas baja tahan karat dan banyak digunakan untuk berbagai aplikasi yang bersuhu tinggi.

Baja tahan karat berstruktur austenitik yang banyak digunakan untuk komponen turbin adalah tipe A286. Baja ini memiliki kandungan 13,5–16% Cr dan 24–27% Ni. Tipe baja tahan karat austenitik ini diperkeras dengan presipitat  $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$  sehingga baja A286 dikategorikan juga ke dalam baja pengerasan presipitasi/endapan (*Precipitation Hardening/PH*)<sup>49</sup>. Selain itu, baja tahan karat tipe coran CF8C-Plus yang telah dikembangkan untuk komponen *exhaust* mesin diesel direkomendasikan juga untuk penggunaan sebagai komponen *casing* turbin gas<sup>50</sup>. Perlu dikembangkan baja tahan karat austenitik untuk aplikasi komponen turbin uap ultra superkritis, terutama pada sudu turbin dengan target meningkatkan ketahanan korosi sumuran, fatik-korosi, dan retak korosi tegang.

### III. DESAIN PADUAN LOGAM UNTUK SUDU TURBIN PEMBANGKIT LISTRIK

Pada bagian ini, dipaparkan desain paduan-super berbasis nikel untuk aplikasi sudu turbin gas dan desain baja tahan karat martensitik dan austenitik untuk aplikasi sudu turbin uap. Desain dilakukan dengan mengacu pada permasalahan yang dialami sudu turbin kemudian dilakukan modifikasi komposisi kimia untuk meningkatkan sifat-sifat paduan logam sudu turbin yang sudah ada. Optimasi perlakuan panas untuk baja tahan karat martensitik dan austenitik dilakukan untuk mendapatkan kombinasi yang baik antara sifat mekanik dan ketahanan korosi.

#### 3.1 Desain Paduan-Super Berbasis Nikel untuk Sudu Turbin Gas

Penambahan unsur refraktori ke dalam paduan-super berbasis nikel kristal tunggal sampai generasi ketiga meningkatkan ketahanan *creep* secara signifikan. Jumlah kandungan unsur refraktori ini dibatasi oleh terbentuknya fasa TCP pada suhu tinggi yang tidak diinginkan yang dapat menurunkan ketahanan *creep*. Oleh karena itu, pengembangan paduan-super berbasis nikel kristal tunggal generasi berikutnya diarahkan kepada peningkatan kestabilan struktur mikro pada suhu tinggi. Hal ini dilakukan dengan menekan presipitasi fasa TCP sehingga jumlah unsur paduan refraktori dapat ditingkatkan.

Proses suhu tinggi yang terjadi pada paduan-super, seperti presipitasi fasa  $\gamma'$ , kinetika pembesaran presipitat, deformasi *creep*, dan pembesaran terarah fasa  $\gamma'$  (*rafting/directional coarsening*) dikontrol oleh proses difusi atom-atom di dalam paduan. Sebagai contoh, pada deformasi *creep*, terjadi pengaturan atom-atom secara difusi pada inti dislokasi dan pembesaran

terarah fasa  $\gamma'$  membutuhkan perpindahan atom-atom (difusi) melalui antarmuka fasa  $\gamma$ - $\gamma'$ <sup>51,52</sup>. Oleh karena itu, data interdifusi sangat dibutuhkan dalam menjelaskan perilaku unsur-unsur di dalam proses suhu tinggi dalam rangka mendesain paduan-super berbasis nikel untuk aplikasi suhu tinggi.

Penulis memulai penelitian dengan menginvestigasi interdifusi unsur-unsur refraktori (Re dan W) dalam kaitannya dengan unsur-unsur lain di dalam paduan nikel. Interdifusi Re, W dengan Al dievaluasi karena Al merupakan unsur yang penting di dalam paduan-super berbasis nikel sebagai unsur pembentuk presipitat fasa  $\gamma'$ . Interdifusi unsur refraktori (Re dan W) dengan Co dan Ru juga dievaluasi dengan mempertimbangkan kedua unsur ini (Co, Ru) merupakan kandidat untuk menekan fasa TCP<sup>53</sup>.

Interaksi Al dengan unsur-unsur paduan lain di dalam fasa  $\gamma$  mempengaruhi pembentukan dan evolusi fasa  $\gamma'$  pada suhu tinggi. Interdifusi Al dan unsur-unsur Re, W, Ru, dan Co diestimasi di dalam fasa  $\gamma$  dan fasa  $\gamma'$  pada sistem terner Ni-Al-X, di mana X adalah unsur-unsur di atas<sup>54,55,56,57,58</sup>. Re merupakan unsur yang memiliki koefisien interdifusi paling kecil, sedangkan Al memiliki koefisien interdifusi paling besar. Re, W, Ru memiliki interaksi yang kuat dengan Al. Unsur Re, W, dan Ru berpotensi mengontrol pembentukan dan evolusi fasa  $\gamma'$  secara kinematik.

Studi interdifusi pada sistem Ni-Co-Re, Ni-Co-Ru, dan Ni-Ru-Re merefleksikan ikatan antar-atom. Hasilnya, ikatan antar-atom Co-Re lebih besar daripada Ni-Re dan ikatan antar-atom Ru-Re atau Co-Re lebih besar dibandingkan masing-masing ikatan antar-atom Ni-Ru atau Ni-Co<sup>59,60,61</sup>. Co merupakan atom penghalang yang lebih kuat daripada Ru dalam menghambat difusi Re di dalam nikel dan dideduksi bahwa ikatan antar-atom Co-Re lebih kuat daripada Ru-Re<sup>62</sup>. Keberadaan Ru dan Co dapat meningkat-

kan kelarutan Re di dalam paduan-super berbasis nikel karena ikatan antar-atom Ru-Re dan Co-Re yang stabil secara termodinamika di dalam paduan nikel. Hasil ini merekomendasikan bahwa kombinasi unsur-unsur Re-Ru-Co menjadi penting dalam meningkatkan kapabilitas suhu tinggi paduan-super berbasis nikel yang modern.

Pada tahap selanjutnya, penulis dan tim mendesain beberapa paduan-super berbasis nikel generasi baru dengan 8 unsur yang mengandung Re, Ru, dan Co<sup>62,63</sup>. Desain paduan ditargetkan untuk meningkatkan kestabilan struktur mikro pada suhu tinggi tanpa adanya presipitasi fasa lain yang dapat berpengaruh buruk terhadap ketahanan *creep*. Komposisi kimia paduan-super berbasis nikel dalam %berat ditampilkan pada Tabel 1 dan struktur mikro ditunjukkan pada Gambar 3. Dari Gambar 3, diketahui bahwa paduan-super berbasis nikel yang mengandung Ru memiliki fasa  $\gamma'$  berbentuk kubus (*cuboid*) dengan siku yang lebih tajam dan ukuran kubus yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan paduan-super yang tidak mengandung Ru. Tingkat ketajaman siku kubus semakin besar dan ukuran kubus semakin kecil seiring dengan semakin besarnya kandungan Ru. Ketajaman siku kubus fasa  $\gamma'$  ini menunjukkan bahwa penambahan Ru ke dalam paduan-super berbasis nikel meningkatkan regangan koherensi (*lattice misfit*) antara fasa  $\gamma'$  dan fasa  $\gamma$ . *Lattice misfit* merupakan faktor yang dapat memengaruhi kekuatan *creep*, di mana *lattice misfit* yang besar menghasilkan kekuatan *creep* yang unggul pada paduan-super berbasis nikel<sup>64</sup>.

Kinetika pertumbuhan presipitat fasa  $\gamma'$  diinvestigasi pada suhu 1051°C dengan variasi waktu sampai 256 jam. Panjang rata-rata kubus fasa  $\gamma'$  pada paduan-super dengan kandungan 0% dan 4% mol (6% berat) Ru sebagai fungsi waktu  $t^{1/3}$  disajikan pada Gambar 4<sup>63</sup>. Fasa  $\gamma'$  pada paduan-super dengan kandungan



6% berat Ru memiliki ukuran panjang rata-rata kubus yang lebih kecil daripada yang tidak mengandung Ru. Kubus fasa  $\gamma'$  pada masing-masing paduan-super mengalami pertumbuhan ukuran dengan semakin lamanya waktu pemanasan dan keduanya mengikuti garis linier terhadap  $t^{1/3}$  berdasarkan teori LSW (*Lifshitz, Slyozov and Wagner*). Ini menunjukkan kinetika pertumbuhan presipitat fasa  $\gamma'$  merupakan proses yang dikontrol oleh difusi. Selain itu, hal ini mengonfirmasi pentingnya asesmen interdifusi dalam desain paduan-super berbasis nikel.

Kestabilan struktur mikro pada suhu tinggi merupakan hal yang penting pada paduan-super. Pada percobaan selanjutnya, ditemukan bahwa paduan-super dengan kandungan sampai 6% berat Ru menunjukkan kestabilan struktur mikro tanpa presipitasi fasa ketiga selain fasa  $\gamma$  dan  $\gamma'$  selama pemanasan pada suhu 1051°C. Presipitasi fasa ketiga ditemukan pada paduan-super berbasis nikel yang mengandung 10% berat Ru yang mulai muncul pada pemanasan selama 24 jam. Fasa ketiga ini semakin tumbuh anisotrop yang menyerupai jarum (*needle-like*) dengan semakin lamanya waktu pemanasan sampai 256 jam (Gambar 5)<sup>62</sup>. Fasa ketiga ini merupakan senyawa antar-logam (*inter-metallic*) berbasis RuAl (*Ruthenium Aluminide*) berdasarkan analisa komposisi kimia menggunakan SEM-EDX. Presipitasi fasa ketiga ini menunjukkan ketidakstabilan struktur mikro dan memiliki pengaruh yang buruk terhadap ketahanan suhu tinggi paduan-super berbasis nikel. Hasil ini merekomendasikan penambahan Ru ke dalam paduan-super berbasis nikel generasi baru harus kurang dari 10% berat untuk memberikan kestabilan struktur mikro dan peningkatan kekuatan *creep*.

Pada dekade sekarang, telah bermunculan paduan-super berbasis nikel kristal tunggal generasi baru sampai generasi keenam yang dicirikan dengan kandungan kombinasi Re-Ru<sup>65</sup>.

Generasi keempat ditunjukkan dengan penambahan Ru. Untuk generasi kelima ditunjukkan dengan peningkatan kandungan Ru 5-6% berat dan pengaturan perbandingan Re/Ru yang optimal. Selanjutnya, generasi keenam didesain dengan pengaturan yang lebih teliti terhadap kandungan unsur yang lain. Komposisi kimia yang didesain penulis untuk paduan-super berbasis nikel kristal tunggal generasi baru mengandung kombinasi Re-Ru-Co dengan konsentrasi masing-masing 6,3-6,3-11,2 (% berat) dapat dikategorikan sebagai generasi kelima atau keenam. Beberapa contoh komposisi paduan-super generasi baru (Generasi 4–6) untuk aplikasi sudu turbin kristal tunggal dapat dilihat pada Tabel 2.

### **3.2 Desain Baja Tahan Karat Martensitik untuk Sudu Turbin Uap**

Sebagian besar sudu turbin uap mengalami kegagalan diakibatkan oleh tiga mekanisme utama, yaitu korosi sumuran, fatik korosi, dan retak korosi-tegang. Korosi sumuran pada sudu turbin uap ini biasanya merupakan lokasi inisiasi dua mekanisme lainnya (fatik korosi dan retak korosi-tegang)<sup>66,67</sup>. Oleh karena itu, peningkatan ketahanan terhadap korosi sumuran dari material sudu turbin uap ini merupakan salah satu solusi untuk meningkatkan ketahanan sudu turbin terhadap kegagalan atau meningkatkan umur pakainya.

Dalam pengembangan paduan logam seperti baja tahan karat, desain komposisi kimia dan optimasi perlakuan panas merupakan cara yang tepat dilakukan untuk meningkatkan kekuatan mekanik dan ketahanan korosinya. Korosi sumuran yang terjadi pada baja tahan karat diakibatkan pecahnya lapisan pasif pada lokasi-lokasi tertentu di dalam larutan korosif dan korosi berlanjut pada lubang sumuran (*pit*) secara autokatalitik. Peningkatan ketahanan korosi sumuran ini dapat dilakukan

dengan meningkatkan kandungan Cr sebagai unsur pembentuk lapisan pasif atau dengan menambahkan unsur lain. Mo merupakan pilihan yang tepat. Mengingat unsur ini telah dibuktikan dapat meningkatkan ketahanan korosi sumuran baja tahan karat austenitik<sup>68</sup>. Hal yang harus diperhatikan adalah Mo sebagai penstabil fasa ferit yang berpotensi memunculkan fasa ferit delta yang tidak diinginkan karena menurunkan sifat mekanik baja. Penambahan Ni diperlukan untuk menghambat pembentukan fasa ferit delta sekaligus Ni dapat meningkatkan kekuatan dan ketahanan oksidasi.

Penulis dan tim telah mendesain baja tahan karat martensitik 410 (baja 13Cr) modifikasi dengan penambahan Mo dan Ni untuk meningkatkan ketahanan korosi sumuran sekaligus kekuatan mekaniknya. Sejumlah sampel baja tahan karat martensitik 410 (baja 13Cr) modifikasi dibuat dengan desain komposisi yang memvariasikan kandungan Mo dan Ni seperti ditunjukkan oleh Tabel 3<sup>69</sup>. Baja dibuat dengan tungku peleburan induksi dan dilanjutkan dengan proses penempaan panas untuk membuat sampel berupa batangan baja (*wrought*) serta proses perlakuan panas *hardening* dan *tempering*. Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan 3% berat Mo ke dalam baja tahan karat martensitik 410 meningkatkan kandungan fasa ferit delta dan mensubstitusi Cr secara parsial di dalam presipitat karbida logam, meningkatkan kekuatan tarik dan elongasi, serta meningkatkan ketahanan korosi. Penambahan 3% berat Ni menurunkan kandungan fasa ferit delta, menurunkan kekuatan tarik dan meningkatkan ketahanan korosi<sup>69,70,71,72</sup>.

Ketahanan korosi sumuran dan abrasi merupakan sifat yang penting pada sudu turbin uap. Pengujian korosi sumuran terhadap sampel baja tahan karat 410 modifikasi dilakukan di

dalam lingkungan 3,5% NaCl menggunakan metode polarisasi siklik dan spektroskopi impedansi elektrokimia (EIS). Pengujian ketahanan abrasi dilakukan pada kertas abrasif SiC no. 120 dengan putaran sampai 1000 siklus pada pembebanan 100, 500, dan 1000 gram. Hasil pengujian korosi sumuran menunjukkan bahwa di dalam larutan yang mengandung 3,5% NaCl baja tahan karat martensitik modifikasi 13Cr-3Mo-3Ni memiliki ketahanan korosi sumuran yang paling tinggi yang ditunjukkan dengan nilai potensial sumuran (*breakdown potential*) yang paling tinggi (Tabel 4)<sup>70</sup>. Pengukuran parameter impedansi dengan EIS menunjukkan kestabilan lapisan pasif yang lebih besar pada baja modifikasi 13Cr-3Mo-3Ni. Sementara itu, pengujian abrasi<sup>73,74</sup> menunjukkan bahwa penambahan Mo dan Ni ke dalam baja meningkatkan ketahanan abrasi. Baja modifikasi 13Cr-3Mo-3Ni memiliki ketahanan abrasi yang paling tinggi atau kehilangan berat yang paling kecil (Gambar 6). Pengamatan menggunakan SEM pada permukaan abrasi menunjukkan bahwa presipitat karbida logam yang tersebar merata memengaruhi ketahanan abrasi yang tinggi dari baja modifikasi 13Cr-3Mo-3Ni.

Perlakuan panas merupakan proses yang penting untuk mengontrol struktur mikro, sifat mekanik, dan ketahanan korosi pada baja. Dalam penggunaannya, banyak ditemukan kasus kegagalan komponen logam akibat proses perlakuan panas yang tidak tepat atau tidak sesuai dengan jenis paduannya. Penelitian telah dilakukan untuk mempelajari pengaruh suhu dan waktu perlakuan panas terhadap struktur mikro, sifat mekanik, ketahanan korosi, retak korosi-tegang, dan oksidasi suhu tinggi pada baja tahan karat martensitik. Perlakuan panas baja tahan karat martensitik dilakukan dengan pemanasan austenisasi yang dilanjutkan dengan pendinginan cepat (*quenching*) dan pemanasan *tempering*. Secara umum, meningkatnya suhu austenisasi

berkorelasi dengan peningkatan ukuran bilah (*lath*) fasa martensit<sup>75,76</sup>, peningkatan sifat mekanik (kekerasan, kekuatan tarik, dan ketahanan impact)<sup>77,78,79,80</sup>, penurunan laju korosi merata<sup>81</sup>, dan peningkatan potensial korosi sumuran (Epit)<sup>82</sup>. Meningkatnya suhu *tempering* berkorelasi dengan penurunan ukuran bilah martensit<sup>75,76</sup>, penurunan kekerasan<sup>83,84,85,86</sup> dan kekuatan tarik<sup>78</sup>, peningkatan ketahanan impact<sup>79,84</sup>, penurunan laju korosi merata<sup>82,87,88</sup>, penurunan potensial korosi sumuran (Epit)<sup>88</sup>, dan peningkatan ketahanan retak korosi-tegang (SCC)<sup>89</sup>. Lebih jauh, ditemukan juga bahwa baja modifikasi 13Cr-3Mo-3Ni dalam kondisi *tempering* memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap oksidasi suhu tinggi pada 700°C dibandingkan dalam keadaan pendinginan cepat (*quenched/ austenized*)<sup>90,91</sup>.

Dalam penggunaannya, paduan logam dapat berupa produk hasil pengerolan, tempa, permesinan, atau produk hasil pengecoran. Penulis mengembangkan baja tahan karat martensitik tipe coran (*casting*)<sup>92,93,94,95</sup> untuk sudu turbin uap dengan pertimbangan kemudahan dalam proses produksi. Baja martensitik cor tipe CA6NM didesain dengan peningkatan kandungan Mo dan penambahan N (nitrogen) untuk meningkatkan ketahanan korosi sumuran. Pengukuran ketahanan korosi sumuran dilakukan di dalam media panas bumi (*geothermal*) hasil simulasi untuk mengevaluasi potensi penggunaan baja cor CA6NM di industri Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP). Hasil pengujian menunjukkan bahwa baja martensitik cor CA6NM memiliki kekerasan dan ketahanan korosi sumuran yang lebih baik dari baja tahan karat martensitik 410<sup>89</sup>. Peningkatan kandungan Mo dan penambahan N meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan korosi sumuran baja tahan karat martensitik CA6NM<sup>93,94</sup>.

### 3.3 Desain Baja Tahan Karat Austenitik untuk Sudu Turbin Uap

Konsep umum dalam mendesain baja tahan karat austenitik yang memiliki kekuatan suhu tinggi yang baik adalah bagaimana menghasilkan struktur mikro yang terdiri dari fasa matrik yang kuat dengan presipitat halus yang stabil dan terdispersi merata. Penulis dan tim mengembangkan baja tahan karat austenitik dengan menggunakan basis komposisi 25Ni-15Cr (% berat) yang ekuivalen dengan kandungan Cr-Ni baja A286. Kegiatan pengembangan masih dalam tahap awal untuk mengevaluasi pengaruh unsur penguat fasa matrik austenitik dan unsur pembentuk presipitat terhadap sifat mekanik, ketahanan korosi sumuran, dan oksidasi suhu tinggi. Beberapa komposisi baja Fe-25Ni-15Cr didesain dengan penambahan unsur-unsur W sebagai penguat larutan padat serta Nb dan V sebagai unsur pembentuk presipitat<sup>96</sup>.

Penambahan W, Nb, dan V masing-masing meningkatkan kekerasan baja austenitik Fe-25Ni-15Cr. Baja Fe-25Ni-15Cr-2W-1Nb-1V yang mengandung ketiga unsur tersebut memperlihatkan kekerasan yang paling tinggi. Pada baja Fe-25Ni-15Cr dan baja Fe-25Ni-15Cr-2W, proses *solution treatment* menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi daripada proses *solution treatment* yang dilanjutkan *aging*. Baja Fe-25Ni-15Cr-2W-1Nb dan baja Fe-25Ni-15Cr-2W-1Nb-1V menunjukkan hasil sebaliknya di mana proses *solution treatment* yang dilanjutkan *aging* menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi daripada proses *solution treatment*. Hal ini menunjukkan adanya presipitasi fasa kedua setelah *aging* pada baja Fe-25Ni-15Cr-2W-1Nb dan baja Fe-25Ni-15Cr-2W-1Nb-1V akibat penambahan masing-masing Nb dan Nb-V. Pengamatan SEM-EDS menunjukkan bahwa

terjadi presipitasi fasa Laves pada baja yang mengandung Nb dan penambahan V menyebabkan peningkatan Nb di dalam fasa Laves<sup>96</sup>.

Ketahanan korosi sumuran baja dievaluasi dengan pengukuran polarisasi siklik di dalam larutan 3,5% NaCl. Baja Fe-25Ni-15Cr-2W-1Nb-1V memiliki ketahanan korosi sumuran yang paling baik dengan nilai potensial korosi sumuran (Epit) yang paling tinggi<sup>97</sup>. Perlakuan panas juga berpengaruh terhadap ketahanan korosi sumuran baja austenitik modifikasi. Baja dalam kondisi *solution treatment* memiliki potensial korosi sumuran yang lebih tinggi daripada baja dalam kondisi *aging*<sup>98</sup>.

Ketahanan oksidasi dan korosi suhu tinggi baja austenitik Fe-25Ni-15Cr telah dievaluasi pada suhu 800°C masing-masing dalam lingkungan atmosfer dan lingkungan lelehan garam (klorida dan sulfat)<sup>99</sup>. Secara umum, baja austenitik modifikasi memiliki ketahanan oksidasi dan korosi suhu tinggi yang lebih rendah dari baja austenitik Fe-25Ni-15Cr standar. Penambahan W menurunkan ketahanan oksidasi dan korosi suhu tinggi pada baja Fe-25Ni-15Cr dengan menekan pembentukan Cr oksida pada pemanasan suhu tinggi, sedangkan penambahan Nb dan V cenderung menaikkan ketahanan oksidasi dan korosi suhu tinggi.

Pengembangan baja tahan karat austenitik Fe-25Ni-15Cr untuk sudu turbin uap masih perlu dilanjutkan dengan melakukan desain struktur mikro dengan mengoptimalkan komposisi kimia dan perlakuan panas sehingga menghasilkan peningkatan ketahanan fatik-korosi dan retak tegang-korosi.

#### IV. HILIRISASI HASIL DESAIN PADUAN LOGAM UNTUK INDUSTRI PEMBANGKIT LISTRIK DI INDONESIA

Untuk memenuhi kebutuhan listrik nasional, PLTG dan PLTU di Indonesia masih bergantung pada teknologi dari luar negeri termasuk penyediaan komponen-komponennya terutama turbin. Penggantian utuh komponen sudu turbin masih harus diimpor dari luar negeri karena di Indonesia saat ini hanya terdapat bengkel-bengkel (*workshop*) yang memperbaiki (*repair*) komponen sudu turbin. Harga sudu turbin impor ini relatif mahal. Jika komponen ini diproduksi sendiri di dalam negeri, tentu akan menghemat biaya. Akan tetapi, produksi sudu turbin memerlukan penjaminan kualitas produk dan standar material/paduan yang ketat sesuai dengan persyaratan untuk turbin gas atau turbin uap. Diperlukan berbagai upaya agar Indonesia dapat membuat sendiri komponen turbin PLTU dan PLTG yang memenuhi standar dengan menggunakan potensi dalam negeri.

Kegiatan riset dan pengembangan merupakan faktor penting dalam upaya kemandirian dan daya saing suatu produk teknologi. Kegiatan riset dan pengembangan menghasilkan publikasi yang dapat disitasi oleh semua orang dan menghasilkan kekayaan intelektual serta prototipe yang dapat menjadi dasar/acuan dalam suatu proses produksi. Riset dan pengembangan berkaitan dengan material sudu turbin telah menghasilkan publikasi yang telah disitasi untuk keperluan riset selanjutnya. Selain itu, prototipe batangan baja tahan karat 410 modifikasi telah berhasil dibuat dengan proses pengecoran dan penempaan (*forging*). Prototipe sudu turbin uap dari batangan baja modifikasi ini juga telah dibuat dengan proses permesinan (Gambar 7 dan Gambar 8). Pengujian mampu mesin (*machinability*) terhadap



baja modifikasi ini juga telah dilakukan<sup>100</sup>. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa upaya ke arah pemanfaatan suatu produk teknologi tidak dapat dicapai hanya dengan melakukan riset dan pengembangan terhadap teknologi tersebut, tetapi diperlukan pula upaya-upaya lain yang relevan.

Kerja sama antara lembaga litbang dan industri sebagai pengguna hasil riset dan pengembangan juga merupakan faktor lain yang penting dalam proses hilirisasi. Peningkatan tingkat kesiapterapan teknologi (*TRL/Technology Readiness Level*) suatu produk sebaiknya dilakukan dengan uji produksi menggunakan fasilitas produksi di industri. Untuk komponen sudu turbin gas PLTG dengan material paduan-super berbasis nikel, harus diproduksi dengan proses pengecoran menggunakan tungku peleburan vakum. Industri di Indonesia yang memiliki fasilitas tungku peleburan vakum untuk paduan nikel masih sangat langka, hanya terdapat di beberapa industri saja dan masih belum memiliki fasilitas pembekuan terarah untuk membuat paduan berbutir kolumnar atau kristal tunggal. Dalam jangka pendek, upaya bisa dilakukan untuk pengembangan paduan-super polikristal.

Komponen sudu turbin uap untuk PLTU memiliki peluang yang lebih besar untuk diproduksi di dalam negeri dalam waktu dekat. Sudu turbin uap terbuat dari baja tahan karat martensitik 410 atau modifikasinya yang dapat diproduksi dengan fasilitas industri yang cukup banyak tersedia di Indonesia. Proses manufaktur yang melibatkan proses penempaan bilet baja dan permesinan dapat dilakukan di industri-industri logam yang memiliki fasilitas peralatan tersebut. Karena bilet baja tahan karat martensitik 410 saat ini masih impor, alternatif penggantinya dalam upaya kemandirian bisa dengan melakukan sendiri pembuatan

ingot baja 410 dengan proses pengecoran. Kemudian, dilakukan proses penempaan untuk membuat billet atau produk setengah jadi. Terakhir, dilakukan proses permesinan untuk mendapatkan produk akhir berupa sudu turbin.

Tahapan hilirisasi produk riset dan pengembangan selanjutnya yang perlu dilakukan adalah uji aplikasi produk pada lingkungan yang sebenarnya. Terkait komponen sudu turbin, uji aplikasi dilakukan dengan pemasangan dan penggunaan prototipe sudu turbin pada sistem turbin gas atau turbin uap yang sebenarnya. Setelah itu, dilakukan evaluasi kinerja dan umur pakainya. Dalam hal ini, kerja sama dengan industri pembangkit listrik PLTG/PLTU atau industri pengguna turbin gas/uap lainnya sangat diperlukan. Uji ini tentunya dilakukan setelah uji kinerja di dalam laboratorium dan sudu turbin menunjukkan kinerja optimal yang dibutuhkan oleh sistem turbin.

Upaya untuk mensubstitusi produk impor tidak hanya bergantung pada kerja sama lembaga riset dan industri, tetapi keberpihakan pemerintah dalam hal ini Kementerian Perindustrian sangat diperlukan. Keberpihakan pemerintah bisa dalam bentuk kebijakan dan regulasi penggunaan produk dalam negeri, kemudahan proses standarisasi dan sertifikasi produk baru serta insentif pajak bagi industri yang menggunakan produk dalam negeri.

## V. KESIMPULAN

Desain paduan logam merupakan hal yang penting untuk meningkatkan sifat-sifat dan karakteristik paduan dalam lingkungan yang spesifik. Turbin gas dan turbin uap yang digunakan di dalam pembangkit listrik bekerja di lingkungan dan kondisi operasional yang ekstrim (suhu tinggi dan korosif) yang memerlukan desain paduan untuk meminimalkan kegagalan dan meningkatkan umur pakai komponennya. Desain komposisi kimia paduan dengan penggunaan unsur yang tahan suhu tinggi (refraktori) merupakan faktor yang penting dalam mendesain paduan-super berbasis nikel. Penggunaan kombinasi unsur-unsur Re-Ru-Co dengan konsentrasi yang optimal dalam desain komposisi kimia meningkatkan kestabilan struktur mikro paduan-super berbasis nikel pada suhu tinggi. Untuk melengkapi desain paduan, uji ketahanan *creep* perlu dilakukan untuk membuktikan ketahanan mekanik paduan-super pada suhu tinggi. Mendesain komposisi kimia paduan-super berbasis nikel pada pembuatan komponen sudu turbin memberikan solusi pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) untuk meminimalkan tingkat kerusakan dan menurunkan biaya perawatan.

Mendesain komposisi kimia dengan mengoptimalkan kandungan Ni-Mo dan mendesain proses perlakuan panas adalah langkah yang bisa ditempuh untuk meningkatkan kekuatan mekanik dan ketahanan korosi baja tahan karat martensitik untuk aplikasi sudu turbin uap. Penggunaan baja tahan karat dengan kandungan Ni-Mo yang optimal untuk sudu turbin uap pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) atau Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) dapat menurunkan resiko kerusakan sudu turbin dan meningkatkan umur pakainya. Dengan proses produksi yang dapat dilakukan di dalam negeri dengan fasilitas yang ada, langkah ini selain menurunkan biaya perawatan, juga dapat meningkatkan kemandirian nasional dalam teknologi komponen turbin pembangkit listrik.

## VI. PENUTUP

Desain paduan logam telah dilakukan dalam rangka meningkatkan umur pakai sudu turbin gas dan turbin uap untuk pembangkit listrik. Hal selanjutnya yang perlu dipertimbangkan adalah bagaimana paduan logam ini diproduksi menjadi komponen sudu turbin yang memenuhi persyaratan industri pembangkit listrik, baik persyaratan kualitas maupun harga produk agar dapat menyubstitusi sudu turbin impor. Konsekuensi dari ini adalah bagaimana agar dapat menghasilkan produk dengan kualitas yang memenuhi persyaratan teknis dengan biaya yang lebih murah. Ini adalah tantangan ke depan yang harus dihadapi dalam rangka meningkatkan kemandirian dalam pengadaan komponen sudu turbin di Indonesia.

Penggunaan sumber daya lokal merupakan salah satu upaya untuk menurunkan biaya bahan baku komponen. Selain itu, pengembangan proses produksi (manufaktur) komponen yang efektif dan efisien serta optimasinya perlu dilakukan untuk menurunkan biaya produksi. Peningkatan kompetensi atau disiplin ilmu di bidang proses manufaktur komponen sangat diperlukan untuk mendukung upaya tersebut.

Faktor lain yang juga sangat mendukung upaya kemandirian adalah kegiatan hilirisasi yang harus melibatkan pemangku kepentingan terkait. Selain melibatkan industri pembangkit listrik sebagai pengguna produk sudu turbin gas dan turbin uap, juga diperlukan upaya kerja sama dengan industri manufaktur lokal yang ada sebagai mitra dalam produksi komponen sudu turbin uap atau turbin gas. Tentunya pemerintah, dalam hal ini Kementerian Perindustrian, perlu dilibatkan dalam upaya hilirisasi ini untuk mendukung dalam hal regulasi, arah kebijakan, dan insentif.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Majelis Pengukuhan Profesor Riset dan hadirin yang saya hormati.

Alhamdulillah puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala atas karunia dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan naskah orasi profesor riset dan menyampaikannya pada acara pengukuhan profesor riset hari ini.

Selanjutnya, saya menyampaikan terima kasih kepada Bapak Presiden RI Joko Widodo atas perkenaanannya menetapkan saya sebagai Peneliti Ahli Utama. Saya sampaikan juga terima kasih kepada Kepala BRIN Dr. Laksana Tri Handoko dan Kepala LIPI yang telah memberikan kesempatan dan keputusan kepada saya untuk melakukan orasi pengukuhan profesor riset. Kemudian, saya sampaikan terima kasih kepada Ketua Majelis Pengukuhan Profesor Riset Prof. Dr. Bambang Subiyanto, M.Agr., Sekretaris Majelis Pengukuhan Profesor Riset Prof. Dr. Ir. Gadis Sri Haryani, Tim Penelaah Naskah Orasi Ilmiah yang terdiri dari Prof. Dr. Ir. F. Firdiyono, Prof. Drs. Perdamean Sebayang, M.Sc., dan Prof. Dr. Ir. D. N. Adnyana atas arahan, penelaahan, dan bimbingannya dalam penyusunan naskah orasi. Terima kasih saya sampaikan juga kepada Panitia Pelaksana Pengukuhan atas bantuannya dari awal sampai penyelenggaraan orasi pengukuhan profesor riset ini.

Saya sampaikan terima kasih kepada Deputy Bidang Ilmu Pengetahuan Teknik LIPI Dr. Agus Haryono, M.Sc., Sekretaris Utama LIPI Rr Nur Tri Aries Suestiningtyas, S.IP., M.A., dan Kepala BOSDM LIPI Dr. Heru Santoso, M.App.Sc. atas dukungan dan bantuannya kepada saya untuk melakukan orasi pengukuhan profesor riset. Terima kasih saya sampaikan juga

kepada sivitas Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI; Prof. Dr. Nurul Taufiqu Rochman, M.Eng. selaku Kepala Pusat, serta para peneliti, para teknisi, dan tim administrasi yang banyak membantu dan bekerja sama dalam aktivitas pekerjaan. Saya sampaikan terima kasih juga kepada pembimbing saya di ITB selama studi S1 dan S2, Prof. Ir. Waspodo Martojo (*rohimahullah*), Prof. Dr. Syoni Supriyanto dan Dr. Slameto Wiryolukito serta pembimbing studi S3 saya di Nagoya University Jepang, Prof. Masahiko Morinaga dan Prof. Yoshinori Murata. Demikian pula, saya sampaikan terima kasih kepada guru-guru di SD Suradinaya, SMP Negeri 5 dan SMA Negeri 2 di Cirebon yang telah mendidik saya selama pendidikan dasar dan menengah.

Pada kesempatan ini, saya menyampaikan terima kasih dan doa untuk kedua orang tua saya yang saya cintai, Bapak Mabruhi (*rohimahullah*) dan Ibu Rutami (*rohimahallah*) atas segala perhatian dan kasih sayangnya. Semoga mereka mendapat ampunan dan rahmat Allah Subhanahu wa Ta'ala. Kemudian pada kesempatan yang baik ini pula, saya menyampaikan terima kasih kepada orang-orang yang saya cintai, istri saya Heppi Dewayani yang selalu memberikan kasih sayang, pengertian, dan kesabaran dan anak-anak yang sholeh-sholehah, Imam Ali Muthahhari, Yumna Salma Azzahra, Mujaddid Izhharulhaq, Aliyuddin Muhammad, Qonita Fillah Muwaffaqoh, Muhammad Izhharuddin AlFalah, Abbad Prawira Madani, dan Ahmad Ash-Shiddiq Fathuddin yang selalu memberikan semangat dan keceriaan.

Terakhir, saya sampaikan terima kasih atas perhatiannya kepada seluruh Bapak/Ibu yang menghadiri acara Orasi Pengukuhan Profesor Riset ini. Saya mohon maaf atas kekurangan dan kekhilafan dalam penyampaian orasi ini.

*Billahi Taufiq wal Hidayah*

*Wassalamualaikum wa Rohmatullahi wa Barokaatuh.*

## DAFTAR PUSTAKA

1. SIEMENS. Portfolio: Products and solutions supporting a reliable, affordable, and efficient power supply [Internet]. [Diakses pada 9 September 2020]. Tersedia di <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation.html>
2. Mazur Z, Luna-Ramírez A, Juárez-Islas JA, Campos-Amezcuca A. Failure analysis of a gas turbine blade made of Inconel 738LC alloy. *Engineering Failure Analysis*. 2005 Jun 1; 12(3):474–86..
3. Rani S, Agrawal AK, Rastogi V. Failure analysis of a first stage IN738 gas turbine blade tip cracking in a thermal power plant. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2017 Apr 1;8:1–0.
4. Ziegler D, Puccinelli M, Bergallo B, Picasso A. Investigation of turbine blade failure in a thermal power plant. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2013 Jul 1;1(3):192–9.
5. Adnyana DN. Corrosion fatigue of a low-pressure steam turbine blade. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2018 Feb 1;18(1):162–73.
6. Nurbanasari M, Abdurrachim. Crack of a first stage blade in a steam turbine. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2014 Okt 1;2(2):54–60.
7. Oguma H, Tsukimoto K, Goya S, Okajima Y, Ishizaka K, Ito E. Development of advanced materials and manufacturing technologies for high-efficiency gas turbines. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. 2015 Des;52(4):5–14.
8. Noda S, Senitani S, Yamada Y, Sasaki T. Improved technologies of steam turbine for long term continuous operation. *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review*. 2004 Jun;41(3):1–5.
9. Mabruhi E, Anwar MS. Kombinasi pelapisan krom dan nitriding suhu tinggi pada martensitic stainless steel AISI 420. *Prosiding Seminar Material Metalurgi*. 2010.

10. Anwar MS, **Mabruri E**. Modifikasi permukaan baja tahan karat martensitik 420 dengan bahan coating yang berbeda. *Korosi*. 2010; 19(1).
11. Citrawati F, **Mabruri E**. Pelapisan aluminium baja tahan karat martensitik AISI 420 melalui metode celup panas. *Metalurgi*. 2009;24(2):73–80.
12. Kevin, Anwar MS, Saefudin, Alfirano, **Mabruri E**. Pengaruh komposisi lelehan dan waktu celup terhadap struktur mikro lapisan hot dip aluminizing pada baja tahan karat martensitik. *Widyariset*. 2019;5(1):21–9.
13. Kevin M, Anwar MS, Alfirano, **Mabruri E**. Karakteristik lapisan hot dip aluminizing pada baja tahan karat martensitik 13cr. *Metalurgi*. 2019;34(3):151–8.
14. Harini, **Mabruri E**, Elektrokodeposisi komposit Ni-BN. *Metalurgi*. 1998.
15. Nikitasari A, **Mabruri E**. Study of Eelectroless Ni-W-P alloy coating on martensitic stainless steel. *AIP Conference Proceedings*. 2016 Apr 19;1725 (020039).
16. Nikitasari A, **Mabruri E**. Pengaruh konsentrasi hipofosfit dan waktu pelapisan terhadap karakteristik mikrostruktur lapisan electroless Ni-P. *Jurnal Teknologi Bahan dan Barang Teknik*. 2017 Jun 28;7(1):1–6.
17. Nurhakim B, Nikitasari A, Sunardi, **Mabruri E**,. Pengaruh suhu dan waktu pemanasan terhadap karakteristik lapisan elektroless Ni-P pada baja tahan karat martensitik Ss 420. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2017 Jul;18(4):167–72.
18. Dwi RR, Nikitasari A, Sunardi, **Mabruri E**. Pengaruh kekasaran permukaan dan kecepatan pengadukan terhadap karakteristik lapisan nirelektrik Ni-P pada baja tahan karat martensitik. *Widyariset*. 2018;4(1):21–28.
19. Lestari Y, **Mabruri E**, Syahrial AZ. Studi pelapisan komposit Ni-P-Nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan metode elektroless co-deposition. *MetalurgiMETALURGI*. 2016 Apr 30; 31(1).



20. Lestari Y, **Mabruri E**, Syahrial AZ. Studi pengaruh variasi suhu perlakuan panas terhadap strukturmikro dan korosifitas pada pelapisan Ss 410 menggunakan komposit Ni-P-Nano partikel Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2017 Apr 30;18(3):109–15.
21. Stephani A, Oediyani S, Lestari Y, **Mabruri E**. Pengaruh parameter elektro-pulsa deposisi nikel terhadap struktur mikro lapisan deposit dan laju korosi pada baja AISI 410. *Widyariset*. 2018 Nov 30;4(2):143–152.
22. Nikitasari A, Amrani DO, Zulaifa L, Prasetyo MA, Anwar MS, **Mabruri E**. The influence of coating time on corrosion resistance of Ni/Ni-SiC composite coating. Dalam *AIP Conference Proceedings*; 2020 Sep 17. 2262 (030001).
23. Rohmah M, Yunita, Anwar MS, **Mabruri E**. Pengaruh waktu pelapisan Ni dan komposit Ni/SiC terhadap kekerasan dan ketahanan abrasi AISI 410 menggunakan metode pulsa electrodeposisi. *Jurnal Metalurgi dan Material Indonesia*. 2020;3(1):13 –7.
24. Schilke PW. *Advanced gas turbine materials and coatings*. General Electric Company. 1995–2004. GER-3569G.
25. ASTM International. Chapter 2-Development of High (7-12%) chromium martensitic steels. Dalam: *High-Chromium Ferritic and Martensitic Steels for Nuclear Applications*, ed. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2001. 5–27.
26. Rusing, Wanderka N, Czubyko U, Naundorf V, Mukhreji D, Rosler J. Rhenium distribution in the matrix and near the particle–matrix interface in a model Ni–Al–Ta–Re superalloy. *Scripta Materialia* 2002; 46(3): 235–240.
27. Carron P, Khan T. Evolution of Ni-based superalloys for single crystal gas turbine blade applications. *Aerospace Science and Technology*. 1999 Des 1;3(8):513–23.
28. **Mabruri E**. Microstructural observation of the  $\gamma'$  precipitation and growth in Ta containing Ni based superalloys. *Prosiding Seminar Material Metalurgi* 2009.

29. Kracke A. Superalloys, the most successful alloy system of modern times - past, present and future. Dalam: 7th International Symposium on Superalloys 718 and Derivatives. The TMS (The Minerals, Metals and Materials Society); 2010. 13–50.
30. Dieter GE. Creep and stress rupture. Dalam: Mechanical Metallurgy, SI Metric Edition/Diadaptasi oleh David Bacon. McGraw-Hill series in Materials Science and Engineering; 1988. 432–470.
31. Nabarro FRN, deVilliers HL. The physics of creep. London: Taylor & Francis; 1995.
32. Versnyder FI, Shank ME. The development of columnar grain and single crystal high temperature materials through directional solidification. *Materials Science and Engineering*. 1970 *Okkt* 1;6(4):213–47.
33. Giamei AF. Development of single crystal superalloys: A brief history. *Advanced Materials & Processes* 2013; 171(9): 26–30.
34. **Mabruri E**. Peranan unsur refraktori di dalam nickel based superalloy: Suatu review. *Metalurgi* 2011; 26(2): 67–78.
35. Hashizume R, Yoshinari A, Kiyono T, Murata Y, Morinaga M. Development Of Ni-Based single crystal superalloys for power-generation gas turbines. Dalam: Green KA et al., editor. *Superalloys*. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society); 2004. 53–62.
36. Rae CMF, Reed RC. The precipitation of topologically close-packed phases in rhenium-containing superalloys. *Acta Materialia*. 2001 Nov 14;49(19):4113–25.
37. Dubiel B, Indyka P, Kruk A, Kalemba-Rec I, Moskalewicz T, Berent K, Gajewska M. Characterisation of TCP phases in CMSX-4 single crystal superalloy subjected to high temperature annealing and creep deformation. *Inżynieria Materiałowa*. 2016 Agu 5;4(212):150–155.
38. Sugui T, Minggang W, Tang L, Benjiang Q, Jun X. Influence of TCP phase and its morphology on creep properties of single crys-

- tal nickel-based superalloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2010 Agu 20;527 (21-22):5444–51.
39. Hobbs RA, Zhang L, Rae CMF, Tin S. TCP Suppression in a ruthenium-bearing single-crystal nickel-based superalloy. *Journal of Metals*. 2008 Juli; 60(7):37–42.
  40. Mori Y, Yokokawa T, Kobayashi T, Harada H, Suzuki S. Phase stability of nickel-base single crystal superalloys containing iridium substituting for ruthenium. *Materials Transactions*. 2016 Okt 1;57(10):1845–8.
  41. Cornish LA, Chown LH. Platinum-Bbased alloys and coatings : Materials for the Ffuture?. Dalam: Ernesto Benini, editor. *Advanced in Gas Turbine Technology*. InTech. 2011.
  42. Lasalmonie A. Intermetallics: Why is it so difficult to introduce them in gas turbine engines?. *Intermetallics*. 2006 Okt 1;14(10).
  43. Zdzislaw MC, Alejandro HR, Rafael GI. L-0 blades failure investigation of a 110 MW geothermal turbine. Dalam: *Proceedings of PWR2006, ASME Power*. 2006 Mei 2–4.
  44. Das G, Chowdhury SG, Ray AK, Das SK, Bhattacharya DK. Turbine blade failure in a thermal power plant. *Engineering Failure Analysis*. 2003 Feb 1;10(1):85–91.
  45. Lee HT, Liu FM, Hou WH. Application and characteristics of low-carbon martensitic stainless steels on turbine blades. *Materials Transactions*. 2015 Apr 1;56(4):563–9.
  46. Fan R, Gao M, May Y, Zha X, Hao X, Liu K. Effects of heat treatment and nitrogen on microstructure and mechanical properties of 1Cr12NiMo,. *Jornal of Materials Science & Technology*. 2012 Nov 1;28(11):1059–66.
  47. Zang Q, Jin Y, Zhang T, Yang Y. Effect of yttrium addition on microstructure, mechanical and corrosion properties of 20Cr13 martensitic stainless steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2020 Mar 18;27(12):451–460.

48. Lucacci G. Steels and alloys for turbine blades in ultra-supercritical power plants. Dalam: *Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants*; 2017. 175–196.
49. Seol JB, Choi JM, Kim JH. Influence of Solid Solution Treatment on the Mechanical Properties of A286 Stainless Steels. *Science Advanced Materials*. 2016 Nov;8(12):2290–94.
50. Shingledecker JP, Maziasz PJ, Evans ND, Santella ML, Pollard MJ. CF8C plus: a new high temperature austenitic casting alloy for advanced power systems. *Materials Science and Engineering for Energy Systems*. 2006 Mar;1(1):25–32.
51. Pollock TM, Argon AS. Creep resistance of CMSX-3 nickel base superalloy single crystals. *Acta Metallurgica et Materialia*. 1992 Jan;40(1):1–30.
52. Matan N, Cox DC, Rae CMF and Reed RC. On the kinetics of rafting in CMSX-4 superalloy single crystals. *Acta Materialia*. 1999 Mei 28;47(7):2031–45.
53. Walston S, Cetel A, Mackay R, Ohara K, Duhl D, Dreshfield R. Joint development of a fourth generation single crystal superalloy. Dalam: Green KA et al, editors. *Superalloys*; 2004. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society; 2004. 15–24.
54. **Mabruri E**, Hattori M, Goto N, Murata Y, Morinaga M. Interdiffusion of Alloying Elements in Ni Based Alloys. *MetalurgiMET-ALURGI*. 2009 Juli; 24(1).
55. **Mabruri E**, Hattori M, Hasuike K, Kunieda T, Murata Y, Morinaga M. Al and Re Interdiffusion in the  $\gamma$ -Phase of Ni-Al-Re System. *Materials Transactions*. 2006;47(5):1408–11.
56. Murata Y, Hattori M, **Mabruri E**, Goto N, Koyama T, Morinaga M. Diffusion Coefficients of refractory elements in multi-component Ni Alloys. *Proceeding of Materials for Advanced Power Engineering*. 2006 Jul: 561–70.
57. Murata Y, Sakurai S, **Mabruri E**, Koyama T, Morinaga M. Cross interdiffusion coefficients in nickel- and iron based ternary alloys. *Defect and Diffusion Forum* 2008; 273: 419–424.

58. **Mabruri E**, Sakurai S, Murata Y, Koyama T, Morinaga M. Diffusion of Re and Ru in the  $\gamma'$  Pphase of Ni based Alloys. *Materials Transactions*. 2008 Jun 1;49(6).
59. **Mabruri E**, Sakurai S, Murata Y, Koyama T, Morinaga M. Interdiffusion in Ni-Co-Re and Ni-Co-Ru Ssystems. *Materials Transactions*. 2007 Okt 1;48(10): 2718–23.
60. Sakurai S, **Mabruri E**, Murata Y, Koyama T, Morinaga M. Diffusion of Rrefractory elements in Ni-X-Y (X,Y: Co,Re,Ru,W) ternary alloys. *Defect and Diffusion Forum*. 2008 Feb 11;273-276:572–6.
61. **Mabruri E**. Interdifusi efektif-fungsi konsentrasi di dalam paduan terner Ni-Re-X (X=Ru,Co). *Metalurgi*. 2013 Agu 17;28(2).
62. **Mabruri E**. Pengaruh Ruthenium terhadap struktur mikro aging superalloy berbasis nikel. *Jurnal Sains Materi*. Edisi Khusus Desember 2008 Des: 88-92.
63. **Mabruri E**, Sakurai S, Murata Y, Koyama T, Morinaga M. Diffusion and  $\gamma'$  phase coarsening in ruthenium containing nickel based alloys. *Materials Transactions*. 2008;49(4):792–9.
64. Zhang JX, Murakumo T, Harada H, Koizumi Y. Dependence of creep strength on the interfacial dislocations in a fourth generation SC superalloy TMS-138. *Scripta Materialia*. 2003 Feb; 48(3):287–93.
65. Long H, Mao S, Liu Y, Zhang Z, Han X. Microstructural and compositional design of Ni-based single crystalline superalloys - A review. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018 Apr 30;743:203–20.
66. Schönbauer BM, Stanzl-Tschegg SE, Perlega A, Salzman RN, Rieger NF, Zhou S, Turnbull A, Gandy D. Fatigue life estimation of pitted 12% Cr steam turbine blade steel in different environments and at different stress ratios. *International Journal Fatigue* 2014; 65: 33–43.
67. Wu K, Ito K, Shinozaki I, Chivavibul P, Enoki M. A comparative study of localized corrosion and stress corrosion cracking of 13Cr

- martensitic stainless steel using acoustic emission and x-ray computed tomography. *Materials*. 2019 Jan;12(16): 2569.
68. Pardo A, Merino MC, Coy AE, Viejo F. Pitting corrosion behaviour of austenitic stainless steels – combining effects of Mn and Mo additions, *Corrosion Science*. 2008 Jun;50(6):1796–806.
  69. **Mabruri E**, Anwar MS, Prifiharni S, Romijarso TB, Adjiantoro B. Pengaruh Mo dan Ni terhadap struktur mikro dan kekerasan baja tahan karat martensitik 13Cr. *Majalah Metalurgi*. 2015;3:133–40.
  70. Anwar MS, Romijarso TB, **Mabruri E**. Pitting Resistance of the Modified 13Cr Martensitic Stainless Steel in Chloride Solution The Alloying Effect of Molybdenum and Nickel on The Corrosion of 13 Cr Martensitic Stainless Steel in Chloride Media. *International Journal of Electrochemical Science*. 2018; 113: 1515–1526.
  71. **Mabruri E**, Anwar MS, Prifiharni S, Romijarso TB, Adjiantoro B. Tensile properties of the modified 13Cr martensitic stainless steel. *AIP Conference Proceedings*. 2016 Apr 19;1725(1):020039.
  72. **Mabruri E**, Sujianto, Anwar MS, Romijarso TB, Adnyana DN. Comparison of strength, microstructure and corrosion resistance of stainless steels type 410 and Ttype 410-3Mo in tempered condition. *Materials Today: Proceedings*. 2019;13(1):121–6.
  73. Anwar MS, **Mabruri E**. Ketahanan aus abrasif dari beberapa jenis modifikasi 13Cr baja tahan karat martensitik. *Majalah Metalurgi*. 2015;3:149–54.
  74. Apriani AS, Anwar MS, Rusnaldy, **Mabruri E**. Peningkatan ketahanan aus pada baja tahan karat martensitik 13cr Aisi 410 setelah proses austenisasi dan tempering. *Metalurgi*. 2017;3:115–22.
  75. Anwar MS, Prifiharni S, **Mabruri E**. Optimizing heat treatment process of Fe-13Cr-3Mo-3Ni martensitic stainless of steel. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017;202, 012037.

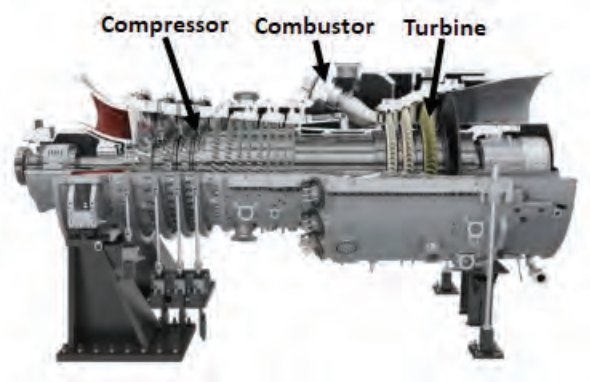
76. Dwisaputro R, Anwar MS, Rusnaldy, **Mabruri E**. Pengaruh perlakuan panas baja tahan karat martensitik aisi 410 terhadap strukturmikro dan ketahanan korosi. *Metalurgi* 2018; 33(1): 19–26.
77. Prifiharni S, Ahmad D, Juniarsih A, **Mabruri E**. Strukturmikro, kekerasan, dan ketahanan korosi baja tahan karat martensitik 13Cr3Mo3Ni hasil quench-temper dengan variasi temperatur dan waktu austenisasi. *Metalurgi*. 2017 Sep 30;32(2):83–90.
78. **Mabruri E**, Prifiharni E, Anwar MS, Romijarso TB, Adjiantoro B. Mechanical properties optimization of the modified 410 martensitic stainless steel by heat treatment process. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(7):14918–22.
79. Praguna FD, Anwar MS, Sunardi S, **Mabruri E**. Ketahanan impact, kekerasan dan strukturmikro pada baja tahan karat martensitik 13 Cr3Mo3Ni dengan variasi suhu perlakuan panas. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2018;19(3):125–30.
80. **Mabruri E**, Syahlan ZA, Sahlan, Prifiharni S, Anwar MS, Chandra SA, Romijarso TB, Adjiantoro B. Influence of austenitizing heat treatment on the properties of the tempered type 410-1Mo stainless steel. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017;202(012085).
81. Prifiharni S, Anwar MS, **Mabruri E**. Pengaruh perlakuan panas terhadap struktur mikro dan ketahanan korosi baja tahan karat martensitik 13Cr-1Mo. *Widyariset*. 2016; 2(1):9–16.
82. Mabruri E, Nikitasari A, Anwar MS, Romijarso TB, Adjiantoro B. Pengaruh suhu quenching dan suhu tempering terhadap ketahanan korosi baja martensitik modifikasi 410-3Mo3Ni untuk aplikasi sudu turbin uap. *Prosiding SENAMM X*. 2017 Nov 8:727–35.
83. **Mabruri E**, Pasaribu RR, Sugandi MT, Sunardi. Effect of high temperature tempering on the mechanical properties and microstructure of the modified 410 martensitic stainless steel. *AIP Conference Proceedings*. 2018 Mei 15;1964 (020032).
84. **Mabruri E**, Syahlan ZA, Sahlan, Anwar MS, Romijarso TB. Effect of tempering temperature on hardness and impact resistance of the 410-1Mo martensitic stainless steels for steam tur-

- bine blades. *International Journal of Engineering and Technology*. 2016;8(6):2547–51.
85. Prifiharni S, Perdana H, Romijarso TB, Adjiantoro B, Juniarsih A, **Mabruri E**. The Hardness and microstructure of the modified 13Cr steam turbine blade steel in tempered conditions. *The International Journal of Engineering and Technology*. 2017;8(6):2672–5.
  86. Perdana H, Anwar MS, Juniarsih A, **Mabruri E**. Pengaruh suhu dan waktu tempering terhadap kekerasan, struktur mikro dan laju korosi baja tahan karat martensitik 13Cr3Mo3Ni. *Metalurgi*. 2017 Apr 28;32(1):37–44.
  87. Anwar MS, Prifiharni S, **Mabruri E**. The effect of tempering temperature on pitting corrosion resistance of 420 stainless steel. *AIP Conference Proceedings*. 2016;1725, 020039.
  88. Prifiharni S, Sugandi MT, Pasaribu RR, Sunardi, **Mabruri E**. Investigation of corrosion rate on the modified 410 martensitic stainless steel in tempered condition. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019;541, 012001.
  89. Rusnaldy, **Mabruri E**, Nugroho LW. Effect of heat treatment on the stress corrosion cracking (scc) susceptibility of the 13Cr martensitic stainless steel for steam turbine blade. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;547, 012059.
  90. Anwar MS, Chandra SA, Hakim RN, Prifiharni S, **Mabruri E**. High-temperature oxidation resistance of martensitic stainless steel 13Cr3Mo3Ni-cast after heat treated. *Materials Today: Proceeding*. 2019;13(1):235–40.
  91. Anwar MS, Yulianto EJ, Chandra SA, Hakim RN, Hastuty S, **Mabruri E**. Pengaruh perlakuan panas terhadap struktur mikro, kekerasan dan ketahanan oksidasi suhu tinggi pada baja tahan karat martensitik 13Cr3Mo3Ni Cast. *Teknik*. 2019;40(1):11–17.
  92. **Mabruri E**, Sigit HM, Anwar MS, Prasetyo MA, Nikitasari A, De Fretes A. Pitting corrosion resistance of CA6NM and 410 martensitic stainless steels in various environments. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;858, 012049.

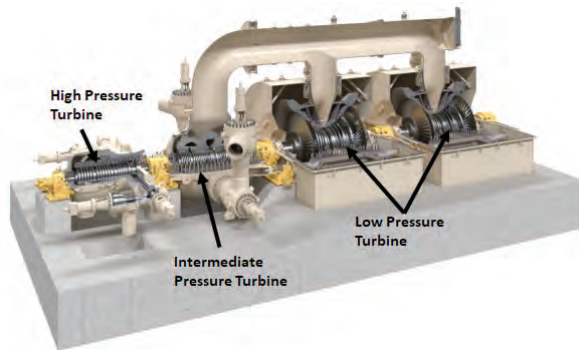


93. Nikitasari A, Prasetyo MA, Riastuti R, and **Mabruri E**. Pitting corrosion resistance of CA6NM as geothermal turbine blade material in simulated artificial geothermal brine. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019;541, 012016.
94. Prasetyo MA, Puspasari V, Anwar MS, Nikitasari A, **Mabruri E**. Mechanical properties of modified cast martensitic stainless steel CA6NM with addition of molybdenum and nitrogen. AIP Conference Proceedings. 2020;2232, 060001.
95. Aprilliansyah AT, Sunardi, Anwar MS, **Mabruri E**. Pengaruh suhu dan waktu tempering terhadap struktur mikro, kekerasan, dan ketahanan abrasif baja tahan karat martensitik Cor modifikasi Ca-15. Metal Indonesia. 2019 Jun;41(1):31–9.
96. Prifiharni S, Anwar MS, Nikitasari A, **Mabruri E**. The hardness, microstructure, and pitting resistance of austenitic stainless steel Fe25Ni15Cr with the addition of tungsten, niobium, and vanadium. AIP Conference Proceedings. 2018;1964, 020041.
97. Andrianingtyas RM, Anwar MS, Hastuty S, Widharyanti ID, Dahliyanti A, Prastomo N, **Mabruri E**. Role of tungsten, niobium, and vanadium on corrosion resistance of austenitic stainless steels in chloride ion environment. AIP Conference Proceedings. 2018;1964, 020034.
98. Anwar MS, Mulya B, Oediyani S, **Mabruri E**. Pengaruh perlakuan panas terhadap ketahanan korosi baja tahan karat austenitik Fe25Ni15Cr. Prosiding SENAMM X. 2017 Nov 8:736–41.
99. Anwar MS, Muzi, Saefudin, **Mabruri E**. Effect of heat treatment process on hardness and hot corrosion resistance of Fe-25Ni-18Cr-1Mo-2W-1Nb cast austenitic stainless steel. Materials Today: Proceeding 2021;44(3):3434–8.
100. Nugroho HZ, Anwar MS, Wiyono S, **Mabruri E**. Pengaruh pemesinan milling terhadap kekasaran permukaan baja tahan karat martensitik modifikasi AISI 410-3Mo-3Ni dan keausan material cutter end Mill. Metalurgi. 2018;3: 145 Cutter End Mill -52.

## LAMPIRAN

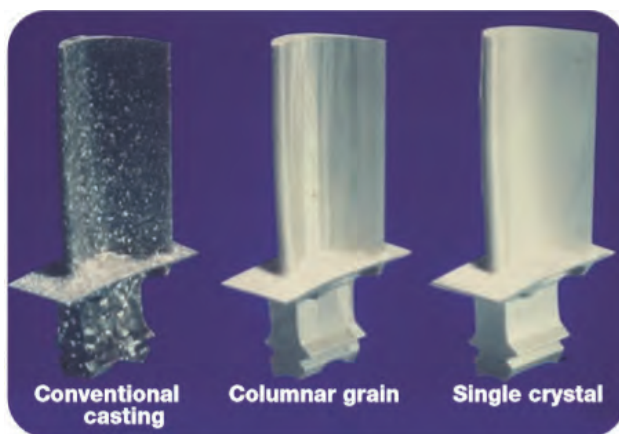


(a)



(b)

**Gambar 1.** Contoh mesin turbin (a) turbin gas Siemens SGT6-8000H dan (b) turbin uap Siemens SST-6000<sup>1</sup>.

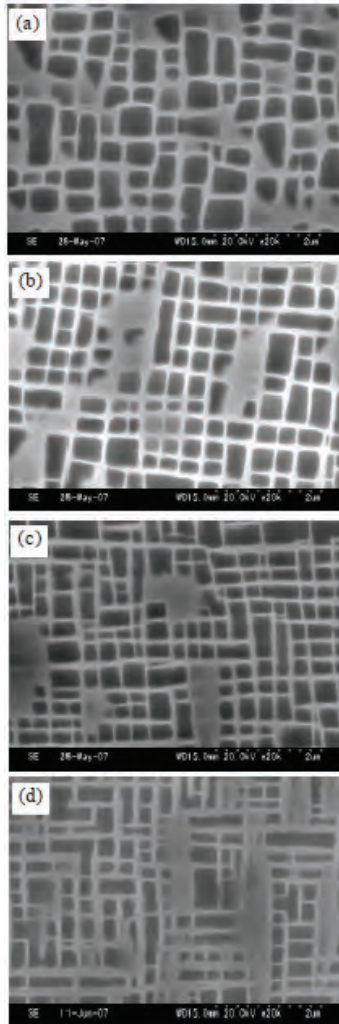


**Gambar 2.** Sudu turbin dari paduan-super berbasis nikel dengan butiran kristal tunggal, butir kolomar, dan polikristal (konvensional)<sup>33</sup>.

**Tabel 1.** Komposisi paduan-super berbasis nikel generasi baru<sup>62</sup>.

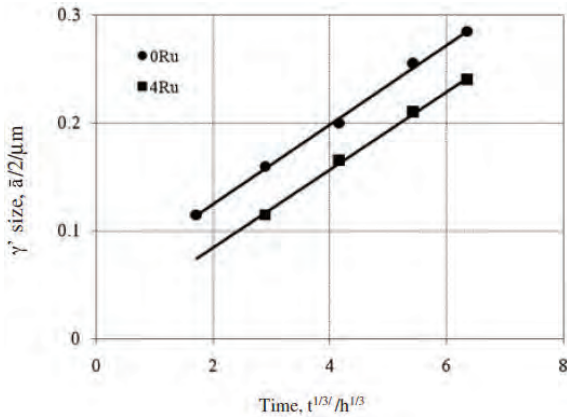
Paduan-super	Ni	Al	Cr	Co	Ta	W	Re	Ru
1	Bal.	6,48	5,20	11,43	5,04	8,44	6,66	0,00
2	Bal.	6,32	5,15	11,23	5,11	7,62	6,41	3,35
3	Bal.	5,83	5,19	11,20	4,50	8,31	6,26	6,33
4	Bal.	6,02	4,98	10,95	4,58	8,17	6,09	10,06

Keterangan : Konsentrasi unsur-unsur dikonversi dari % mol ke % berat.

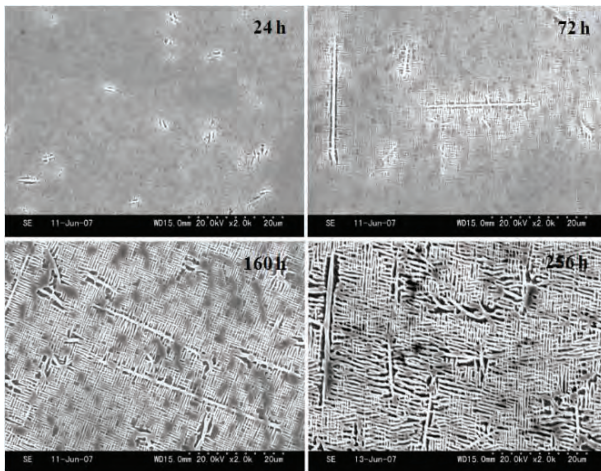


Keterangan: Konsentrasi Ru dikonversi dari % mol ke % berat.

**Gambar 3.** Struktur mikro paduan-super berbasis nikel generasi baru yang mengandung (a) 0% Ru (b) 3,35% Ru (c) 6,33% Ru dan (d) 10,06% Ru<sup>62</sup>.



**Gambar 4.** Ukuran fasa  $\gamma'$  pada paduan-super berbasis nikel tanpa Ru dan dengan kandungan 4% mol atau 6% berat Ru sebagai fungsi waktu ( $t^{1/3}$ ) pada suhu 1051°C<sup>63</sup>.



Keterangan : Konsentrasi Ru dikonversi dari % mol ke % berat.

**Gambar 5.** Pembentukan fasa berbasis RuAl pada paduan-super berbasis nikel generasi baru dengan kandungan Ru 10% berat yang dipanaskan pada suhu 1051°C selama 24, 72, 160 dan 256 jam<sup>62</sup>.

**Tabel 2.** Beberapa contoh komposisi kimia (%berat) paduan-super berbasis nikel generasi baru untuk aplikasi sudu turbin kristal tunggal (Generasi 4 - 6).

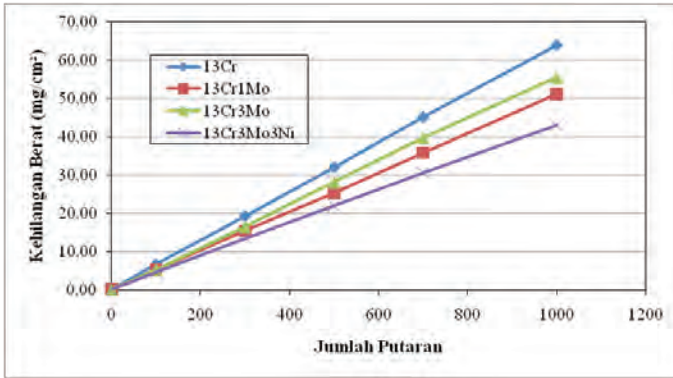
Generasi	Paduan-super	Ni	Al	Ti	Mo	Cr	Co	Ta	W	Re	Ru	Hf	Tahun Publikasi	Referensi
Generasi-4	PWA 1497	Bal.	5,5	-	2,0	2,0	16,5	8,2	6,0	5,9	3,0	0,15	2011	[65]
Generasi-5	TMS-162	Bal.	5,8	-	3,9	3,0	5,8	5,6	5,8	4,9	6,0	0,09	2008	[65]
Generasi-6	TMS-238	Bal.	5,9	-	1,1	4,6	6,5	7,6	4,0	6,4	5,0	0,1	2012	[65]
<b>Generasi Baru</b>	<b>Model Superalloy</b>	<b>Bal.</b>	<b>5,83</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>5,2</b>	<b>11,2</b>	<b>4,5</b>	<b>8,3</b>	<b>6,3</b>	<b>6,3</b>	<b>-</b>	2008	Efendi Mabruri <i>et.al</i> [62,63]

**Tabel 3.** Komposisi kimia (%berat) baja tahan karat martensitik 410 (13Cr) modifikasi<sup>69</sup>.

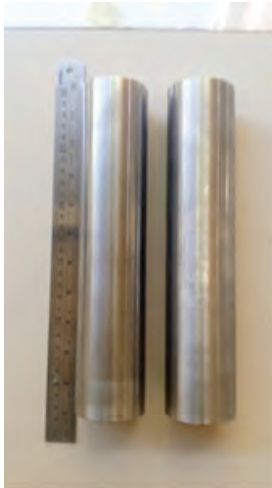
Baja 13Cr	C	S	P	Mn	Si	Cr	Mo	Ni
0Mo	0,13	0,001	0,01	1,07	0,39	13,33	0,02	0,29
1Mo	0,12	0,001	0,01	1,01	0,35	13,48	0,84	0,28
3Mo	0,14	0,001	0,01	0,99	0,31	12,94	2,64	0,29
3Mo3Ni	0,10	0,001	0,01	0,69	0,24	12,50	2,72	2,89

**Tabel 4.** Potensial sumuran (*breakdown potential*) baja tahan karat martensitik 410 (13Cr) modifikasi<sup>70</sup>.

Steel	Breakdown potential, ( $E_b$ ) (mV vs. SCE)	Protection potential, ( $E_{prot}$ ) (mV vs. SCE)
13Cr	57.34	-165.9
13Cr1Mo	77.57	-261.4
13Cr3Mo	-228.6	-312.9
13Cr3Mo3Ni	153.5	-123.8



**Gambar 6.** Ketahanan abrasi (kehilangan berat) baja tahan karat martensitic 410 (13Cr) modifikasi sampai 1000 putaran pada kertas abrasif SiC No. 120<sup>73</sup>.



**Gambar 7.** Prototipe rod baja tahan karat martensitic 410 modifikasi (13Cr3Mo3Ni).



**Gambar 8.** Prototipe sudu turbin uap dari baja tahan karat martensitik 410 modifikasi (13Cr3Mo3Ni).



## DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

### Jurnal Internasional

1. Anwar MS, Romijarso TB, **Mabruri E**. Pitting resistance of the modified 13Cr martensitic stainless steel in chloride solution . International Journal of Electrochemical Science. 2018; 13:1515–26.
2. Imaduddin A, Wicaksono MR, Saefuloh I, Herbirowo S, Yudanto SD, Nugraha H, **Mabruri E**, Darsono N, Pramono AW. The doping effects of SiC and carbon nanotubes on the manufacture of superconducting monofilament MgB2 wires. Materials Science Forum. 2019;966:249–256.
3. **Mabruri E**, Syahlan ZA, Sahlan, Anwar MS, Romijarso TB. Effect of tempering temperature on hardness and impact resistance of the 410-1Mo martensitic stainless steels for steam turbine blades. International Journal of Engineering and Technology. 2016;8(6):2547–51.
4. Prifiharni S, Perdana H, Romijarso TB, Adjiantoro B, Juniarsih A, **Mabruri E**. The hardness and microstructure of the modified 13Cr steam turbine blade steel in tempered conditions. The International Journal of Engineering and Technology. 2017;8(6):2672–5.
5. **Mabruri E**, Gede INPA. Fractographic analysis of 5052 Al-Mg alloys processed by equal channel angular pressing. Advanced Materials Research. 2014;896:621–5.
6. **Mabruri E**, Hattori M, Hasuike K, Kunieda T, Murata Y, Morinaga M. Al and Re Interdiffusion in the  $\gamma$ -Pphase of Ni-Al-Re System. Materials Transactions. 2006;47(5):1408–11.
7. **Mabruri E**, Sakurai S, Murata Y, Koyama T, Morinaga M. Diffusion and  $\gamma'$  phase coarsening in ruthenium containing nickel based alloys. Materials Transactions. 2008;49(4):792–9.

8. **Mabruri E**, Sakurai S, Murata Y, Koyama T, Morinaga M. Diffusion of Re and Ru in the  $\gamma'$  Pphase of Ni based Aalloys. *Materials Transactions*. 2008 Jun 1;49(6).
9. **Mabruri E**, Sakurai S, Murata Y, Koyama T, Morinaga M. Interdiffusion in Ni-Co-Re and Ni-Co-Ru Ssystems. *Materials Transactions*. 2007 Okt 1;48(10): 2718–23.
10. Murata Y, Kunieda T, Yamashita K, Koyama T, **Mabruri E**, Morinaga M. Diffusion and interaction of W and Re in Fe-Cr alloys. *Defect and Diffusion Forum*. 2006;258:231–6.
11. Sakurai S, **Mabruri E**, Murata Y, Koyama T, Morinaga M. Diffusion of Rrefractory elements in Ni-X-Y (X,Y: Co,Re,Ru,W) ternary alloys. *Defect and Diffusion Forum*. 2008 Feb 11;273-276:572–6.
12. Murata Y, Sakurai S, **Mabruri E**. Toshiyuki Koyama and Masahiko Morinaga: Cross interdifusion coefficients in Nickel- and iron based ternary alloys. *Defect and Diffusion Forum*. 2008;273:419–24.

### **Jurnal Nasional**

13. Puspasari V, Prasetyo MA, Halab JVT, Anwar MS, Herbirowo S, **Mabruri E**. Pengaruh annealing terhadap sifat keras dan struktur mikro baja tahan karat AISI 410-3Mo-3Ni. *Metalurgi*. 2020;35(2):75–82.
14. Prasetyo MA, Anwar MS, **Mabruri E**, Agustiningtyas DT, Noviana RC, Laksono AD. Pengaruh perlakuan panas baja tahan karat martensitik AISI 410 terhadap struktur mikro dan ketahanan korosi di lingkungan simulasi geothermal dalam larutan artificial brine. *Teknik*. 2020 Agu; 41(2):179–85.
15. Marzuki ASH, Herbirowo S, Adjiantoro B, Zulaida YM, **Mabruri E**. Studi pengaruh paduan Cr/Mo dengan waktu perendaman cryogenic treatment terhadap sifat keras, tangguh, tahan abrasif, dan struktur mikro baja Ni berbasis laterit. *Metal Indonesia*. 2020 Jun 30;42(1):20–7.

16. Rohmah M, Yunita, Anwar MS, **Mabruri E** . Pengaruh waktu pelapisan Ni dan komposit Ni/SiC terhadap kekerasan dan ketahanan abrasi AISI 410 menggunakan metode pulsa elektrodposisi. *Jurnal Metalurgi dan Material Indonesia*. 2020;3(1):13–7.
17. Anwar MS, Yulianto EJ, Chandra SA, Hakim RN, Hastuty S, **Mabruri E**. Pengaruh perlakuan panas terhadap struktur mikro, kekerasan dan ketahanan oksidasi suhu tinggi pada baja tahan karat martensitik 13Cr3Mo3Ni-Cast. *Teknik*. 2019;40(1):11–7.
18. Kevin, Anwar MS, Saefudin, Alfirano, **Mabruri E**. Pengaruh komposisi lelehan dan waktu celup terhadap struktur mikro lapisan hot dip aluminizing pada baja tahan karat martensitik. *Widyariset*. 2019;5(1):21–9.
19. Kevin M, Anwar MS, Alfirano, **Mabruri E**. Karakteristik lapisan hot dip aluminizing pada baja tahan karat martensitik 13Cr. *Met-alurgi*. 2019;34(3):151–8.
20. Aprilliansyah AT, Sunardi S, Anwar MS, **Mabruri E**. Pengaruh suhu dan waktu tempering terhadap struktur mikro, kekerasan dan ketahanan abrasif baja tahan karat martensitik Cor modifikasi Ca-15. *Metal Indonesia* 2019 Jun;41(1):29–36.
21. Nugroho HZ, Anwar MS, Wiyono S, **Mabruri E**. Pengaruh pemesinan milling terhadap kekasaran permukaan baja tahan karat martensitik modifikasi AISI Aisi 410 3Mo – 3Ni dan keausan material cutter end mill . *Metalurgi*. 2018;33(3):145–52.
22. Dwisaputro R, Anwar MS, Rusnaldy, **Mabruri E**. Pengaruh perlakuan panas baja tahan karat martensitik AISI 410 terhadap struktur mikro dan ketahanan korosi. *Metalurgi*. 2018;1:19–26.
23. Dwi RR, Nikitasari A, Sunardi, **Mabruri E**. Pengaruh kekasaran permukaan dan kecepatan pengadukan terhadap karakteristik lapisan nirelektrik Ni-P pada baja tahan karat martensitik. *Widyariset*. 2018;4(1):21–8.
24. Stephani A, Oediyani S, Lestari Y, **Mabruri E**. Pengaruh parameter elektro-pulsa deposisi nikel terhadap struktur mikro lapisan deposit dan laju korosi pada baja AISI 410. *Widyariset*. 2018 Nov 30;4(2):143–52.

25. Praguna FD, Anwar MS, Sunardi S, **Mabruri E**. Ketahanan impact, kekerasan dan strukturmikro pada baja tahan karat martensitik 13 Cr3Mo3Ni dengan variasi suhu perlakuan panas. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2018;19(3):125–30.
26. Adjiantoro B, Hasbi MY, **Mabruri E**, Yudanto SD, Ciptasari NI, Chandra SA. Optimalisasi proses pemurnian silikon tingkat metalurgi menggunakan campuran larutan asam HCl dan HF. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*. 2018 Jan 22;14(1):47–57.
27. Prifiharni S, Ahmad D, Juniarsih A, **Mabruri E**. Strukturmikro, kekerasan, dan ketahanan korosi baja tahan karat martensitik 13Cr3Mo3Ni hasil quench-temper dengan variasi temperatur dan waktu austenisasi. *Metalurgi*. 2017 Sep 30;32(2):83–90.
28. Purawiardi RI, Astawa INGP, **Mabruri E**. Analisis perbandingan parameter long-range order sebagai acuan kontrol kualitas hasil annealing pasca equal-channel angular pressing (ECAP) pada Al-5052. *Metal Indonesia* 2017;39(2):63–75.
29. Apriani AS, Anwar MS, Rusnaldy, **Mabruri E**. Peningkatan ketahanan aus pada baja tahan karat martensitik 13cr Aisi 410 setelah proses austenisasi dan tempering. *Metalurgi*. 2017;3:115–22.
30. Saputra RR, Oediyani S, Lestari Y, **Mabruri E**. Pengaruh rapat arus dan waktu pelapisan nikel pada AISI 410 Dengan Metode Pulse Electrodeposition Terhadap Struktur Mikro dan Laju Korosi. *Metalurgi*. 2017 Sep 30;32(2):77–82.
31. Nurhakim B, Nikitasari A, Sunardi, **Mabruri E**, Pengaruh suhu dan waktu pemanasan terhadap karakteristik lapisan elektroless Ni-P pada baja tahan karat martensitik SS 420. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2017;18(4):167–72.
32. Nikitasari A, **Mabruri E**. Pengaruh konsentrasi hipofosfit dan waktu pelapisan terhadap karakteristik mikrostruktur lapisan electroless Ni-P. *Jurnal Teknologi Bahan dan Barang Teknik*. 2017 Jun 28;7(1):1–6.
33. Perdana H, Anwar MS, Juniarsih A, **Mabruri E**. Pengaruh suhu dan waktu tempering terhadap kekerasan, struktur mikro dan laju

korosi baja tahan karat martensitik 13Cr3Mo3Ni. *Metalurgi*. 2017 Apr 28;32(1):37–44.

34. Lestari Y, **Mabruri E**, Syahrial AZ. Studi pengaruh variasi suhu perlakuan panas terhadap strukturmikro dan korosifitas pada pelapisan Ss 410 menggunakan komposit Ni-P-Nano Ppartikel Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2017 Apr 30;18(3):109–15.
35. Purawiardi RI, Astawa INGP, **Mabruri E**. Studi perubahan struktur kristal material hasil perlakuan equal channel angular pressing rute Bc dengan variasi jumlah pass: Studi kasus sampel aluminium paduan 5052. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2018 Mar 20;18(1):15–21.
36. Nikitasari A, Fadillah B, Oediyani S, **Mabruri E**. Polarisasi potensiodinamik baja beton di dalam larutan simulasi yang terkontaminasi air laut dan karbonat. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2016;17(4):165–71.
37. Prifiharni S, Anwar MS, **Mabruri E**. Pengaruh perlakuan panas terhadap struktur mikro dan ketahanan korosi baja tahan karat martensitik 13Cr-1Mo. *Widyariset*. 2016; 2(1):9–16.
38. Senopati G, Sutowo C, **Mabruri E**. Fenomena temper embrittlement pada baja martensitik AISI 410 untuk aplikasi stem gate valve 20” class 150 grade WCB. *Metalurgi*. 2016 Apr 30;31(1):1–6.
39. Lestari Y, **Mabruri E**, Syahrial AZ. Studi pelapisan komposit Ni-P-Nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan metode elektroless co-deposition. *Metalurgi.METALURGI*. 2016 Apr 30; 31(1).
40. Nikitasari A, Alvina F, **Mabruri E**. Studi perbandingan unjuk kerja inhibitor korosi baja beton di dalam media simulasi yang mengandung air laut dan karbonat. *Widyariset*. 2016;2(1):47–56.
41. **Mabruri E**, Anwar MS, Prifiharni S, Romijarso TB, Adjiantoro B. Pengaruh Mo dan Ni terhadap struktur mikro dan kekerasan baja tahan karat martensitik 13Cr. *Metalurgi*. 2015; 3:133–40.

42. Anwar MS, **Mabruri E**. Ketahanan aus abrasif dari beberapa jenis modifikasi 13Cr baja tahan karat martensitik. *Metalurgi*. 2015;3:149–54.
43. Anwar MS, Nikitasari A, **Mabruri E**, Sundjono S, Harsisto H. Investigasi korosi baja tulangan beton sirip dengan proteksi katodik arus tanding menggunakan anoda MMO-Ti mortar konduktif. *Metalurgi*. 2014; 29(3):255–64.
44. **Mabruri E**, Astawa INGP, Utomo EP. Studi equal channel angular pressing (ECAP) suhu nitrogen cair pada paduan Al-Mg-Si (Al 6061). *Metalurgi*. 2014;29(3):215–22.
45. Nikitasari A, Anwar MS, **Mabruri E**, Sundjono S. Evaluasi inhibitor sodium nitrit di dalam larutan beton sintesis. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2014;16(1).
46. **Mabruri E**. Interdifusi efektif-fungsi konsentrasi di dalam paduan terner Ni-Re-X (X=Ru,Co). *Metalurgi*. 2013 Agu 17;28(2).
47. **Mabruri E**, Sriyono S, Adjiantoro B, Adnyana DN. Pengaruh unsur ke-empat terhadap transformasi fasa dan efek ingat bentuk (SME) paduan Ti-Ni-Cu. *Metalurgi* 2013;28(1):49–54.
48. Akbar AY, **Mabruri E**. Kajian elektrokimia kawat *shape memory alloy* NiTi dan NiTiCu. *Korosi*. 2012;21(2):1–6.
49. **Mabruri E**, Sriyono B, Adjiantoro B, Adnyana DN. Pengaruh solution annealing dan aging pada kawat paduan shape memory Ni-Ti dan Ni-Ti-Cu. *Metalurgi*. 2012;27(2):77–84.
50. **Mabruri E**. Aplikasi severe plastic deformation (SPD) dan heavy cold rolling pada baja tahan karat austenitik 316L. *Metalurgi*. 2012;27(1):7–14.
51. Adjiantoro B, **Mabruri E**. Pengaruh waktu pelindian pada proses pemurnian silikon tingkat metalurgi menggunakan larutan HCl. *Metalurgi*. 2012;27(1):1–6.
52. Solihin, **Mabruri E**, Astawa INGP. Penguatan tembaga murni dengan teknik equal channel angular pressing. *Metalurgi*. 2011;26(3):149–52.

53. **Mabruri E.** Peranan unsur refraktori di dalam nickel based superalloy: Suatu review. *Metalurgi*. 2011;26(2): 67–78.
54. **Mabruri E.** Pembuatan magnet barium heksaferit dari oksida cold rolling mill. *Metalurgi* 2010; 25(2): 103–110.
55. Adjiantoro B, **Mabruri E.** Proses pemurnian silikon tingkat metalurgi dengan menggunakan metoda pelarutan kimia. *Metalurgi*. 2010;25(2):71–8.
56. Anwar MS, Mabruri E. Modifikasi permukaan baja tahan karat martensitik 420 dengan bahan coating yang berbeda. *Korosi*. 2010;19(1).
57. **Mabruri E,** Sriyono B, Mulyaningsih S, Solihin. Penghalusan butir titanium murni untuk aplikasi biomedis dengan teknik equal channel angular pressing. *Metalurgi*. 2010;25(1):61–9.
58. Citrawati F, **Mabruri E.** Pelapisan aluminium baja tahan karat martensitik AISI 420 melalui metode celup panas. *Metalurgi*. 2009;24(2):73–80.
59. **Mabruri E,** Hattori M, Goto N, Murata Y, Morinaga M. Interdiffusion of alloying elements in Ni based alloys. *MetalurgiMETA-LURGI*. 2009 Juli;24(1).
60. **Mabruri E.** Pengaruh Rruthenium terhadap struktur mikro aging superalloy berbasis nikel. *Jurnal Sains Materi*. Edisi Khusus Desember 2008 Des: 88–92.
61. Harini, **Mabruri E.** Elektrokodposisi komposit Ni-BN. *Metalurgi* 1998.

### **Prosiding Internasional**

62. Y Lestari, Zulfia A, Krisnaputra R, Satiti NN, Sulistiyono E, **Mabruri E.** Anti fouling coating characterization with purified Zirconia from West Kalimantan Zircon Sand for Boiler application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;858, 012046.
63. Nikitasari A, Amrani DO, Zulaifa L, Prasetyo MA, Anwar MS, **Mabruri E.** The influence of coating time on corrosion resistance

of Ni/Ni-SiC composite coating. AIP Conference Proceedings. 2020 Sep 17;2262, 030001.

64. **Mabruri E**, Sigit HM, Anwar MS, Prasetyo MA, Nikitasari A, De Fretes A. Pitting corrosion resistance of CA6NM and 410 martensitic stainless steels in various environments. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020;858, 012049.
65. Prasetyo MA, Puspasari V, Anwar MS, Nikitasari A, **Mabruri E**. Mechanical properties of modified cast martensitic stainless steel CA6NM with addition of molybdenum and nitrogen. AIP Conference Proceedings. 2020;2232, 060001.
66. Rusnaldy, **Mabruri E**, Nugroho LW. Effect of heat treatment on the stress corrosion cracking (scc) susceptibility of the 13Cr martensitic stainless steel for steam turbine blade. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019;547, 012059.
67. **Mabruri E**, Sujianto, Anwar MS, Romijarso TB, Adnyana DN. Comparison of strength, microstructure and corrosion resistance of stainless steels type 410 and type 410-3Mo in tempered condition. Materials Today: Proceedings. 2019;13(1):121–6.
68. Anwar MS, Chandra SA, Hakim RN, Prifiharni S, **Mabruri E**. High-temperature Oxidation Resistance of Martensitic Stainless Steel 13Cr3Mo3Ni-cast after Heat Treated. Materials Today: Proceeding. 2019;13(1):235–40.
69. **Mabruri E**, Prifiharni E, Anwar MS, Romijarso TB, Adjiantoro B. Mechanical properties optimization of the modified 410 martensitic stainless steel by heat treatment process. Materials Today: Proceedings. 2018;5(7):14918–22.
70. Nikitasari A, Prasetyo MA, Riastuti R, and **Mabruri E**. Pitting corrosion resistance of CA6NM as geothermal turbine blade material in simulated artificial geothermal brine. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019;541, 012016.
71. Prifiharni S, Sugandi MT, Pasaribu RR, Sunardi, **Mabruri E**. Investigation of corrosion rate on the modified 410 martensitic stainless steel in tempered condition. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019;541, 012001.



72. **Mabruri E**, Pasaribu RR, Sugandi MT, Sunardi. Effect of high temperature tempering on the mechanical properties and microstructure of the modified 410 martensitic stainless steel. AIP Conference Proceedings. 2018 Mei 15;1964 (020032).
73. Prifiharni S, Anwar MS, Nikitasari A, **Mabruri E**. The hardness, microstructure, and pitting resistance of austenitic stainless steel Fe25Ni15Cr with the addition of tungsten, niobium, and vanadium. AIP Conference Proceedings 2018; 1964(020041).
74. Andrianingtyas RM, Anwar MS, Hastuty S, Widharyanti ID, Dahliyanti A, Prastomo N, **Mabruri E**. Role of Tungsten, Niobium, and Vanadium on corrosion resistance of austenitic stainless steels in chloride ion environment. AIP Conference Proceedings. 2018;1964, 020034.
75. Anwar MS, Fadillah B, Nikitasari A, Oediyani S, **Mabruri E**. Study of pitting resistance of rebar steels in Jakarta coastal using simulated concrete pore solution. Procedia Engineering. 2017;171:517–25.
76. Anwar MS, Prifiharni S, **Mabruri E**. Optimizing heat treatment process of Fe-13Cr-3Mo-3Ni martensitic stainless of steel. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017;202, 012037.
77. **Mabruri E**, Syahlan ZA, Sahlan, Prifiharni S, Anwar MS, Chandra SA, Romijarso TB, Adjiantoro B. Influence of austenitizing heat treatment on the properties of the tempered type 410-1Mo stainless steel. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017;202(012085).
78. **Mabruri E**, Anwar MS, Prifiharni S, Romijarso TB, Adjiantoro B. Tensile properties of the modified 13Cr martensitic stainless steel. AIP Conference Proceedings 2016: 1725, 020039.
79. Anwar MS, Prifiharni S, **Mabruri E**. The Effect of tempering temperature on pitting corrosion resistance of 420 stainless steel. AIP Conference Proceedings. 2016 Apr 19;1725(1), 020039.

80. Nikitasari A, **Mabruri E**. Study of Eelectroless Ni-W-P alloy coating on martensitic stainless steel. AIP Conference Proceedings. 2016 Apr 19;1725 (020039).
81. Nikitasari A, **Mabruri E**. Investigation of corrosion protection of rebar steel using organic inhibitor in simulated pore solution. Proceeding of the 2nd International Conference on Materials and Metallurgical Technology (ICOMMET). 2015:26–33.
82. Anwar MS, **Mabruri E**. Corrosion behaviour of cathodically protected rebars steel in simulated concrete pore solution. Proceeding of the 2nd International Conference on Materials and Metallurgical Technology. 2015:89-94.
83. **Mabruri E**, Sriyono B, Adjiantoro B, Adnyana DN. Influence of Ni content on the microstructure of heat treated Ti-Ni-Cu shape memory alloys. Proceedings of International Conference on Physics and Its Applications (ICOPIA). 2012.
84. **Mabruri E**, Sriyono B, Adjiantoro B, Adnyana DN. Shape memory characteristics of Ni-Ti-Cu and Ni-Ti-Cu-Fe alloys. Proceeding of the 3rd International Seminar on Applied Technology, Science and Arts (APTECS). 2011 Des 6:341 –6.
85. Akbar AY, **Mabruri E**. Electrochemical behaviour of NiTiCu shape memory alloy wires in ringer solution. Proceeding of the 3rd International Seminar on Applied Technology. Science and Arts (APTECS). 2011:341-6.
86. **Mabruri E**, Sriyono B, Adjiantoro B, Adnyana DN. Phase identification and microstructure of Ni-Ti-Cu and Ni<sub>35</sub>Ti<sub>50</sub>Cu<sub>10</sub>X<sub>5</sub> (X= Fe, Sn, Cr, Nb, Co, Mo) shape memory alloys. Proc. The 12th International Conference on QiR (Quality in Research). 2011.
87. Murata Y, Hattori M, **Mabruri E**, Goto N, Koyama T, Morinaga M. Diffusion coefficients of refractory elements in multi-component Ni Aalloys. Proceeding of Materials for Advanced Power Engineering. 2006 Jul: 561–70.

## Prosiding Nasional

88. **Mabruri E**, Nikitasari A, Anwar MS, Romijarso TB. Pengaruh suhu quenching dan suhu tempering terhadap ketahanan korosi baja martensitik modifikasi 410-3Mo3Ni untuk aplikasi sudu turbin uap. Prosiding SENAMM X. 2017 Nov 8:727–35.
89. Anwar MS, Mulya B, Oediyani S, **Mabruri E**. Pengaruh perlakuan panas terhadap ketahanan korosi baja tahan karat austenitik Fe25Ni15Cr. Prosiding SENAMM X. 2017 Nov 8:736–41.
90. Romijarso TB, Adjiantoro B, **Efendi**. Pengaruh proses pembentukan terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja tahan karat martensitik. Prosiding SENAMM X. 2017 Nov 8:656–66 .
91. Prifiharni S, Anwar MS, **Mabruri E**. Pengaruh austenisasi dan temperisasi terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja tahan karat 420. Prosiding SENAMM VIII. 2015 Nov 5:101–4.
92. Ciptasari NI, Nikitasari A, **Mabruri E**. Pengaruh ion karbonat dan nitrit di dalam larutan beton simulasi yang terkontaminasi air laut. Prosiding SENAMM VIII. 2015 Nov 5:203–8.
93. Nikitasari A, Anwar MS, **Mabruri E**, Sundjono. Pengaruh sodium nitrit sebagai inhibitor korosi baja tulangan beton di dalam larutan beton buatan pH 7 yang terkontaminasi klorida. Prosiding Seminar Material Metalurgi .2014: 63–70.
94. Utomo EP, Astawa INGP, **Mabruri E**. Pengaruh kondisi awal sampel dan rute deformasi ECAP terhadap kekerasan dan struktur mikro pelat aluminium 6061. Prosiding Seminar Material Metalurgi. 2014: 141–144.
95. Utomo EP, Astawa INGP, **Mabruri E**. Pengaruh ECAP terhadap kekerasan paduan aging aluminium 6061. Prosiding Seminar Material Metalurgi. 2013 Des 27:251–5.
96. Kartika I, Astawa INGP, **Mabruri E**. Formasi sub-butir equiaxed dengan equal channel angular pressing dalam paduan Al-5052 hasil aniling. Prosiding Seminar Material Metalurgi. 2012 Nov 27:139–48.

97. **Mabruri E**, Sriyono B, Adjiantoro B, Adnyana DN. Shape memory effect dua arah paduan berbasis Ni-Ti. Prosiding Seminar Nasional TEKNOIN. 2011 Nov 19:E41–E44.
98. **Mabruri E**, Sriyono B, Adjiantoro B, Adnyana DN. Sifat mekanik dan shape memory effect paduan Ni-Ti dan Ni-Ti-Cu. Prosiding Seminar Material Metalurgi. 2011 Des 20:401–4.
99. Arie Y.A., **Mabruri E**: Corrosion behaviour of NiTi shape memory alloy wire. Prosiding Seminar Material Metalurgi. 2011 Des 20:495–500.
100. Ridlo MR, Oemry A, Silistiyono E, **Mabruri E**, Himawan R, Suhendi A. Preparasi dan karakterisasi 0-3 PZT/Polimer. Prosiding Seminar Material Metalurgi. 2011 Des 20:397–400.
- 101... Okt 20-21 **Mabruri E**. Asesmen perilaku interdifusi efektif-fungsi konsentrasi di dalam paduan nikel superalloy. Prosiding Seminar Nasional Fisika. 2011:152–9.
102. **Mabruri E**, Sriyono B, Adjiantoro B, Adnyana DN. Fabrikasi kawat shape memory alloy Ni-Ti skala laboratorium. Prosiding Seminar Material Metalurgi 2010 Des 14:125–32.
103. **Mabruri E**, Anwar MS. Kombinasi pelapisan krom dan nitriding suhu tinggi pada martensitic stainless steel AISI 420. Prosiding Seminar Material Metalurgi. 2010 Des 14:255–60.
104. Ridlo MR, Prasetyo D, **Mabruri E**. Sintesis serbuk nano PZT menggunakan sol gel termodifikasi. Prosiding Seminar Material Metalurgi. 2010 Des 14:133–6.
105. **Mabruri E**, Sriyono B, Mulyaningsih S, Solihin. Pemrosesan CP-Ti struktur ultra halus dengan deformasi sangat plastis menggunakan teknik equal channel angular pressing (ECAP). Prosiding Seminar Material Metalurgi. 2009.
106. **Mabruri E**. Microstructural observation of the  $\gamma'$  precipitation and growth in ta containing Ni based superalloys. Prosiding Seminar Material Metalurgi. 2009.

107. Sutowo C, Priyono P, Yuswono, **Mabruri E**, Romijarso TB, Citrawati F. Analisa kegagalan komponen boom top pada hydraulic excavator. Prosiding Seminar Material Metalurgi. 2009.
108. **Mabruri E**, Astawa INGP, Romijarso TB., Priyono B. Kegagalan fatik sudu turbin pada sistim turbocharger. Prosiding Seminar Metalurgi Nasional, 2003.
109. **Mabruri E**, Priyono B, Yusuf. Kegagalan korosi-fatik tabung HP evaporator pada heat recovery steam generator. Prosiding Seminar Metalurgi Nasional. 2003.
110. **Mabruri E**, Saefudin, Lukman. Kegagalan exhaust manifold pada turbocharger oleh korosi panas dan oksidasi suhu tinggi. Prosiding Seminar Material. 1997:181–8.
111. **Mabruri E**, Adjiantoro B, Lukman. Analisa kegagalan roda gigi pada pompa HOCIPO. Pros. Seminar Material 1997: 211–20.
112. **Mabruri E**, Mulyaningsih S, Sugandi. Peningkatan sifat mekanik baja karbon ultra rendah dengan nitrokarburising di dalam tungku fluidized bed. Prosiding Seminar Material. 1999:196–202.

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP

### A. Data Pribadi

Nama	: Dr. Efendi, S.T., M.T.
Tempat, Tanggal Lahir	: Cirebon, 5 Januari 1970
Anak ke	: 7 dari 7 Bersaudara
Jenis Kelamin	: Laki-laki
Nama Ayah Kandung	: Mabruri
Nama Ibu Kandung	: Rutami
Nama Istri	: Heppi Dewayani, S.Si.
Jumlah Anak	: 8 Orang
Nama Anak	: 1. Imam Ali Muthahhari, S.Tr.T. 2. Yumna Salma Azzahra 3. Mujaddid Izhharulhaq 4. Aliyuddin Muhammad 5. Qonita Fillah Muwaffaqoh 6. M. Izhharuddin AlFalah 7. Abbad Prawira Madani 8. Ahmad Ash-Shiddiq Fathuddin
Nama Instansi	: Pusat Penelitian Metalurgi dan Material, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)
Judul Orasi	: Desain Paduan Logam untuk Komponen Turbin Pembangkit Listrik
Bidang Keahlian	: Metalurgi dan Material
No. SK Pangkat Terakhir	: 1095/Kep/J.3-c/2014
No. SK Peneliti Ahli Utama	: 11/M TAHUN 2019

## B. Pendidikan Formal

No.	Jenjang	Nama Sekolah/PT/ Universitas	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
1	SD	SD Suradinaya	Cirebon	1982
2	SLTP	SMPN 5	Cirebon	1985
3	SLTA	SMAN 2	Cirebon	1988
4	S-1	Institut Teknologi Bandung	Bandung	1995
5	S-2	Institut Teknologi Bandung	Bandung	2002
6	S-3	Nagoya University	Nagoya/Jepang	2008

## C. Pendidikan Nonformal

No.	Nama Pelatihan/Pendi- dikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
1	Pelatihan SEM dan XRD	LIPI/Bandung	1998
2	Heat Treatment Training Course	JICA/Nagoya/Jepang	1999
3	Asesor ISO 17025	BSN/Jakarta	2009
4	Diklat PIM III	LIPI/Bogor	2010
5	Leadership Development Program	LIPI/Jakarta-Bandung	2014
6	Reviewer Penelitian	Kemenristekdikti/ Tangerang Selatan	2019

## D. Jabatan Struktural

No.	Jabatan/Pekerjaan	Nama Instansi	Tahun
1	Kepala Bidang Sarana Penelitian	Pusat Penelitian Metalurgi	2009–2010
2	Kepala Bidang Konservasi Bahan	Pusat Penelitian Metalurgi	2010–2014

### E. Jabatan Fungsional

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1	Ajun Peneliti Muda	01-11-2002
2	Peneliti Muda	01-01-2009
3	Peneliti Madya	01-11-2013
4	Peneliti Ahli Utama	01-05-2019

### F. Penugasan Khusus Nasional/Internasional

No.	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun

### G. Keikutsertaan dalam Kegiatan Ilmiah

No.	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
1	International Conference on Advanced Materials for Better Future	Pemakalah	Surakarta	2019
2	International Seminar on Metallurgy and Materials	Pembicara Kunci	Tangerang Selatan	2018
3	International Conference on Advanced Materials Science and Technology	Pemakalah	Semarang	2018
3	International Seminar on Metallurgy and Materials	Pemakalah	Jakarta	2017
4	International Conference on Applied Physics and Materials Applications	Pemakalah	Thailand	2017



5	Seminar Nasional Meta- lurgi dan Material X	Pemakalah	Semarang	2017
6	International Con- ference on Advanced Materials Science and Technology	Pemakalah	Malang	2016
7	International Confer- ence on Mechanical Engineering	Pemakalah	Yogyakarta	2016
8	International Con- ference on Advanced Materials Science and Technology	Pemakalah	Semarang	2015
9	International Confer- ence on Materials and Metallurgical Technol- ogy	Pemakalah	Surabaya	2015
10	Seminar Material Met- alurgi	Pembicara Kunci	Jakarta	2015
11	International Con- ference on Advanced Materials Science and Technology	Pemakalah	Yogyakarta	2014
12	International Confer- ence on Physics and Its Applications	Pemakalah	Surakarta	2012
13	International Seminar on Applied Technology, Science, and Arts (3rd APTECS)	Pemakalah	Surabaya	2011
14	The 12th International Conference on QiR (Quality in Research	Pemakalah	Bali	2011

15	Seminar Nasional Besi dan Baja (SNBB)	Pemakalah	Bandung	2011
16	Seminar Material Metalurgi	Pemakalah	Tangerang Selatan	2011
17	Seminar Nasional Fisika	Pemakalah	Tangerang Selatan	2011
18	Seminar Nasional TEKNOIN	Pemakalah	Yogyakarta	2011
19	Seminar Material Metalurgi	Pemakalah	Tangerang Selatan	2010
20	Seminar Material Metalurgi	Pemakalah	Tangerang Selatan	2009

## H. Keterlibatan dalam Pengelolaan Jurnal Ilmiah

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/Tugas	Tahun
1	Journal of Mechanical Engineering Education	Universitas Pendidikan Indonesia	Reviewer	2019– Sekarang
2	Metal Indonesia	BBLM-Kemenperin	Reviewer	2017– Sekarang
3	Indonesian Journal of Applied Physics	Universitas Negeri Sebelas Maret	Reviewer	2012– Sekarang
4	Jurnal Makara	Universitas Indonesia	Reviewer	2012– Sekarang
5	Korosi	P2M-LIPI	Ketua Dewan Redaksi	2010–2012
6	Metalurgi	P2M-LIPI	Anggota Dewan Redaksi	2009–2010

## I. Karya Tulis Ilmiah

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1	Penulis Tunggal	6
2	Bersama Penulis Lainnya	106
	Total	112

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1	Bahasa Indonesia	74
2	Bahasa Inggris	38
		112

## J. Pembinaan Kader Ilmiah

Pejabat Fungsional Peneliti

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1	Mukhlis Agung Prasetyo,S.T.	P2MM-LI-PI	Koordinator Kelompok Penelitian	2018–Sekarang
2	Moch. Syaiful Anwar, S.T.,M.Si.	P2MM-LI-PI	Koordinator Kelompok Penelitian	2014–Sekarang
3	Siska Prifihar-ni,S.T.	P2MM-LI-PI	Koordinator Kelompok Penelitian	2015–2019
4	Arini Niki-tasari,S.T.	P2MM-LI-PI	Koordinator Kelompok Penelitian	2014–2020

## Mahasiswa

No.	Nama	PT/Universitas	Peran/ Tugas	Tahun
1	Toni Bambang Romijarso, S.T., M.T.	Universitas Indonesia	Ko-Promotor S3	2020– Sekarang
2	Moch. Syaiful Anwar, S.T.,M.T.	Universitas Indonesia	Ko-Promotor S3	2019– Sekarang
3	Yulinda Lestari, S.T.,M.T	Universitas Indonesia	Ko-Promotor S3	2017– Sekarang
4	Arini Nikitasari, S.T.	Universitas Indonesia	Pembimbing 2 (S2)	2018– 2019
5	Sujianto	Institut Sain dan Teknologi Nasional	Pembimbing 2 (S2)	2017
6	Yulinda Lestari, S.T.,M.T	Universitas Indonesia	Pembimbing 2 (S2)	2014– 2015
7	I Nyoman Gede P.A., S.T.	Universitas Indonesia	Pembimbing 2 (S2)	2014– 2015
8	Wuri Handayani	Institut Teknologi dan Sain Bandung	Pembimbing 2 (S1)	2020
9	Andhivayana Febri Dermawan	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2019– 2020
10	Dinta Pratiwi	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2019– 2020
11	Prasetyo Adi Gunawan Puro Utomo	Sekolah Tinggi Teknologi PLN	Pembimbing 2 (S1)	2020
12	Joy Nicholas Sitanggang	Sekolah Tinggi Teknologi PLN	Pembimbing 2 (S1)	2020
13	Hezekiel Marchiano Sigit	Universitas Atmajaya	Pembimbing 2 (S1)	2018– 2019

14	Hana Rochman	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2018– 2019
15	Eggy Putra Pratama	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2018– 2019
16	Bagas Gardhawi Apriliasno	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2018– 2019
17	Irwan Riyana Pamungkas	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2018
18	Rahmat Ramadhan Pasariibu	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2017
19	Tri Sugandi	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2017
20	Ade Trya Aprilliansyah	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2017– 2018
21	Mikhael Kevin	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2017– 2018
22	Hady Zhakwan Nugroho	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2017
23	Franco Dwiky Praguna	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2017
24	Barri Karizki	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2017
25	Kevin	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2017
26	Berli Mulia	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2017
27	Luky Widianto Nugroho	Universitas Diponegoro	Pembimbing 2 (S1)	2017
28	Rizky Dwi Saputra	Universitas Diponegoro	Pembimbing 2 (S1)	2017

29	Annisa Siti Apriani	Universitas Diponegoro	Pembimbing 2 (S1)	2017
30	Muhammad Rofi	Universitas Diponegoro	Pembimbing 2 (S1)	2017
31	Rivaldo Ramadhana Saputra	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2016
32	Rafi Dwi Rachmani	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2016
33	Hadi Perdana	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2016
34	Deni Ahmad	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2016– 2017
35	Bahtiar Nurhakim	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2016
36	Agnes Stephani	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2016
37	Faty Alvina	Universitas Sultan Ageung Tirtayasa	Pembimbing 2 (S1)	2016

## K. Organisasi Profesi Ilmiah

No.	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1	Anggota	Asosiasi Profesi Metalurgi Indonesia	2021– Sekarang
2	Anggota	Himpunan Peneliti Indonesia	2019– Sekarang
3	Anggota	Japan Institute of Metals	2005–2008

## **L. Tanda Penghargaan**

<b>No.</b>	<b>Nama Penghargaan</b>	<b>Pemberi Penghargaan</b>	<b>Tahun</b>
1	Satyalancana Karya Satya XX Tahun	Presiden Republik Indonesia	2017
2	Satyalancana Karya Satya X Tahun	Presiden Republik Indonesia	2008



## LIPI Press

Gedung PDDI LIPI, Lantai 6  
Jln. Jend. Gatot Subroto 10, Jakarta 12710  
Telp. (+62 21) 573 3465  
E-mail: [press@mail.lipi.go.id](mailto:press@mail.lipi.go.id)  
Website: [lipipress.lipi.go.id](http://lipipress.lipi.go.id)



Buku ini tidak diperjualbelikan.