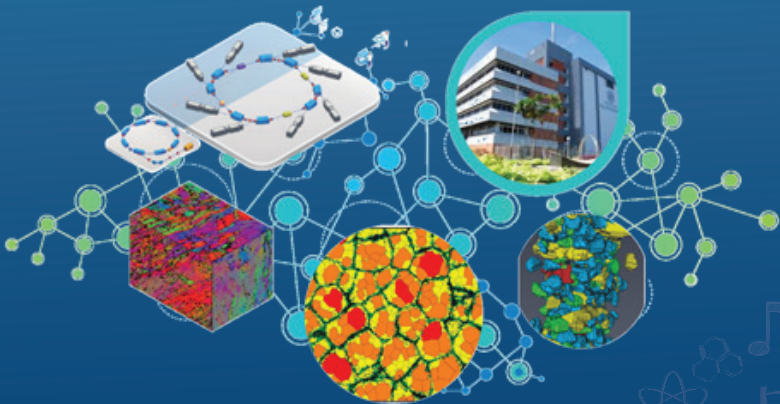




TEKNOLOGI NUKLIR DALAM PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PROSES LOGAM NANOSTRUKTUR

ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
BIDANG LOGAM, PADUAN DAN
INTERMETALIK



OLEH:
MUHAMMAD RIFAI

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

**TEKNOLOGI NUKLIR DALAM
PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PROSES
LOGAM NANOSTRUKTUR**

**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
BIDANG LOGAM, PADUAN DAN
INTERMETALIK**

Diterbitkan pertama pada 2024 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



**TEKNOLOGI NUKLIR DALAM
PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PROSES
LOGAM NANOSTRUKTUR**

**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
BIDANG LOGAM, PADUAN DAN
INTERMETALIK**

OLEH:

MUHAMMAD RIFAI

Reviewer:

Prof. Dr. Ismeth Inounu, M.S.

Prof. Dr. drh. Herdis, M.Si.

Prof. Dr. Ir. Jakaria, S.Pt.,M.Si.

Penerbit BRIN

Buku ini tidak untuk diperjualbelikan

© 2024 Badan Riset dan Inovasi Nasional
Kedepuitan Bidang Sumber Daya Manusia Iptek

Katalog dalam Terbitan (KDT)
Teknologi Nuklir dalam Pengembangan Teknologi Proses Logam Nanostruktur/Muhammad
Rifai-Jakarta: Penerbit BRIN, 2024.

ix + 100 hlm.; 14,8 x 21 cm

- | | |
|-----------------|---------------------|
| 1. Nanostruktur | 2. Deformasi |
| 3. Texture | 4. Hamburan neutron |




XXXXX

Copy editor : Asyifa Aulia Rahma
Proofreader : Hilda Yunita & Martin Herlimiawan
Penata Isi : Hilda Yunita
Desainer Sampul : Hilda Yunita

Edisi pertama : Juli 2024

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B. J. Habibie, Jl. M. H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: +62 811-1064-6770
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id



 penerbitBRIN
 Penerbit_BRIN
 penerbit.brin

Buku ini tidak untuk diperjualbelikan

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	V
DAFTAR GAMBAR	VII
BIODATA RINGKAS	1
PRAKATA PENGUKUHAN	5
I. PENDAHULUAN	7
II. PERKEMBANGAN RISET DAN INOVASI LOGAM NANOSTRUKTUR.....	13
2.1. Logam Nanostruktur.....	13
2.2. Pemanfaatan Teknik Nuklir (Hamburan Neutron dan Sinar-X <i>Synchrotron</i>) dalam Karakterisasi Logam Nanostruktur	26
III. RISET LOGAM NANOSTRUKTUR DI INDONESIA DENGAN KARAKTERISASI TEKNIK NUKLIR.....	35
IV. PEMANFAATAN TEKNIK NUKLIR UNTUK INOVASI LOGAM NANOSTRUKTUR DI INDONESIA	41
V. KESIMPULAN.....	47
VI. PENUTUP.....	49
VII. UCAPAN TERIMA KASIH	51
DAFTAR PUSTAKA.....	55
LAMPIRAN.....	67
DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH.....	75
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	83

Buku ini tidak untuk diperjualbelikan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Konsep “ <i>top-down</i> ” dan “ <i>bottom-up</i> ” pengembangan logam berbasis nanostruktur (Abid <i>et al.</i> , 2022).	67
Gambar 2.	Konsep logam berbasis <i>Harmonic Structure</i> (Sharma <i>et al.</i> , 2020).....	67
Gambar 3.	Konsep <i>bulk nanostructured</i> metal yang memiliki sifat unik (Tsuji <i>et al.</i> , 2019).	68
Gambar 4.	Mikrostruktur dari (a) <i>homogeneous structure</i> ; (b) <i>harmonic structure</i> ; dan hasil (c) uji tarik serta (d) <i>strain hardening curve</i> dari logam nikel murni berbasis <i>Harmonic Structure</i> dan <i>Homogenous Structure</i> (Ameyama <i>et al.</i> , 2022a).....	68
Gambar 5.	Hasil observasi EBSD untuk <i>homogeneous structure</i> dan <i>harmonic structure</i> (a,b) mikrostruktur; (c,d) distribusi ukuran butir dan (e,f) distribusi sudut misorientasi yang telah proses <i>sintering</i> (Sharma <i>et al.</i> , 2020).	69
Gambar 6.	(a) Mikrostruktur dan (b) kekuatan dan keuletan dari spesimen <i>Harmonic Structure-SUS316L</i> (Ameyama <i>et al.</i> , 2010).	69
Gambar 7.	(a) Kurva regangan–tegangan baja IF (<i>Interstitial Free low carbon</i>) dengan berbagai ukuran butir rata-rata yang berkisar dari 0.4 μm hingga 5.3 μm dengan teknik ARB. (b) Peta orientasi dengan EBSD menunjukkan mikrostruktur dengan orientasi kristalografi sejajar <i>rolling direction</i> (RD) (Tsuji <i>et al.</i> , 2019).....	70
Gambar 8.	Hasil penampakan permukaan specimen butiran kasar (<i>coarse</i>) dan halus (<i>ultra-fine immersion test</i>) di dalam larutan NaCl 0.6 mol/L dengan waktu yang berbeda (Rifai <i>et al.</i> , 2018b).....	70
Gambar 9.	(a) <i>Skema die</i> of TCP dan (b) hasil uji tarik sampel TCP untuk 1 dan 4 pass TCP (Farshidi <i>et al.</i> , 2023).	71

Gambar 10.	Skema dari proses <i>accumulative roll bonding</i> (ARB); (b) ukuran butir ARB; dan (c) perilaku sifat korosi setelah proses ARB (Purnamasari <i>et al.</i> , 2021).....	71
Gambar 11.	(a) struktur sebelum SSE <i>process</i> ; (b) (1) 1 <i>pass</i> ; (2) 4 <i>pass</i> ; (3) 8 <i>pass</i> dan (4) 12 <i>pass</i> SSE <i>process</i> ; (c) dislokasi di dalam butir dan batas butir; (d) kurva <i>anodic polarization</i> ; (e) pengaruh nomor <i>pass</i> pada arus korosi (Rifai <i>et al.</i> , 2022).....	72
Gambar 12.	Pemanfaatan logam nanostruktur untuk in-aktivasi virus COVID-19 (Rifai <i>et al.</i> , 2021).	72
Gambar 13.	Hasil <i>pole figure</i> dari logam tembaga berbasis nanostruktur yang dikarakterisasi dengan hamburan neutron (Muslih <i>et al.</i> , 2022).....	73
Gambar 14.	(a) hasil uji tarik antara sampel dengan <i>harmonic structure</i> dan <i>homogeneous structure</i> ; (b) skema kerja dari karakterisasi DCT dengan <i>ultra-bright synchrotron</i> ; (c) EBSD analisis dari logam berbaja berbasis <i>harmonic structure</i> ; dan (d) <i>homogenous structure</i> ; (e) hasil DCT dari sampel dengan <i>harmonic structure</i> dan <i>homogeneous structure</i> dan (f) kerapatan dislokasi (Nakai <i>et al.</i> , 2023).74	

BIODATA RINGKAS



Muhammad Rifai, lahir di Yogyakarta, 22 Oktober 1980 adalah anak pertama dari pasangan Muhammad Taufik dan Sri Sumarsih. Menikah dengan drg. Selli Reviona dan dikaruniai dua orang anak kembar, yaitu Muhammad Rafa dan Muhammad Razzaq.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 2/M Tahun 2023 tanggal 9 Januari 2023 yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama di lingkungan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) terhitung mulai tanggal 25 Januari 2023.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional (*to be announced*) tentang Pembentukan Majelis Pengukuhan Profesor Riset, yang bersangkutan dapat melakukan orasi Pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Muhammadiyah Sukonandi tahun 1992, Sekolah Menengah Pertama Negeri 6 Yogyakarta tahun 1995, dan Sekolah Menengah Umum Negeri 4 Yogyakarta tahun 1998. Memperoleh gelar Sarjana Sains dari Fisika MIPA, Universitas Gadjah Mada (UGM) tahun 2002; gelar *Master of Engineering (M.Eng)* di bidang ilmu bahan dan teknik dari *Ritsumeikan University* tahun 2011, dengan topik tesis *Deformation and fracture behavior of austenitic stainless steel*

powder compacts with Bi-modal Microstructure; dan gelar *Doctor (Dr.)* di bidang *Mechanical and System Engineering* dari *Doshisha University*, Jepang pada tahun 2015 dengan topik disertasi *Mechanical and corrosion properties of ultrafine-grained low C, N Fe-20%Cr steel produced by equal channel angular pressing*.

Mengikuti beberapa pelatihan dan pendidikan nonformal yang terkait dengan kompetensi di bidang teknik nuklir dan ilmu bahan, antara lain *Post-doctoral program at Mechanical and System Engineering, Doshisha University*, Jepang mengenai *bulk nanostructured metal* (tahun 2016-2018); *International workshop on giant straining process for advanced materials* di Jepang (tahun 2016); dan *Program Research and Innovation in Science and Technology Project (RISET-Pro)* tentang pemanfaatan logam berbasis nanostruktur untuk pencegahan penyebaran COVID-19 dengan karakterisasi teknik nuklir. (tahun 2019 dan 2020).

Sejak tahun 2002 hingga 2023 telah mengikuti banyak kegiatan yang diselenggarakan oleh *Japan Atomic Energy Research Institute, Asia-Oceania Neutron Scattering Association, Japan Institute Metal, Iron and Steel Institute of Japan* dan lainnya untuk *training course, scientific visit, dan consultancy meeting*. Sebagai pembicara dan undangan terkait fasilitas maupun aplikasi karakterisasi teknik nuklir untuk penelitian material logam pada konferensi internasional di Thailand, Jepang, Perancis, Italia, Amerika dan Australia, serta beberapa

konferensi ilmiah lainnya di dalam dan luar negeri.

Sedang menduduki jabatan struktural sebagai Kepala Pusat Riset Teknologi Akselerator 2022 - sekarang. Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Peneliti Muda golongan III/d tahun 2019, Peneliti Madya golongan IV/a tahun 2020, dan Peneliti Ahli Utama golongan IV/c bidang Logam dan Paduan tahun 2023 dengan Scopus h-index mencapai nilai 8 (April 2024). Menghasilkan 51 karya tulis ilmiah (KTI), baik yang ditulis sendiri maupun bersama penulis lain dalam bentuk jurnal dan prosiding. Sebanyak 50 dari 51 KTI ditulis dalam bahasa Inggris.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing jabatan fungsional peneliti di Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) dan research assistant di Doshisha University, Jepang, serta pembimbing dan penguji skripsi di lembaga pendidikan di Indonesia dan Jepang. Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, yaitu sebagai anggota di Himpunan Peneliti Indonesia (HIMPENINDO), Perhimpunan Periset Indonesia (PPI), *Japan Atomic Energy Research Institute*, *Asia-Oceania Neutron Association*, *Japan Institute of Metals*, *Iron and Steel Institute of Japan*. Menerima tanda penghargaan dari Presiden Republik Indonesia, yaitu Satyalancana Karya Satya X Tahun (tahun 2013) dan XX Tahun (tahun 2023).

Buku ini tidak untuk diperjualbelikan

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillaahirrahmaanirrahiim.

Assalamu'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua.

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

Pertama-tama marilah kita panjatkan puji dan syukur kehadiran 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 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

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

“PERAN TEKNIK NUKLIR DALAM
PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PROSES
LOGAM NANOSTRUKTUR”

Pada orasi ini, akan disampaikan *state of the art* tentang peran teknik nuklir dalam pengembangan teknologi proses logam nanostruktur. Hal ini mencakup penjelasan tentang

bagaimana teknik nuklir, seperti hamburan neutron dan sinar-X *synchrotron*, digunakan untuk karakterisasi mendalam material nanostruktur, yang memungkinkan pemahaman yang lebih baik tentang sifat-sifat material ini dan memfasilitasi pengembangan material dengan karakteristik yang disesuaikan untuk berbagai aplikasi praktis.

Orasi ini diharapkan dapat memberikan pemahaman tentang bagaimana integrasi teknik nuklir dalam penelitian dan pengembangan logam nanostruktur berpotensi memajukan pemahaman kita tentang material ini dan mengoptimalkan penggunaannya di industri dan medis. Orasi ini juga bertujuan untuk menyoroti pentingnya kerja sama antar disiplin untuk mendorong inovasi dan aplikasi teknologi material nanostruktur dalam berbagai sektor.

I. PENDAHULUAN

Salah satu tantangan utama dalam pengembangan dan penerapan logam nanostruktur adalah pemahaman dan karakterisasi mendalam terhadap sifat-sifat logam tersebut. Metode karakterisasi tradisional seperti *scanning electron microscope* (SEM) dan *transmission electron microscope* (TEM), telah digunakan untuk menganalisis morfologi dan struktur mikro (Inkson, 2016). Namun, kedua teknik ini memiliki keterbatasan dalam menganalisis karakteristik internal material dalam level atomik, terutama untuk sampel berukuran besar.

Sebagai respons terhadap keterbatasan ini, teknologi nuklir modern telah muncul sebagai solusi yang sangat berharga. Di sinilah teknik nuklir seperti sinar-X *synchrotron* dan hamburan neutron memainkan peran penting. Teknik-teknik ini memungkinkan analisis mendalam terhadap struktur dan sifat internal material nanostruktur. Sinar-X berbasis *synchrotron*, memungkinkan kita mendapatkan gambaran yang komprehensif tentang struktur kristal bahan yang berkaitan dengan distribusi atom-atom di dalam struktur kristal bahan, beserta arah kristalografinya. Pemahaman karakteristik material nanostruktur dalam skala atomik yang berkaitan dengan dinamika perubahan fasa, *lattice defect*, orientasi kristalit sangat sulit dipelajari terutama dalam sistem *bulk* dengan teknik non-nuklir (Nakai *et al.*, 2023). Kombinasi teknik nuklir dan non-nuklir tentunya

akan memberikan pemahaman yang konkrit tentang perubahan karakteristik bahan, sifat korosi misalnya dikaitkan dengan perubahan ukuran dan distribusi partikel, perlakuan permukaan dan interface (Nakai *et al.*, 2023). Demikian pula, hamburan neutron, dengan kemampuan penetrasi yang lebih dalam, sangat berguna dalam memahami sifat material seperti distribusi ukuran dan kepadatan partikel. Kedua teknik ini bersifat non-destruktif, menjaga integritas sampel selama proses karakterisasi.

Kemajuan teknologi dalam beberapa dekade terakhir telah mengungkapkan potensi besar dari material nanostruktur, khususnya logam nanostruktur, dalam berbagai bidang aplikasi (Farajpour *et al.*, 2018; Rifai *et al.*, 2021). Logam nanostruktur, yang memiliki struktur butir sangat halus dengan ukuran nanometer, menawarkan sifat fisik dan kimia yang unik serta mekanik lebih baik dibandingkan dengan material konvensional (Handayani *et al.*, 2013; Rifai *et al.*, 2015; Rifai & Miyamoto, 2020). Fenomena tersebut, yang disebabkan oleh peningkatan rasio luas permukaan terhadap volume, telah mengarah pada pengembangan material dengan kekuatan yang lebih tinggi, konduktivitas listrik dan termal yang baik, serta kemampuan optik yang tinggi (Garcia-Mateo *et al.*, 2014).

Salah satu aspek penting pada era modern adalah adanya kebutuhan akan material yang lebih efisien, tahan lama, dan serbaguna (Ameyama *et al.*, 2022a; Tsuji *et al.*, 2022). Logam nanostruktur menyediakan solusi untuk berbagai tantangan teknologi. Sebagai contoh, di industri elektronika, logam nanostruktur digunakan untuk membuat komponen yang lebih

kecil namun lebih efisien, memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan teknologi semikonduktor (Farajpour *et al.*, 2018). Dalam bidang kedokteran, logam nanostruktur telah membuka jalan bagi metode pengobatan yang lebih efektif dan terarah, seperti alat *implant* yang lebih efisien melalui material nanostruktur yang dirancang khusus (Mishnaevsky *et al.*, 2014; Valiev *et al.*, 2020). Di bidang energi, penggunaan nanostruktur dalam sel surya dan baterai telah meningkatkan efisiensi konversi dan penyimpanan energi, membantu dalam upaya untuk mengatasi krisis energi global (Khanal *et al.*, 2020).

Logam nanostruktur, seperti nanopartikel emas dan perak, telah diaplikasikan secara luas dalam bidang diagnostik dan terapi medis (Victor & José Roberto, 2015). Nanopartikel emas, misalnya, telah digunakan dalam tes diagnostik untuk meningkatkan sensitivitas dan spesifisitas deteksi molekul biologis (Victor & José Roberto, 2015). Selain itu, nanopartikel perak telah digunakan sebagai agen antimikroba dalam produk perawatan kesehatan, memanfaatkan sifat antibakteri alami (Victor & José Roberto, 2015). Dalam konteks lingkungan, nanostruktur menawarkan solusi potensial dalam mengatasi polusi dan masalah keberlanjutan. Sebagai contoh, nanostruktur dapat digunakan dalam proses pemurnian air, menawarkan metode yang lebih efektif dan berkelanjutan dibandingkan dengan metode konvensional (Garcia-Mateo *et al.*, 2014).

Pembuatan logam nanostruktur dapat dilakukan melalui berbagai metode, termasuk sintesis fisika menggunakan teknologi *severe plastic deformation* (SPD) (Segal, 2018),

physical vapour deposition (PVD) (Inkson, 2016), dan lain-lainnya. Setiap metode memiliki keunikannya sendiri dan dipilih berdasarkan jenis material yang diinginkan serta aplikasi spesifik yang ditargetkan.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, (Inkson, 2016; Nakai *et al.*, 2023) penggunaan teknik nuklir dalam karakterisasi material nanostruktur tidak hanya meningkatkan efisiensi penelitian dan pengembangan teknologi, tetapi juga memberikan wawasan yang mendalam tentang struktur, komposisi, dan sifat material (Hosseini *et al.*, 2021; Rifai *et al.*, 2020). Peran teknologi nuklir dalam memperluas pemahaman tentang sifat-sifat ini tidak bisa diabaikan ataupun pada keadaan tertentu tidak dapat digantikan dengan teknik lainnya. Pemahaman yang mendalam tentang material nanostruktur ini, akan membuka jalan bagi pengembangan solusi teknologi yang lebih inovatif dan efektif. Dengan demikian, karakterisasi material nanostruktur, baik melalui metode non-nuklir maupun nuklir, merupakan fondasi penting untuk inovasi teknologi masa depan dan aplikasi praktisnya (Li *et al.*, 2020).

Oleh karena itu, untuk memahami peran teknik nuklir dan berbagai teknik karakterisasi lainnya, seperti *high resolution TEM* dalam pengembangan teknologi proses logam nanostruktur menjadi sangat penting, karena dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang material, sehingga menjadi pilihan dalam mendorong capaian kemajuan penelitian tentang material nanostruktur. Hal ini bukan hanya tentang memperluas pengetahuan ilmiah kita, tetapi juga tentang memanfaatkan

potensi penuh material nanostruktur dalam menciptakan berbagai inovasi teknologi masa depan. Dengan penelitian yang terfokus dan kolaborasi antar disiplin ilmu, kita dapat memastikan bahwa teknologi nanostruktur akan terus berkembang dan memberikan kontribusi signifikan dalam berbagai aspek kehidupan manusia di masa depan.

Buku ini tidak untuk diperjualbelikan

II. PERKEMBANGAN RISET DAN INOVASI LOGAM NANOSTRUKTUR

Perkembangan riset dan inovasi dalam bidang logam nanostruktur menarik perhatian global baik dalam aspek teoretis maupun aplikatif. Fokus utama mencakup dua pendekatan dalam pengembangan logam nanostruktur: *bottom-up*, termasuk *Harmonic Structure*, dan *top-down* melalui teknologi *bulk nanostructured metal*. Selain itu, penggunaan teknik nuklir seperti hamburan neutron dan sinar-*X synchrotron* diulas dalam karakterisasi logam nanostruktur dan peningkatan sifat mekanis material.

2.1. Logam Nanostruktur

Fenomena kemajuan signifikan dalam pengembangan logam nanostruktur bukan hanya sekedar kemajuan teoretis dalam ilmu pengetahuan, tetapi juga revolusi dalam aplikasi praktis (Farajpour *et al.*, 2018). Pengembangan nanostruktur pada logam dan paduan telah menarik perhatian global karena dapat diperoleh sifat-sifat luar biasa, yang sangat berguna untuk aplikasi struktural dan fungsional. Teknik perlakuan logam telah membuka peluang baru dalam pengembangan teknologi fabrikasi untuk produk *bulk* seperti lembaran (Hirota *et al.*, 2016), batang (Rifai *et al.*, 2021), *thin film* (MacWan *et al.*, 2015), dan kawat (Li *et al.*, 2020).

Sejarah logam nanostruktur berawal dari eksplorasi sifat dasar logam pada skala nano, yang bertujuan untuk meningkatkan kekuatan dan keuletan (Li *et al.*, 2023). Mengikuti narasi sejarahnya, pendekatan yang digunakan dalam teknologi proses logam nanostruktur menjadi penting. Pendekatan *top-down* dan *bottom-up* telah menjadi pilar dalam teknologi proses logam nanostruktur, seperti terlihat pada Gambar 1 (Abid *et al.*, 2022). Dalam dunia nanoteknologi, khususnya dalam studi logam nanostruktur, pendekatan *top-down* dan *bottom-up* masing-masing telah menunjukkan kemajuan signifikan dalam memahami dan mengembangkan material pada skala nano. Pendekatan *bottom-up*, dengan konsep *Harmonic Structure* (Ameyama *et al.*, 2017), mengutamakan pembangunan struktur design heterogenitas mikrostruktur, memungkinkan kontrol *mechanical properties* dari suatu bahan logam (Ameyama *et al.*, 2022b). *Harmonic Structure* adalah konsep baru yang diperkenalkan untuk meningkatkan kinerja mekanis bahan logam dalam rekayasa. Struktur ini terdiri dari daerah berbutir kasar yang lembut (disebut sebagai *Core*) yang dikelilingi secara tiga dimensi oleh jaringan yang terhubung dari daerah berbutir ultra-halus yang keras (dikenal sebagai *Shell*). Interaksi antara daerah *Core* dan *Shell* ini menghasilkan efek sinergis selama deformasi plastis, yang mengarah pada sifat mekanis yang lebih unggul dan sangat berharga dalam aplikasi praktis, seperti terlihat pada Gambar 2 (Sharma, Dirras, *et al.*, 2020). Di sisi lain, pendekatan *top-down* memanfaatkan metode *bulk nanostructured metal* (Tsuji *et al.*, 2022), di mana material pada skala besar dikecilkan hingga mencapai dimensi nanometer, sering kali menghasilkan

struktur dengan properti fisik dan kimia yang unik (Sabirov *et al.*, 2015), seperti terlihat pada Gambar 3 (Tsuji *et al.*, 2019). Kedua pendekatan ini, meskipun berbeda dalam metode dan aplikasinya, saling melengkapi dalam penelitian logam nanostruktur. Penjelasan lebih lanjut tentang 2 (dua) konsep proses teknologi logam nanostruktur tersebut disampaikan pada 2 (dua) sub bab berikut:

2.1.1. Konsep *Bottom-Up* dalam Pengembangan Logam Berbasis *Harmonic Structure*

Pendekatan *bottom-up* dalam ilmu material, khususnya dalam pengembangan bahan logam berbasis *Harmonic Structure*, mengacu pada teknologi proses yang memulai pembangunan material dari tingkat yang sangat kecil, seperti atom dan molekul, dan secara bertahap menyusunnya menjadi struktur yang lebih besar dan kompleks (Sharma *et al.*, 2020).

Logam berbasis *Harmonic Structure* merupakan pendekatan revolusioner dalam ilmu material, bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanis bahan struktural (Sharma *et al.*, 2020). Konsep ini merupakan pergeseran paradigma dari bahan homogen tradisional ke struktur yang lebih kompleks dan heterogen. Struktur ini ditandai dengan jaringan kontinu tiga dimensi dari kerangka butiran halus (*ultrafine-grained*, UFG) yang kuat, yang dikenal sebagai kulit (*Shell*), diselingi dengan pulau-pulau zona butiran besar (*coarse grain*, CG) yang lebih lembut, yang disebut inti (*Core*) (Sharma *et al.*, 2020), seperti terlihat pada Gambar 2 (Sharma *et al.*, 2020). Pengembangan logam berbasis *Harmonic*

Structure adalah proses yang efisien, melibatkan proses SPD dari partikel bubuk logam berukuran mikron, diikuti dengan proses sintering yang sistematis (Ameyama *et al.*, 2017). Pendekatan ini menghasilkan mikrostruktur yang sangat berbeda dari bahan konvensional, menawarkan serangkaian sifat mekanis yang unik (Ueno *et al.*, 2012).

Dari konsep *Harmonic Structure*, kita beralih ke bagaimana mikrostruktur dan sifat bahan *Harmonic Structure* dapat dioptimalkan. Mikrostruktur dan sifat bahan logam berbasis *Harmonic Structure* dapat dioptimalkan dengan menyesuaikan presentase *Shell* pada logam berbasis. Penyesuaian distribusi fraksi *Shell* dan *Core* dipengaruhi oleh kondisi *mechanical alloying* dan *sintering* selama fabrikasi bahan. Kemampuan untuk mengontrol parameter ini memungkinkan untuk mengoptimalkan sifat mekanis bahan, memenuhi kebutuhan aplikasi spesifik. Tingkat kontrol ini penting dalam memanfaatkan potensi penuh bahan logam berbasis *Harmonic Structure*.

Nikel, Titanium dan paduannya Ti-6Al-4V telah digunakan dan dikembangkan sebagai material *Harmonic Structure*, dimana memiliki peran kritis dalam aplikasi kedirgantaraan dan biomedis, serta baja tahan karat austenitik SUS316L, yang banyak digunakan dalam industri yang menuntut standar tinggi dalam kebersihan dan ketahanan korosi.

Mikrostruktur dan sifat mekanik salah satu contoh logam Nikel murni berbasis *Harmonic Structure* dan berbasis *homogeneous structure* (Ameyama *et al.*, 2022b), terlihat pada Gambar 4 (Ameyama *et al.*, 2022a). Dalam logam Ni murni,

Harmonic Structure dapat juga terbentuk, seperti terlihat pada Gambar 4 (b) yang mana *Shell* memiliki struktur UFG. Ukuran butir rata-rata *Shell* adalah 2.3 μm , sementara ukuran butir rata-rata *Core* adalah 29.2 μm . Persentase area *Shell* adalah sekitar 45%, sementara ukuran butir *homogeneous structure*-Ni adalah 2.8 μm . *Homogeneous structure* adalah material yang memiliki komposisi dan struktur yang seragam di seluruh bagian. Dari hasil uji tarik pada logam berbasis *homogeneous structure*-Ni dan *Harmonic Structure*-Ni, dapat dilihat bahwa yang terakhir memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi, serta keuletan dan ketangguhan yang lebih baik (Ameyama *et al.*, 2022a).

Penelitian mengenai titanium (Ti) telah membuka pemahaman baru tentang peran *Harmonic Structure* dalam meningkatkan sifat mekanisnya. Ti, yang terkenal karena kekuatan mekanis dan ketahanan korosinya, menjadi pilihan utama dalam aplikasi kedirgantaraan dan biomedis (Sharma *et al.*, 2020). Teknik SPD memungkinkan pengaturan struktur mikro dan nano butir Ti secara presisi, menghasilkan struktur harmonis yang mendistribusikan beban lebih merata dan mengurangi risiko kegagalan material karena kelelahan, seperti terlihat pada Gambar 5 (Sharma *et al.*, 2020). Penggunaan Ti dengan struktur *Harmonic Structure* ini sangat menjanjikan di industri kedirgantaraan, di mana kombinasi berat ringan dan kekuatan tinggi sangat bernilai. Dalam bidang biomedis, kompatibilitas Ti dengan jaringan manusia dan resistensi korosinya membuatnya ideal untuk implan.

SUS316L, yang merupakan salah satu jenis baja tahan karat austenitik, sering dipilih untuk aplikasi yang membutuhkan tingkat kebersihan tinggi dan resistensi korosi yang kuat, seperti di industri makanan dan medis (Ameyama *et al.*, 2010). Penelitian terkini tentang penerapan *Harmonic Structure* pada SUS316L telah menunjukkan peningkatan signifikan dalam resistensi terhadap aus dan kelelahan. *Harmonic Structure* ini dibentuk melalui proses yang melibatkan SPD yang bertujuan untuk memperhalus butir dan mendistribusikan *stress* secara lebih merata di seluruh bahan, seperti terlihat pada Gambar 6 (Ameyama *et al.*, 2010).

Dalam aplikasi permesinan, penggunaan SUS316L dengan berbasis *Harmonic Structure* menawarkan ketahanan superior terhadap korosi dan aus ini dapat mengurangi waktu *downtime* akibat perawatan yang lebih sedikit, berkat ketahanannya yang lebih unggul (Ameyama *et al.*, 2010). Dalam penggunaan medis, peningkatan ketahanan terhadap korosi dan keausan berarti alat-alat medis dan implan memiliki masa pakai yang lebih lama, mengurangi risiko komplikasi pasca-operasi serta memungkinkan penggunaannya dalam perangkat medis *implantable* untuk jangka waktu yang lebih lama (Zhang *et al.*, 2012). Hal ini membuka potensi penggunaan SUS316L dengan *Harmonic Structure* dalam berbagai aplikasi medis yang sangat bergantung pada durabilitas dan kompatibilitas material (Ameyama *et al.*, 2010).

Logam berbasis *Harmonic Structure* menunjukkan keunggulan kinerja tinggi, seperti terlihat pada sifat mekanik

yang superior, dengan ciri khas heterogenitas mikrostruktur yang mengarah pada ketidakcocokan mekanis dan partisi regangan selama deformasi plastis, berbeda dari bahan homogen konvensional. Heterogenitas mikrostruktur pada logam berbasis *Harmonic Structure* memfasilitasi penguatan kerja yang lebih besar dan sifat mekanik superior melalui distribusi ketegangan yang tidak seragam, memungkinkan terjadinya partisi regangan efektif selama deformasi plastis. Hal ini menghasilkan kombinasi kekuatan dan kelenturan yang luar biasa, dikaitkan dengan susunan hierarkis yang dioptimalkan dalam mikrostruktur. Struktur gradien tipe jaringan pada bahan logam berbasis *Harmonic Structure* berkontribusi pada sifat unik ini, menawarkan campuran kekuatan dan fleksibilitas yang langka pada bahan tradisional. Namun, potensi pemanfaatan masih terhambat oleh kompleksitas desain struktural, kesulitan dalam sintesis dan fabrikasi skala besar, integrasi dengan bahan lain, kendala biaya, dan pemahaman terbatas tentang perilaku bahan di bawah kondisi operasional yang berbeda. Penelitian lanjutan dalam nanoteknologi dan ilmu material sangat penting untuk mengatasi tantangan ini dan memaksimalkan potensi pemanfaatan *Harmonic Structure* dalam berbagai aplikasi (Ameyama *et al.*, 2010, 2017; Sharma *et al.*, 2020), dengan pemahaman yang lebih mendalam hingga skala atomik.

2.1.2. Konsep *Top-Down* dan Pengembangan *Bulk Nanostructured Metal*

Pembahasan konsep *top-down* dalam sintesis logam berbasis nanostruktur, terutama melibatkan penggunaan metode SPD

(Miyamoto *et al.*, 2014) untuk menciptakan *bulk nanostructured metal* (Tsuji *et al.*, 2022). Berbeda dengan pendekatan *bottom-up* yang membangun struktur dari skala atomik atau molekular, pendekatan *top-down* memulai dari material skala besar dan mengolahnya menjadi struktur nano. Hal ini memberikan karakteristik unik yang menggabungkan kekuatan tinggi, ketahanan yang baik, dan sifat mekanis yang baik, yang menjadi sangat berharga untuk diterapkan pada berbagai aplikasi medis dan industri.

Proses SPD melibatkan deformasi plastis yang sangat kuat terhadap bahan logam dengan tujuan untuk memperkecil butir-butir kristalnya. Metode SPD termasuk berbagai teknik seperti *equal channel angular pressing* (ECAP) (Gupta *et al.*, 2021), *high-pressure torsion* (HPT) (Edalati & Horita, 2016), *accumulative roll bonding* (ARB) (Ghalehbandi *et al.*, 2019), *tube channel pressing* (TCP) dan banyak lagi. Setiap teknik ini menghasilkan deformasi yang sangat tinggi pada logam, dan menghasilkan perubahan struktural yang signifikan.

Selanjutnya, akan dibahas fitur-fitur penting dari mikrostruktur logam yang diolah dengan SPD. Di antara fitur penting dari mikrostruktur logam yang diolah dengan SPD, adalah pada penampilan tekstur kristalografi dan kehadiran tegangan internal tinggi akibat deformasi plastis yang intensif dan kepadatan dislokasi tinggi di dalam butiran dan di batasannya. Pembentukan *non-equilibrium grain boundary* yang mengandung banyak dislokasi batas butiran adalah konsekuensi langsung dari teknik SPD, tetapi dapat dikendalikan melalui

perlakuan pemanasan lanjutan atau perlakuan termomekanis khusus, atau keduanya (Tsuji *et al.*, 2022).

Penelitian tentang proses SPD dan efeknya pada berbagai logam dan paduan, seperti baja Fe-Cr (Rifai *et al.*, 2013, 2014a, 2014b, 2014c, 2015, 2018a, 2018b, 2021a, 2021b, 2022a, 2022b, 2022c; Rifai & Miyamoto, 2019, 2020; Abiko *et al.*, 2015;), paduan Aluminium (Farshidi *et al.*, 2018; Gostariani *et al.*, 2018), Magnesium (Rifai *et al.*, 2021c; Yuasa *et al.*, 2017) dan paduannya (Rifai *et al.*, 2021e, 2022d; Prasetya *et al.*, 2021;), Nikel (Prasetya *et al.*, 2020) serta tembaga (Rifai *et al.*, 2021d) dan paduannya (Asabe *et al.*, 2017), mewakili aspek penting dalam ilmu material modern. Penelitian-penelitian ini sangat penting dalam meningkatkan pemahaman kita tentang bagaimana teknik SPD, dapat mengubah mikrostruktur yang pada akhirnya berpengaruh pada meningkatkan mikrostruktur serta sifat-sifat material tersebut.

Gambar 7 (a) memperlihatkan hubungan antara kekuatan dan keuletan tarik pada logam nanostruktur, khususnya pada baja *interstitial free* (IF) karbon ultra-rendah dengan ukuran butir rata-rata yang berkisar dari 0.4 hingga 5.3 μm , yang dihasilkan dari perlakuan teknik SPD melalui proses ARB dan *annealing* (Gao *et al.*, 2014). Kurva regangan-tegangan dari baja IF nanostruktur ini menunjukkan pengecilan ukuran butir meningkatkan kekuatan tetapi sering mengurangi keuletan, ini memberikan informasi krusial untuk mengoptimalkan komposisi material dalam aplikasi teknik dimana keseimbangan antara kekuatan dan fleksibilitas adalah esensial, seperti pada komponen otomotif,

struktur pesawat, dan peralatan medis. Kekuatan, khususnya kekuatan hasil, meningkat dengan menurunnya ukuran butir. Gambar 7 (b) menampilkan mikrostruktur spesimen tersebut yang dianalisis menggunakan *electron backscattered diffraction* (EBSD) dalam SEM menunjukkan distribusi ukuran butir yang sangat halus dan seragam, dengan pembentukan batas butir berorientasi rendah yang mengindikasikan terjadinya rekristalisasi dinamis selama proses ARB (Gao *et al.*, 2014). Hal ini menegaskan efektivitas ARB dalam menghasilkan struktur mikro yang halus melalui akumulasi deformasi plastis, dan *annealing* selanjutnya memperbaiki sifat mekanik dengan mengurangi tegangan internal dan meningkatkan stabilitas mikrostruktur dan memberikan pemahaman lebih lanjut tentang bagaimana struktur mikro mempengaruhi sifat mekanik material.

Metode SPD, khususnya proses ECAP, telah menunjukkan efektivitasnya dalam meningkatkan ketahanan korosi pada paduan besi-kromium (Fe-Cr), terutama untuk paduan dengan kandungan kromium di bawah ambang batas untuk pasivitas (Rifai *et al.*, 2018b). Penelitian ini memperlihatkan bahwa paduan Fe-Cr UFG memiliki ketahanan korosi yang lebih tinggi dibandingkan paduan berbutir besar, bahkan dengan kandungan kromium yang lebih rendah dari yang biasanya dibutuhkan untuk pasivitas, seperti terlihat pada Gambar 8 (Rifai *et al.*, 2018b). Hal ini disebabkan oleh akumulasi kromium yang lebih besar pada film pasif paduan UFG, yang merupakan hasil dari laju larut besi yang lebih cepat dan oksidasi kromium, serta difusi kromium yang lebih efisien ke film pasif. Nanostruktur dengan kepadatan batas butir yang tinggi memungkinkan difusi cepat

ini, meningkatkan konsentrasi kromium di permukaan melebihi ambang batas kritis untuk pembentukan film pasif. Mekanisme ini berkolaborasi dengan teori perkolasi, memberikan wawasan tentang jumlah kromium kritis untuk pasivitas pada paduan Fe-Cr. Studi ini membuktikan bahwa melalui pembentukan nanostruktur via SPD, ketahanan korosi paduan Fe-Cr dapat signifikan ditingkatkan, dipicu oleh perubahan mikrostruktur, khususnya di batas butir, yang memfasilitasi peningkatan kromium pada film pasif (Rifai *et al.*, 2018b).

Dampak TCP, yang merupakan teknik dari SPD, pada karakteristik paduan aluminium daur ulang Al-1.7Fe-0.9Si-0.5Cu, dengan fokus pada perubahan struktur butir, evolusi tekstur, dan peningkatan kekuatan (Farshidi *et al.*, 2023). Menggunakan SEM dengan EBSD untuk mengamati perubahan struktur butir dan tekstur, serta uji tarik untuk menilai kekuatan paduan, hasil studi menunjukkan bahwa satu *pass* TCP dengan *equivalent strain* sebesar 1.25, menyebabkan reduksi ukuran butir yang signifikan dan peningkatan kekuatan yang mencolok (Farshidi *et al.*, 2023). Sementara itu, *pass* tambahan memberikan sedikit reduksi ukuran tambahan. Proses TCP ini melibatkan empat langkah deformasi geser dan dua langkah deformasi hoop, serupa dengan proses ECAP. Analisis lebih lanjut menunjukkan pengujian komposisi kimia dan fragmentasi partikel intermetalik AlFeSi dalam mikrostruktur selama proses TCP, dengan butiran besar pada paduan yang di-anneal bertransformasi menjadi struktur UFG setelah satu *pass* TCP dan perubahan ukuran butir minimal setelah empat *pass*. Studi ini memberikan pemahaman baru tentang bagaimana teknik

TCP dapat digunakan untuk meningkatkan sifat mekanis paduan aluminium daur ulang, dengan mempertimbangkan jumlah *pass* yang dilakukan dalam prosesnya, seperti terlihat pada Gambar 9 (Farshidi *et al.*, 2023).

Studi mengenai eksplorasi peningkatan ketahanan korosi magnesium murni dan paduan magnesium ZK60, yang berpotensi dalam aplikasi biomaterial, melalui proses ECAP dan ARB (Purnamasari *et al.*, 2021). Magnesium, dikenal karena bio-kompatibilitas tinggi dan modulus elastisitas mirip tulang manusia, sering mengalami degradasi cepat di lingkungan normal, terutama dalam kondisi kaya ion agresif. Menggunakan teknik SPD seperti ECAP dan ARB, eksperimen ini melibatkan pemrosesan batangan magnesium murni dan paduan ZK60 pada dua suhu berbeda. Uji korosi dilakukan dalam larutan *simulated bodyfluid* (SBF) dan *dulbecco's modified eagle medium* (DMEM), yang mensimulasikan kondisi tubuh manusia (Purnamasari *et al.*, 2021). Hasil menunjukkan magnesium murni lebih rentan terhadap korosi dibanding paduan ZK60 seperti terlihat pada Gambar 10 (Purnamasari *et al.*, 2021), dengan kedua material menunjukkan penurunan laju korosi setelah beberapa *pass* ECAP dan ARB, khususnya dalam larutan SBF dan DMEM. Penelitian ini menegaskan pentingnya teknik SPD seperti ECAP dan ARB dalam memperbaiki sifat material magnesium untuk aplikasi biomaterial, terutama dengan meningkatkan ketahanan korosi mereka, membuka peluang penggunaan yang lebih luas dalam biomaterial.

Investigasi dampak energi regangan pada korosi tembaga

dengan struktur UFG yang dibuat melalui teknik SPD, khususnya melihat evolusi mikrostruktur. Tembaga murni 99,9% diproses menggunakan *simple shear extrusion* (SSE) dengan berbagai jumlah siklus, menghasilkan perubahan mikrostruktur yang signifikan, seperti reduksi ukuran butir dan peningkatan kepadatan dislokasi (Rifai *et al.*, 2022). Proses SSE menghasilkan struktur UFG, ditandai dengan pengecilan ukuran butir dan peningkatan kepadatan dislokasi. Evaluasi perilaku korosi tembaga setelah modifikasi struktural ini menunjukkan bahwa deformasi awal yang besar mengubah butir dan sub-butir menjadi ekuiaxial dengan peningkatan jumlah siklus SSE, menghasilkan struktur yang lebih homogen dengan kepadatan dislokasi yang lebih rendah setelah dua belas siklus, seperti terlihat pada Gambar 11 (Rifai *et al.*, 2022). Penelitian ini menyimpulkan bahwa reduksi ukuran butir melalui SSE meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan korosi tembaga, dikaitkan dengan homogenitas UFG yang lebih tinggi, kepadatan dislokasi yang lebih tinggi, dan batas butir yang mempengaruhi kepadatan arus korosi dan perilaku korosi material. Hal ini menegaskan bahwa reduksi ukuran butir, hasil dari deformasi plastik parah, berperan penting dalam menentukan ketahanan korosi struktur tembaga UFG. Kepadatan dislokasi diamati langsung menggunakan TEM.

Penelitian terakhir pada tembaga murni yang dimodifikasi dengan metoda ECAP menunjukkan potensi luar biasa dari nanostruktur tembaga dalam konteks medis, terutama dalam in-aktivasi virus seperti COVID-19. Tembaga nanostruktur, yang dikembangkan melalui ECAP, tidak hanya menunjukkan peningkatan kekuatan dan plastisitas tetapi juga efektivitas dalam

in-aktivasi virus, seperti terlihat pada Gambar 12. Penelitian ini mendapatkan dana dari Konsorsium COVID-19 2020/2021.

Contoh di atas menunjukkan bahwa proses SPD memberikan dampak signifikan pada sifat bahan. Hasil akhir dari metode SPD adalah material yang memiliki butir kristal yang sangat kecil, seringkali hanya beberapa ratus nanometer.

Seperti halnya pada material *Harmonic Structure*, berbagai teknik karakterisasi dengan teknik non-nuklir ternyata belum sepenuhnya dapat memahami karakteristik *bulk nanostructured metal*. Salah satu tantangan utama adalah pemahaman tentang perilaku dan mekanisme pada tingkat atomik dan nano, khususnya dalam hal interaksi antara dislokasi dan batas butir dalam *bulk nanostructured metal*. Metode non-nuklir seringkali terbatas dalam resolusi dan *depth penetration* atau dalam kemampuan metode tersebut untuk memberikan gambaran menyeluruh tentang sifat dinamis dan kompleksitas material pada skala nano. Misalnya, teknik seperti mikroskopi elektron dan difraksi sinar-X konvensional mungkin tidak selalu mampu memberikan informasi detail tentang perubahan dalam struktur kristal atau distribusi dislokasi yang terjadi selama deformasi atau pengolahan termal (Inkson, 2016).

2.2. Pemanfaatan Teknik Nuklir (Hamburan Neutron dan Sinar-X *Synchrotron*) dalam Karakterisasi Logam Nanostruktur

Pada pembahasan sebelumnya telah dipahami bahwa, karakterisasi adalah aspek kunci yang memainkan peran penting.

Teknik karakterisasi yang banyak digunakan adalah berbasis pemahaman dalam skala makroskopis hingga mikroskopis. Teknik nuklir, seperti hamburan neutron dan sinar-X *synchrotron*, memberikan peluang pemahaman yang lebih mendalam tentang struktur internal dan sifat-sifat material pada skala nano bahkan skala atomik (Nakai *et al.*, 2023). Teknik hamburan neutron, telah membuka jalan untuk penelitian dan pengembangan material dengan cara yang belum pernah terjadi sebelumnya.

2.2.1. Hamburan Neutron

Hamburan neutron adalah teknik yang memungkinkan para ilmuwan untuk menentukan struktur kristal material (Kostorz, 2014). Keunggulan utama dari hamburan neutron terletak pada kemampuannya untuk menembus material dan memberikan informasi tentang struktur kristal, posisi atom dan dinamika atom, tanpa merusak sampel (Hosseini *et al.*, 2021). Hal ini sangat berguna dalam memahami struktur dan dinamika internal logam nanostruktur, seperti pengaturan atom, kepadatan cacat, dan interaksi antar atom.

Perkembangan teknologi hamburan neutron, seperti peningkatan resolusi instrumen dan teknik pengukuran yang lebih canggih, telah memungkinkan analisis yang lebih akurat dan mendalam. Selain itu, integrasi dengan perangkat lunak analisis data canggih memungkinkan para peneliti untuk memperoleh pemahaman yang lebih baik tentang sifat-sifat material yang diteliti. Meskipun ada tantangan seperti kebutuhan sumber neutron yang besar serta kompleksitas dalam interpretasi

data, penelitian berkelanjutan dan inovasi dalam bidang ini terus mendorong batas-batas kemungkinan dalam riset logam nanostruktur.

Dalam studi ini, sampel tembaga *oxide free high conductivity* (OFHC) dipilih karena kemurnian dan konduktivitasnya yang tinggi, menjadikannya ideal untuk analisis. Sampel ini kemudian diproses melalui ECAP, yang menggunakan die dengan saluran yang berpotongan pada sudut 110° (Muslih *et al.*, 2022). Desain ini memastikan distribusi regangan yang seragam selama proses, yang krusial untuk memastikan bahwa perubahan pada struktur kristal dan tekstur adalah hasil langsung dari ECAP dan bukan variabel lain (Muslih *et al.*, 2022).

Teknik *high resolution powder diffraction* (HRPD) memungkinkan untuk deteksi perubahan halus dalam struktur kristal yang tidak terdeteksi oleh metode lain. Tembaga, yang memiliki struktur kristal *face centered cubic* (FCC), menunjukkan perubahan yang signifikan dalam energi regangan dan struktur kristal sebagai hasil dari ECAP (Muslih *et al.*, 2022).

Peningkatan jumlah *pass* ECAP terbukti mempengaruhi ukuran butir tembaga, dengan penurunan ukuran butir dan peningkatan kepadatan dislokasi (Rifai *et al.*, 2013, 2022, 2022b, 2021d). Hal ini menunjukkan bahwa dengan meningkatnya deformasi plastis, terjadi peningkatan dalam kepadatan cacat struktur, seperti dislokasi, yang penting dalam menentukan sifat mekanis material, seperti terlihat pada Gambar 12. Selain itu, difraksi neutron mengungkapkan kepadatan *stacking defect*

yang tinggi dan distorsi kisi (Rifai *et al.*, 2022). Perubahan ini krusial karena mempengaruhi cara material merespons beban mekanis dan kondisi lingkungan.

Selanjutnya, fokus penelitian beralih ke karakterisasi tekstur pada tembaga yang telah diproses melalui ECAP (Muslih *et al.*, 2022). Hamburan neutron digunakan untuk mendapatkan gambaran yang komprehensif tentang tekstur kristal dalam volume yang signifikan. Teknik ini mampu mengungkapkan berbagai tekstur serat yang diinduksi oleh proses ECAP.

Analisis *pole figures* mengungkapkan adanya tekstur serat yang kuat dalam arah [111] pada posisi kompresi awal, yang kemudian mendistribusikan ke serat lain di posisi yang berbeda sebagai hasil dari proses kompresi (Muslih *et al.*, 2022), seperti terlihat pada Gambar 13 (Muslih *et al.*, 2022). Perubahan ini menandakan adanya variasi dalam orientasi kristal dan perbedaan ukuran butir di berbagai posisi sampel. Hal ini penting untuk memahami bagaimana proses deformasi mempengaruhi orientasi kristal dan, secara implisit, sifat mekanis dan fisik material (Muslih *et al.*, 2022).

Temuan ini memiliki implikasi penting dalam penerapan material nanostruktur dalam berbagai aplikasi teknis. Dengan memahami bagaimana tahapan proses seperti ECAP mempengaruhi sifat mekanis dan struktur mikro dari tembaga, kita dapat memahami lebih baik cara mengontrol dan memanipulasi sifat-sifat material untuk aplikasi khusus (Muslih *et al.*, 2022).

Studi lain juga menegaskan bahwa hamburan neutron menyediakan informasi yang lebih mendetail tentang sifat material daripada teknik karakterisasi non-neutron. Dalam penelitian paduan besi-kromium, difraksi neutron mengungkap interaksi kompleks antara kromium dan besi, menunjukkan adanya perubahan tekstur dan kepadatan dislokasi yang tidak terdeteksi oleh teknik permukaan (Muslih *et al.*, 2022). Hal ini memberikan pemahaman holistik mengenai homogenitas tekstur di seluruh volume sampel. Sementara itu, dalam studi magnesium untuk aplikasi biomedis, difraksi neutron digunakan untuk menganalisis distribusi tegangan sisa pasca proses ECAP (Rifai *et al.*, 2020), mengungkapkan bagaimana pemurnian butir mempengaruhi sifat mekanis dan ketahanan korosi (Muslih *et al.*, 2022). Kedua studi ini membuktikan keunggulan difraksi neutron dalam memberikan analisis komprehensif dan non-destruktif, khususnya dalam memahami efek deformasi plastis parah pada sifat mekanis dan tekstur material.

2.2.2. X-ray Synchrotron

Di sisi lain, sinar-X *synchrotron* telah menjadi komponen tak terpisahkan dalam karakterisasi logam nanostruktur. Keunggulan utama sinar-X *synchrotron* terletak pada intensitasnya yang sangat tinggi dan panjang gelombang yang dapat disesuaikan, yang memungkinkan penelitian mendalam tentang struktur kristal dan atom (Nakai *et al.*, 2023). Kemampuan ini sangat penting untuk mengidentifikasi sifat-sifat seperti tekstur kristalografi, tegangan internal, dan kepadatan dislokasi (Nakai *et al.*, 2023). Dengan sinar-X *synchrotron*, para peneliti dapat

mengamati perubahan mikrostruktur yang terjadi selama proses seperti deformasi, perlakuan panas, atau reaksi kimia, yang krusial dalam memahami dan meningkatkan sifat material (Sjögren-Levin *et al.*, 2023).

Selanjutnya, Sinar-X *synchrotron* juga dapat digunakan dalam kombinasi dengan teknik lain seperti mikroskop elektron dan spektroskopi, memberikan gambaran yang lebih lengkap tentang struktur dan sifat material (Nakai *et al.*, 2023). Hal ini memungkinkan para peneliti untuk merancang dan mengembangkan material nanostruktur dengan sifat yang disesuaikan untuk aplikasi spesifik, seperti dalam industri otomotif untuk pembuatan bodi mobil, atau dalam sektor energi untuk pengembangan baterai lithium-ion yang lebih efisien dan tahan lama (Amine *et al.*, 2014).

Kemajuan dalam teknologi Sinar-X *synchrotron* terus membuka peluang baru dalam penelitian dan pengembangan logam nanostruktur. Dengan kemampuan untuk menyediakan informasi yang sangat rinci tentang struktur dan dinamika internal material. Sinar-X *synchrotron* telah menjadi instrumen kunci dalam mendorong batas-batas inovasi dalam ilmu material. Para periset sekarang dapat menciptakan generasi baru material dengan sifat yang unggul dan aplikasi yang lebih luas.

Distribusi dan kepadatan dislokasi dalam baja tahan karat austenitik berstruktur harmonik bimodal, dapat diketahui dengan menggunakan *X-ray diffraction contrast tomography* (DCT) dengan radiasi Sinar-X *synchrotron ultra-bright*. Kajian ini mengarahkan perhatiannya pada aspek-aspek tertentu dari

mikrostruktur baja, dengan penekanan pada distribusi dan dinamika dislokasi. Teknik pencitraan lanjutan seperti DCT memberikan pemahaman detail tentang struktur internal material, yang bagian krusial untuk memahami sifat mekanisnya. Baja tahan karat austenitik berbasis *Harmonic Structure*, yang dibuat melalui metalurgi serbuk, memiliki struktur UFG (*Shell*) yang mengelilingi struktur butiran besar (*Core*), dirancang untuk meningkatkan kekuatan dan keuletan (Nakai *et al.*, 2023). Penelitian ini mengukur kepadatan dislokasi berlebih pada kedua struktur *Shell* dan *Core*, memberikan evaluasi yang komprehensif tentang kepadatan dislokasi baik di permukaan maupun di dalam material, tempat dimana kerusakan biasanya terjadi selama uji tarik (Nakai *et al.*, 2023).

Kepadatan dislokasi berlebih pada struktur *Shell* dan *Core* diukur menggunakan DCT, mengungkapkan sifat mekanik unik dari baja tahan karat austenitik dengan *Harmonic Structure* (Nakai *et al.*, 2023). Hasilnya menunjukkan bahwa kepadatan dislokasi pada struktur *Shell* lebih tinggi daripada di *Core*, mengindikasikan bahwa deformasi pada material adalah *Harmonic Structure*, seperti ditunjukkan pada Gambar 14. Selain itu, penelitian ini juga menunjukkan bahwa kepadatan dislokasi pada butiran dalam struktur *Core* lebih rendah daripada pada material homogen dan lebih rendah dibandingkan dengan yang di struktur *Shell* (Nakai *et al.*, 2023). Temuan ini menegaskan bahwa teknik pencitraan dan analisis lanjutan, khususnya penggunaan radiasi *X-ray synchrotron*, penting dalam menjelaskan perilaku mikrostruktur material di bawah tekanan. Penelitian ini menggunakan DCT untuk observasi detail

tentang kepadatan dislokasi baik pada butiran kasar maupun halus dari baja berstruktur harmonik. Sebelum pengamatan DCT, analisis EBSD menyediakan wawasan awal mengenai mikrostruktur, yang membantu menetapkan dasar perbandingan untuk memahami perilaku dislokasi. DCT memungkinkan observasi non-destruktif terhadap struktur butiran internal dan kepadatan dislokasi, mengungkap perbedaan signifikan antara struktur *Core* dan *Shell*, sehingga menawarkan perspektif baru mengenai mekanisme deformasi pada material berstruktur harmonik. Pada akhirnya, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi pada ilmu material tetapi juga pada teknologi rekayasa dan pengembangan material (Nakai *et al.*, 2023). Memahami mekanisme deformasi dalam material *Harmonic Structure* sangat penting untuk aplikasi di mana kekuatan dan keuletan adalah faktor kunci (Nakai *et al.*, 2023).

Teknik kombinasi hamburan neutron dan Sinar-X *synchrotron* telah membuka jalan bagi inovasi signifikan dalam pemahaman dan pengembangan mikrostruktur material pada skala nano, menjanjikan era baru dalam ilmu material dengan potensi aplikasi yang luas dan berdampak pada banyak industri dan bidang penelitian (Nakai *et al.*, 2023; Hosseini *et al.*, 2021). Dengan memperoleh pemahaman mendalam tentang struktur internal material, para peneliti kini dapat merancang material baru dengan sifat mekanik yang superior, seperti kekuatan dan ketahanan yang lebih tinggi terhadap keausan, korosi, dan suhu ekstrem, yang sangat penting dalam industri seperti *aerospace* untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengurangi emisi karbon. Di bidang teknologi energi, teknik

ini memungkinkan pengembangan baterai dengan kapasitas yang lebih besar dan kecepatan pengisian yang lebih cepat, mendukung kemajuan kendaraan listrik dan penyimpanan energi terbarukan. Dalam elektronik dan nanoteknologi, pemahaman yang lebih baik tentang mikrostruktur material dapat mengarah pada pengembangan semikonduktor dengan sifat listrik yang meningkatkan dan *nanodevice* yang lebih efisien, sementara di bidang kesehatan dan biomedis, hal ini bisa mengarah pada pengembangan implan yang lebih kompatibel dan efektif serta sistem pengiriman obat yang lebih ditargetkan. Selain itu, penelitian ini mendukung pengembangan material yang lebih berkelanjutan, meminimalkan penggunaan sumber daya dan produksi limbah. Kemajuan ini juga mendorong kolaborasi interdisipliner yang lebih luas, menggabungkan keahlian dari berbagai disiplin ilmu untuk mendorong inovasi terbuka dan pemecahan masalah secara kreatif. Dengan demikian, potensi untuk inovasi dan aplikasi baru dalam industri, menandai awal dari kemajuan signifikan dalam pengembangan material canggih yang dapat merubah berbagai aspek kehidupan dan industri.

III. RISET LOGAM NANOSTRUKTUR DI INDONESIA DENGAN KARAKTERISASI TEKNIK NUKLIR

Pada pembahasan sebelumnya telah ditunjukkan signifikansi pemanfaatan teknik nuklir terutama teknik hamburan neutron dan sinar-*X synchrotron* dalam memahami berbagai fenomena intrinsic dalam logam nanostruktur (Hosseini *et al.*, 2021; Nakai *et al.*, 2023). Teknik nuklir telah mengungkapkan data-data pendukung yang menjelaskan penyebab peningkatan dalam sifat mekanik dan ketahanan korosi logam nanostruktur, melengkapi data-data yang telah diperoleh dengan teknik non-nuklir. Hasil penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada pengetahuan ilmiah tetapi juga menawarkan solusi praktis untuk mengatasi tantangan industri, memadukan teori ilmiah dengan aplikasi nyata.

Salah satu contoh kegiatan kami dalam riset dan pengembangan logam nanostruktur tembaga hasil proses SPD dan karakterisasi dengan teknik nuklir memberikan data pembahasan ilmiah terkait peningkatan kekerasan bahan sekaligus, tak hanya mempertahankan, juga peningkatan kemampuan antiviralnya. Capaian ini membuka peluang penyelesaian permasalahan sebaran virus pada fasilitas-fasilitas publik yang menggunakan bahan logam. Kegiatan riset ini kami lakukan dibawah pendanaan Konsorsium Inovasi COVID 19 (Rifai *et al.*, 2021).

Prospek pemanfaatan teknik nuklir untuk mendukung riset dan inovasi khususnya di bidang logam nanostruktur di Indonesia harusnya bisa ditingkatkan lebih jauh sejalan dengan meningkatnya tuntutan dan tantangan industri Nasional khususnya di bidang logam nanostruktur. Indonesia saat ini memiliki dan mengoperasikan reaktor nuklir yang dimanfaatkan terutama untuk riset baik dalam produksi *radioisotope* maupun riset karakterisasi/uji material. Didukung oleh fasilitas karakterisasi dalam berupa fasilitas *spectrometer*, difraktometer dan radiografi memanfaatkan berkas neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi dari Reaktor Serba Guna 30 MW, G.A Siwabessy. Pengelolaan fasilitas, hamburan neutron sepenuhnya dilaksanakan oleh SDM priset, baik dari BRIN, Perguruan Tinggi dari dalam maupun luar negeri. *Capacity building* yang terbangun dalam bidang pemanfaatan teknik nuklir, memberikan kemampuan untuk menjawab tantangan dari permasalahan industri dimasa depan terutama dikaitkan dengan aplikasi logam nanostruktur. Keunggulan *non-destructive tesing* (NDT) berbasis teknik nuklir dibanding teknik-teknik non-nuklir lainnya jelas pada daya tembus yang lebih besar sehingga lingkup obyek yang bisa diamati juga menjadi lebih sesuai dengan kondisi di lapangan (Rifai *et al.*, 2020; Muslih *et al.*, 2022). Hasil-hasil ini jelas menunjukkan bagaimana riset dan inovasi dapat berkontribusi pada kemajuan teknologi dan industri nasional.

Dari aktivitas yang lebih hulu, tantangan untuk mengolah bahan baku logam dari SDA lokal menjadi logam nanostruktur dalam skala industri di dalam negeri juga menjadi target teknologi yang harus dikuasai untuk menjamin kemandirian

bangsa. Dalam proses ini, selain metoda-metoda SPD yang telah dibahas detail sebelumnya, teknik nuklir ternyata juga memiliki potensi pemanfaatan yang signifikan (Rifai *et al.*, 2020; Muslih *et al.*, 2022). Teknik iradiasi dengan berkas nuklir yang selama ini lebih banyak diterapkan di Indonesia untuk modifikasi material non logam, sebenarnya memiliki potensi yang signifikan dalam modifikasi material logam dalam bentuk transmudasi logam. Dalam proses transmudasi ini, berkas nuklir dengan intensitas dan energi yang tinggi akan ditembakkan pada material logam yang selanjutnya akan mengalami perubahan dari skala makro hingga nano yang tentunya pada akhirnya akan merubah karakteristik material dan aplikasinya.

Dalam arah sebaliknya, teknik nuklir juga memiliki potensi untuk didukung oleh kemajuan dan keunggulan material hasil proses nanoteknologi. Dari pembahasan sebelumnya ditunjukkan bahwa, logam nanostruktur hasil proses SPD pada umumnya memiliki keunggulan karakteristik misal ketahanan korosi suhu tinggi, kekerasan-dan keuletan yang lebih baik serta karakteristik residual stress yang lebih terkendali. Sifat-sifat ini sangat dibutuhkan oleh material-material pendukung dalam reaktor nuklir dan fasilitas-fasilitas berbasis nuklir lainnya yang memiliki kondisi lingkungan kerja yang cukup ekstrem misal suhu tinggi dan medium yang sangat korosif. Riset intensif terkait material reaktor khususnya yang terkait bagian bahan bakar (*fuel cell*) dilakukan untuk mendapatkan material dengan toleransi kecelakaan yang baik atau material *accident tolerance fuel cell* (ATFC). Proses dan material hasil SPD menjadi salah satu kandidat untuk material ATFC ini. Saat ini pun di organisasi

riset tenaga nuklir (ORTN) sedang intens dilakukan riset untuk material ini dan salah satunya dengan modifikasi material menggunakan teknik SPD (Kuprin *et al.*, 2021).

Teknik SPD terus berkembang sejalan dengan makin luasnya potensi modifikasi logam dengan karakteristik nanostruktur untuk memenuhi di berbagai kebutuhan di berbagai industri dan bidang aplikasi (Rifai *et al.*, 2021c). Kolaborasi antara peneliti, industri, dan pemerintah dengan implementasi berbagai teknik nuklir dan non-nuklir menjadi hal yang lazim dan bahkan menjadi keharusan dalam mengembangkan teknik SPD untuk mendapatkan solusi berbagai permasalahan industri teknologi tinggi yang efektif dan efisien.

Terakhirnamuntidak kalah penting, potensi integrasi teknologi nanostruktur dengan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*, AI) sangat signifikan, terutama dalam mempercepat penelitian dan pengembangan material canggih (Gadzhimagomedova *et al.*, 2022). AI dapat memainkan peran krusial dalam mengoptimalkan proses desain material, mempercepat analisis data karakterisasi seperti yang diperoleh dari teknik nuklir dan non-nuklir, dan bahkan dalam memprediksi sifat material baru berdasarkan database material yang ada. Dengan kemampuan untuk memproses dan menganalisis volume data besar dengan kecepatan dan akurasi yang tinggi, AI dapat membantu dalam identifikasi pola atau hubungan yang tidak terlihat oleh peneliti manusia, membuka jalan bagi penemuan material baru dengan sifat unggul atau kustomisasi material untuk aplikasi spesifik. Integrasi AI dalam penelitian material nanostruktur

menjanjikan percepatan signifikan dalam inovasi material, mengurangi waktu dari laboratorium ke aplikasi industri, dan mendukung pengembangan solusi berkelanjutan dan efisien (Gadzhimagomedova *et al.*, 2022).

Seluruh rangkaian bahasan di atas, agar dapat dilaksanakan dengan baik bahkan terus berkembang pelaksanaannya dibutuhkan berbagai langkah-langkah strategis baik dari sisi kesiapan fasilitas riset, kesiapan SDM, ketersediaan dan kesinambungan pendanaan riset dan yang sangat penting kesiapan kolaborasi dengan berbagai stakeholder dari pihak akademis, industri dan mitra-mitra riset dari berbagai institusi riset di dalam dan luar negeri. Untuk sisi ketenaganukliran kesiapan fasilitas atau penguasaan teknologi nuklir baik berbasis reaktor maupun akselerator dan SDM sebagai perisetnya menjadi tonggak utama optimalnya pelaksanaan riset (Rifai *et al.*, 2021).

Buku ini tidak untuk diperjualbelikan

IV. PEMANFAATAN TEKNIK NUKLIR UNTUK INOVASI LOGAM NANOSTRUKTUR DI INDONESIA

Pengembangan teknologi nanostruktur di Indonesia menghadapi tantangan signifikan, namun dengan potensi besar untuk kemajuan teknologi dan ekonomi. Tantangan ini mencakup kebutuhan untuk investasi yang besar dalam riset dan pengembangan (R&D), pembangunan infrastruktur yang memadai, serta pengembangan keahlian dan pelatihan sumber daya manusia (SDM). Investasi dalam R&D sangat penting untuk memajukan inovasi dan teknologi baru, sedangkan infrastruktur yang kuat, termasuk fasilitas penelitian yang dilengkapi dengan peralatan canggih dan fasilitas nuklir, memungkinkan pemahaman yang lebih dalam tentang material nanostruktur (Rifai *et al.*, 2020; Hosseini *et al.*, 2021; Muslih *et al.*, 2022). Selain itu, pengembangan keahlian dan pelatihan SDM merupakan kunci untuk memperkuat kapasitas Indonesia dalam nanostruktur, membutuhkan kolaborasi antara universitas, lembaga penelitian, dan industri untuk menciptakan program pendidikan dan pelatihan yang efektif.

Strategi yang tepat dan kolaborasi erat antara berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, lembaga penelitian, universitas, dan industri, adalah esensial untuk mengatasi tantangan ini dan memanfaatkan potensi teknologi nanostruktur. Pemerintah dapat memainkan peran penting dalam menyediakan insentif fiskal, pendanaan untuk riset, dan kebijakan

pendukung, sementara universitas dan lembaga penelitian dapat berfokus pada penelitian dasar dan aplikasi serta pelatihan SDM (Rifai *et al.*, 2021). Industri, di sisi lain, dapat menerapkan hasil penelitian untuk aplikasi komersial, memastikan bahwa inovasi diubah menjadi produk dan solusi nyata. Dengan pendekatan yang terkoordinasi dan dukungan dari semua pihak, Indonesia dapat mengatasi tantangan dalam pengembangan teknologi nanostruktur dan memposisikan diri sebagai pemimpin dalam inovasi material di kawasan dan di panggung global.

Selain berbasis reaktor nuklir, teknologi nuklir berbasis akselerator juga digunakan dalam karakterisasi material nanostruktur. Potensi akselerator berbasis partikel baik proton maupun elektron, dalam bentuk siklotron, *linear accelerator* (LINAC) maupun *synchrotron* banyak dikembangkan di berbagai laboratorium dunia. Seperti telah dibahas pada Bab II, fasilitas Sinar-X *Synchrotron* telah berperan penting dalam proses karakterisasi material nanostruktur. Selain menghasilkan berkas Sinar-X, akselerator partikel juga dapat digunakan untuk membangkitkan berkas neutron. Disamping pemanfaatan berkas untuk karakterisasi, berkas proton ataupun neutron yang dihasilkan juga dapat menjadi “*tool*” untuk uji performa bahan nanostruktur akibat *particle (proton, neutron) bombardment*. Potensi ini sangat bermanfaat untuk memahami perilaku material dan dampak ukuran nano misal pada material pesawat dan material satelit yang rawan terkena *particle bombardment* pada saat beroperasi di Antariksa. Demikian pula berbagai pengembangan material *semiconductor* yang makin kecil akan

semakin peka terhadap efek *particle bombardment* ini (Rifai *et al.*, 2020).

Memahami potensi ini, selain potensi utama untuk riset dan inovasi teknologi *radioisotope*, untuk menjawab berbagai peluang dan tantangan dalam riset dan inovasi material terutama material nanostruktur, manajemen BRIN telah mencanangkan dua jangkar utama penguasaan teknologi berbasis reaktor dan akselerator untuk riset dan inovasi teknologi nuklir di Indonesia. Untuk penguasaan teknologi akselerator, telah diawali pembangunan Siklotron *development experimental cyclotron at Yogyakarta* (DECY) 13 MeV. Saat ini sedang dipersiapkan tahapan penguasaan teknologi pemanfaatan DECY-13 ini, salah satunya untuk proses pengujian dan karakterisasi bahan. Penguasaan teknologi baik dari sisi akselerator maupun teknologi pemanfaatan berkas nuklir (*proton* dan *neutron*) yang dihasilkan, selanjutnya akan menjadi modal penting dalam mendesain dan membangun generasi siklotron berikutnya, siklotron 30 MeV dengan kemampuan dan potensi pemanfaatan yang lebih luas. Ketersediaan fasilitas pembangkit berkas nuklir ini akan membuka peluang penyediaan fasilitas karakterisasi material khususnya material logam nanostruktur berbasis teknik nuklir yang lebih murah dan efisien dibanding fasilitas berbasis reaktor nuklir (Rifai *et al.*, 2020; Hosseini *et al.*, 2021; Muslih *et al.*, 2022).

Masa depan pengembangan teknologi nanostruktur di Indonesia, terutama melalui aplikasi teknik nuklir, memegang janji untuk transformasi yang signifikan dalam berbagai

aspek. Dengan fokus pada pemanfaatan fasilitas *synchrotron* berteknologi tinggi, negara ini berada di jalur untuk tidak hanya memperkuat penguasaan teknologinya tetapi juga untuk meningkatkan kemampuan dan kualifikasi sumber daya manusianya. Teknik nuklir dalam pengembangan logam nanostruktur, seperti yang diwujudkan melalui teknik SPD, memiliki potensi untuk menghasilkan terobosan dalam produksi material canggih (Rifai *et al.*, 2020; Hosseini *et al.*, 2021; Muslih *et al.*, 2022). Dampaknya terhadap ekonomi tidak dapat diremehkan, peningkatan kapasitas produksi, dorongan pada pertumbuhan industri, memungkinkan penciptaan lebih banyak lapangan kerja, dan penguatan struktur ekonomi secara keseluruhan.

Lebih dari itu, pengembangan ini memiliki implikasi sosial yang luas, memungkinkan aplikasi inovatif dalam berbagai sektor industri yang dapat meningkatkan kualitas hidup dan keberlanjutan lingkungan. Integrasi Indonesia ke dalam jaringan penelitian internasional melalui inisiatif ini membuka pintu untuk pertukaran pengetahuan dan teknologi yang akan memperkaya ekosistem penelitian dan pengembangan domestik. Kerjasama internasional ini tidak hanya memajukan posisi Indonesia sebagai pemain kunci dalam riset material nanostruktur tetapi juga memperkuat kolaborasi global dalam menghadapi tantangan global. Era baru dalam sains dan teknologi material, yang ditandai dengan penggunaan teknik SPD untuk produksi logam nanostruktur, menjanjikan peningkatan kapasitas dan inovasi dalam industri nuklir dan sektor-sektor industri lainnya (Rifai *et al.*, 2020; Muslih *et al.*, 2022). Hal ini menandakan

langkah maju yang berani untuk Indonesia dalam memanfaatkan teknologi canggih untuk kemajuan industri dan pembangunan berkelanjutan.

Buku ini tidak untuk diperjualbelikan

V. KESIMPULAN

Logam nanostruktur menawarkan sifat fisik dan kimia yang unggul dibandingkan dengan material konvensional, mempengaruhi industri secara signifikan. Pendekatan *top-down* dan *bottom-up* menjadi landasan dalam teknologi pembuatan logam nanostruktur. Pendekatan *bottom-up*, seperti pengembangan *Harmonic Structure*, menghasilkan bahan dengan struktur mikro heterogen, sedangkan *top-down* melibatkan metode SPD untuk *bulk nanostructured metal*. Pemahaman dan karakterisasi material nanostruktur menjadi kunci. Teknik nuklir seperti hamburan neutron dan sinar-X *synchrotron* penting dalam analisis struktur dan sifat material ini, melengkapi data dari teknik non-nuklir. Penggunaan teknik nuklir memberikan pemahaman tentang struktur internal dan sifat material pada skala nano hingga *atomic*, mendukung inovasi teknologi logam nanostruktur masa depan. Riset logam nanostruktur di Indonesia berkembang pesat, dengan fokus pada teknologi SPD dan teknik karakterisasi nuklir. Berbagai logam nanostruktur, seperti Ti dan paduannya Ti-6Al-4V, serta baja SUS316L, menjadi fokus utama. Teknik karakterisasi nuklir membantu memahami perubahan mikrostruktur selama deformasi, penting untuk aplikasi rekayasa. Pemanfaatan teknik nuklir dalam pengembangan logam nanostruktur di Indonesia memberikan dampak positif. Fasilitas karakterisasi berbasis teknik nuklir

memperkuat pemahaman tentang sifat material nanostruktur. Kolaborasi antara peneliti dan industri akan memaksimalkan potensi material nanostruktur dalam berbagai aplikasi industri. Meskipun ada tantangan, investasi dalam infrastruktur dan pendidikan teknologi nuklir akan memperkuat posisi Indonesia dalam riset dan pengembangan material nanostruktur. Integrasi antara teknik nuklir dan riset material nanostruktur mendorong inovasi di masa depan.

VI. PENUTUP

Pengembangan nanostruktur di Indonesia merupakan contoh penerapan teknik nuklir yang inovatif, di mana penggunaan difraksi neutron dari fasilitas nuklir telah memungkinkan para peneliti untuk memperoleh pemahaman mendalam tentang karakteristik dan perilaku material nanostruktur. Teknik ini menggabungkan kecanggihan fisika nuklir dengan kebutuhan ilmu material, membuka jalan baru dalam eksplorasi dan pemanfaatan potensi luar biasa logam nanostruktur. Kemampuan teknik ini untuk menyediakan informasi pada level atomik memungkinkan pemahaman dan manipulasi material untuk aplikasi spesifik dan inovatif, termasuk pengembangan komponen otomotif hingga implan biomedis.

Kemajuan ini didukung oleh kolaborasi erat antara ahli fisika, teknik, dan ilmu material. Pemanfaatan teknik nuklir dalam penelitian nanostruktur membutuhkan keterampilan dan pengetahuan lintas disiplin, mulai dari fisika nuklir hingga teknik material. Kerjasama ini melibatkan kolaborasi nasional dan jaringan global, dengan institusi dan peneliti dari berbagai negara berbagi pengetahuan, fasilitas, dan sumber daya. Pendekatan multidisiplin ini menekankan pentingnya kolaborasi dalam riset ilmiah dan bagaimana pendekatan tersebut dapat menghasilkan inovasi yang signifikan. Penggunaan teknik nuklir dalam pengembangan nanostruktur di Indonesia menandai era

baru dalam ilmu material dan teknik, menunjukkan bagaimana kerjasama antar disiplin ilmiah dapat menghasilkan inovasi berdampak luas. Dengan mengembangkan kolaborasi ini dan memanfaatkan teknologi nuklir untuk aplikasi yang lebih luas, Indonesia tidak hanya memperkuat posisinya dalam komunitas ilmiah global, tetapi juga membuka jalan bagi kemajuan teknologi yang berkelanjutan dan bermanfaat bagi masyarakat.

Buku ini tidak untuk diperjualbelikan

VII. UCAPAN TERIMA KASIH

Ungkapan rasa syukur saya panjatkan kepada Allah SWT karena dengan rahmat dan izin-Nya, saya dapat mencapai jenjang Peneliti Ahli Utama dan menyelesaikan orasi untuk Pengukuhan Profesor Riset hari ini.

Penghargaan dan ucapan terima kasih yang setinggi-tingginya saya haturkan kepada Presiden Republik Indonesia, Ir. H. Joko Widodo; Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Dr. Laksana Tri Handoko, M.Sc, juga kepada Wakil Kepala Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian, ST, M.Sc., DESD., IPU., ASEAN.Eng. Ucapan terima kasih dan penghargaan juga saya sampaikan kepada Majelis Pengukuhan Profesor Riset: Prof. Dr. Ir. Gadis Sri Haryani, beserta Sekretaris, Prof. Ir. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, MSCE, Ph.D.; tim penelaah naskah orasi Prof. Dr. Ridwan, Prof. Dr.-Ing. Andika Widya Pramono, M.Sc dan Prof. Dr. Eng. Ir. A. Ali Alhamidi, MT. yang telah memberikan saran dan masukan sehingga naskah orasi ini layak disampaikan pada sidang terbuka pengukuhan ini. Kepada Sekretaris Utama BRIN, Nur Tri Anis Suestiningtyas, S.IP., M.A.; Kepala ORTN, Dr. Rohadi Awaludin.; Kepala BOSDM-BRIN, Ratih Retno Wulandar, S.Sos., M.Si serta seluruh panitia atas kesempatan, bantuan, serta kerja sama yang diberikan untuk pelaksanaan acara Pengukuhan Profesor Riset hari ini.

Hormat dan terima kasih saya haturkan juga kepada guru-guru yang telah mengajarkan dan memberikan pendidikan secara tulus dari pendidikan dasar hingga pendidikan tinggi serta di lingkungan kerja. Kepada Drs. Mujamilah, M.Sc, Prof. Edy Giri Rachman Putra, PhD, Prof. Hiroyuki Miyamoto, Prof. Kei Ameyama dan Alm. Prof. Soedyartomo Soentono, M.Sc, PhD (Kepala BATAN tahun 2002-2007) yang telah banyak mengajarkan saya untuk terus berkomitmen di bidang ilmu bahan dan pemanfaatan teknik nuklir, khususnya di bidang hamburan neutron. Prof. Dr. Ir. Anhar Riza Antariksawan (Kepala BATAN tahun 2019–2021) yang senantiasa memberikan izin kepada saya untuk tetap melakukan eksperimen dan penelitian di luar negeri selama saya menjabat sebagai pejabat struktural.

Capaian dan keberhasilan yang saya peroleh hari ini tentunya tidak terlepas dari doa-doa tulus yang dipanjatkan dari kedua Ibu dan Bapak saya tercinta. Kepada istri dan dua putra tercinta, terima kasih karena selalu memberikan semangat, keceriaan, tempat berdiskusi, dan sumber inspirasi saya untuk bisa menyelesaikan orasi ini, juga kepada adik saya atas dukungan dan doanya.

Terima kasih dan penghargaan yang tinggi saya sampaikan kepada rekan-rekan di Laboratorium Nanomaterial, Dra. Grace Sulungbudi, M.Sc, Wildan Zakiah, A.Md, Ahadi Damar Prasetya, S.Si, dan juga Laboratorium Hamburan Neutron, khususnya Dr. Andon Insani, Refai Muslih, S.T, Tri Hardi, P, M.T yang telah banyak membantu kelancaran tugas-tugas saya sebagai periset ilmu bahan dengan pemanfaatan teknik nuklir.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada keluarga besar Pusat Riset Teknologi Akselerator dan Ex Pusat Sains Teknologi Bahan Maju.

Buku ini tidak untuk diperjualbelikan

Buku ini tidak untuk diperjualbelikan

DAFTAR PUSTAKA

- Abid, N., Khan, A. M., Shujait, S., Chaudhary, K., Ikram, M., Imran, M., Haider, J., Khan, M., Khan, Q., & Maqbool, M. (2022). Synthesis of nanomaterials using various top-down and bottom-up approaches, influencing factors, advantages, and disadvantages: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 300, 102597. <https://doi.org/10.1016/J.CIS.2021.102597>
- Abiko, M., Miyamoto, H., Fujiwara, H., & **Rifai, M.** (2015). Fatigue properties of UFG low C, N, ferrite stainless steel produced by ECAP. *Proceeding Processing and Fabrication of Advanced Material XXIV*, 21 (1), 712–721.
- Ameyama, K., Cazes, F., Couque, H., Dirras, G., Kikuchi, S., Li, J., Mompinou, F., Mondal, K., Orlov, D., Sharma, B., Tingaud, D., & Vajpai, S. K. (2022a). Harmonic structure, a promising microstructure design. *Materials Research Letters*, 10 (7), 440–471. <https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2057203>
- Ameyama, K., Fujiwara, H., Sekiguchi, T., Sabrina N. B. R., & **Rifai, M.** (2010). Creation of harmonic structure materials with outstanding mechanical properties. *International Symposium on Giant Straining Process for Advanced Materials Proceedings*, 2010 (1), 35–46. <https://doi.org/unidentified>
- Ameyama, K., Vajpai, S. K., & Ota, M. (2017). Microstructure Evolution and Deformation Mechanisms of Harmonic Structure Designed Materials. *Materials Science Forum*, 879, 145–150. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.879.145>
- Amine, K., Kanno, R., & Tzeng, Y. (2014). Rechargeable lithium batteries and beyond: Progress, challenges, and future directions.

MRS Bulletin, 39 (5), 395–401. <https://doi.org/10.1557/MRS.2014.62>

- Asabe, T., **Rifai, M.**, Yuasa, M., & Miyamoto, H. (2017). Effect of grain size on the stress corrosion cracking of ultrafine grained Cu-10 wt% Zn alloy in ammonia. *International Journal of Corrosion*, 2017, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2017/2893276>
- Bogdanov, S. G., Goshchitskii, B. N., Parkhomenko, V. D., Leontieva-Smirnova, M. V., & Chernov, V. M. (2014). Small-angle neutron scattering investigation of the nanostructure of ferritic-martensitic 12%-chromium steels. *Physics of the Solid State*, 56 (1), 1–13. <https://doi.org/10.1134/S1063783414010065/METRICS>
- Edalati, K., & Horita, Z. (2016). A review on high-pressure torsion (HPT) from 1935 to 1988. *Materials Science and Engineering: A*, 652, 325–352. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2015.11.074>
- Farajpour, A., Ghayesh, M. H., & Farokhi, H. (2018). A review on the mechanics of nanostructures. *International Journal of Engineering Science*, 133, 231–263. <https://doi.org/10.1016/J.IJENGSCI.2018.09.006>
- Farshidi, M. H., **Rifai, M.**, & Miyamoto, H. (2018). Microstructure evolution of a recycled Al–Fe–Si–Cu alloy processed by tube channel pressing. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 25 (10), 1166–1172. <https://doi.org/10.1007/S12613-018-1668-6>
- Farshidi, M. H., **Rifai, M.**, & Miyamoto, H. (2023). Grain refinement, texture evolutions, and strengthening of a recycled aluminium alloy subjected to tube channel pressing. *Metallic Materials/Kovové Materiály*, 61, 13–21. <https://doi.org/10.31577/km.2023.1.13>
- Gadzhimagomedova, Z. M., Pashkov, D. M., Kirsanova, D. Y., Soldatov, S. A., Butakova, M. A., Chernov, A. V., & Soldatov, A. V. (2022). Artificial Intelligence for Nanostructured Materials.

Nanobiotechnology Reports, 17 (1), 1–9. <https://doi.org/10.1134/S2635167622010049/metrics>

- Gao, S., Chen, M., Chen, S., Kamikawa, N., Shibata, A., & Tsuji, N. (2014). Yielding Behavior and Its Effect on Uniform Elongation of Fine Grained IF Steel. *Materials Transactions*, 55 (1), 73–77. <https://doi.org/10.2320/MATERTRANS.MA201317>
- Garcia-Mateo, C., Sourmail, T., Caballero, F. G., Smanio, V., Kuntz, M., Ziegler, C., Leiro, A., Vuorinen, E., Elvira, R., & Teeri, T. (2014). Nanostructured steel industrialisation: plausible reality. *Materials Science and Technology*, 30 (9), 1071–1078. <https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000428>
- Ghalehandi, S. M., Malaki, M., & Gupta, M. (2019). Accumulative Roll Bonding—A Review. *Applied Sciences*, 9 (17), 3627–3640. <https://doi.org/10.3390/APP9173627>
- Gostariani, R., Bagherpour, E., **Rifai, M.**, Ebrahimi, R., & Miyamoto, H. (2018). Fabrication of Al/AlN in-situ nanocomposite through planetary ball milling and hot extrusion of Al/BN: Microstructural evaluation and mechanical behavior. *Journal of Alloys and Compounds*, 768, 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.07.256>
- Gupta, A., Chandrasekhar, B., & Saxena, K. K. (2021). Effect of Equal-channel angular pressing on mechanical Properties: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5602–5607. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.02.317>
- Handayani, A., **Rifai, M.**, Pramono, E., & Mujamilah, M. (2013). Morphology and magnetic properties of Fe/Fe-oxide core/shell nanoparticle prepared by high energy milling process in varied medium. *Indonesian Journal of Materials Science*, 151–155. <https://doi.org/10.17146/jsmi.2013.14.2.4438>
- Hirota, K., Ge, X., Kato, M., & **Rifai, M.** (2016). The microstructure and mechanical properties of ZrO₂-Al₂O₃ thick film formed on the SUS304 sheet using thermal spray. *Proceeding of Harris*

Foundation Research Presentation, 2016 (1), 96–101. <https://doi.org/undefined>

Hosseini, M., Arif, M., Keshavarz, A., & Iglauer, S. (2021). Neutron scattering: A subsurface application review. *Earth-Science Reviews*, 221, 103755–103770. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2021.103755>

Inkson, B. J. (2016). Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*, 17–43. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100040-3.00002-X>

Khanal, L. R., Sundararajan, J. A., & Qiang, Y. (2020). Advanced Nanomaterials for Nuclear Energy and Nanotechnology. *Energy Technology*, 8 (3), 1901070. <https://doi.org/10.1002/ENTE.201901070>

Kostorz, G. (2014). X-ray and Neutron Scattering. *Physical Metallurgy: Fifth Edition*, 1, 1227–1316. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53770-6.00013-7>

Kuprin, A. S., Vasilenko, R. L., Tolstolutsкая, G. D., Voyevodin, V. N., Belous, V. A., Ovcharenko, V. D., & Kopanets, I. E. (2021). Irradiation resistance of chromium coatings for ATFC in the temperature range 300–550°C. *Journal of Nuclear Materials*, 549, 152908. <https://doi.org/10.1016/J.JNUCMAT.2021.152908>

Li, G., Jiang, J., Ma, H., Zheng, R., Gao, S., Zhao, S., Ma, C., Ameyama, K., Ding, B., & Li, X. (2023). Superior strength–ductility synergy in three-dimensional heterogeneous-nanostructured metals. *Acta Materialia*, 256, 119143–119155. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2023.119143>

Li, X., Lu, L., Li, J., Zhang, X., & Gao, H. (2020). Mechanical properties and deformation mechanisms of gradient nanostructured metals and alloys. *Nature Reviews Materials*, 5 (9), 706–723. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0212-2>

- MacWan, A., Marr, M., Kesler, O., & Chen, D. L. (2015). Microstructure, hardness, and fracture toughness of suspension plasma sprayed yttria-stabilized zirconia electrolytes on stainless steel substrates. *Thin Solid Films*, 584, 23–28. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.11.052>
- Mishnaevsky, L., Levashov, E., Valiev, R. Z., Segurado, J., Sabirov, I., Enikeev, N., Prokoshkin, S., Solov'Yov, A. V., Korotitskiy, A., Gutmanas, E., Gotman, I., Rabkin, E., Psakh'E, S., Dluhoš, L., Seefeldt, M., & Smolin, A. (2014). Nanostructured titanium-based materials for medical implants: Modeling and development. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 81 (1), 1–19. <https://doi.org/10.1016/J.MSER.2014.04.002>
- Miyamoto, H., **Rifai, M.**, & Fujiwara, H. (2014). Severe plastic deformation as a new processing for enhancing the performance of metallic components. *Books.Google.CoProceedings of the First International Conference on Construction, 2014*, 1–10. <https://doi.org/unidentified>
- Miyamoto, H., Yuasa, M., **Rifai, M.**, & Fujiwara, H. (2019). Corrosion behavior of severely deformed pure and single-phase materials. *Materials Transactions*, 60 (7), 1243–1255. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MF201935>
- Muslih, M. R., Priyanto, T. H., **Rifai, M.**, Andryansah, A., & Riastuti, R. (2022). Texture characterization of the copper produced by ECAP process using neutron diffraction technique. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 23 (2), 2614–087. <https://doi.org/10.17146/jsmi.2022.23.5.6604>
- Nakai, Y., Kikuchi, S., Shiozawa, D., Hase, T., Nakazawa, I., Fujita, K., Kawabata, M. O., & Ameyama, K. (2023). Evaluation of Dislocation Density of Coarse and Fine Grains in Bimodal Harmonic Structured Steel Observed by Diffraction Contrast Tomography using Ultrabright Synchrotron Radiation. *Advanced Engineering Materials*, 25 (15), 2201836–2201850. <https://doi.org/10.1002/ADEM.202201836>

- Nakai, Y., Kikuchi, S., Shiozawa, D., Nakazawa, I., Fujita, K., Kawabata, M. O., & Ameyama, K. (2023). Misorientation Measurement in Tensile Test of Bimodal Harmonic Structured Stainless Steel by Diffraction Contrast Tomography Using Ultrabright Synchrotron Radiation X-ray. *Procedia Structural Integrity*, 43, 221–227. <https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2022.12.262>
- Nakai, Y., Shiozawa, D., Kikuchi, S., Mishima, I., Kawabata, M., & Ameyama, K. (2023). Misorientation of Grains in Fatigue of Harmonic Structured Steel Observed by Diffraction Contrast Tomography Using Ultrabright Synchrotron Radiation. *Materials Science Forum*, 1107, 61–66. <https://doi.org/10.4028/P-E0MC23>
- Osaki, K., Kikuchi, S., Nakai, Y., Kawabata, M. O., & Ameyama, K. (2020). The effects of thermo-mechanical processing on fatigue crack propagation in commercially pure titanium with a harmonic structure. *Materials Science and Engineering: A*, 773, 138892–138910. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2019.138892>
- Prasetya, A. D., **Rifai, M.**, As'ari, A. H., Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2020). Electrochemistry study on the relationship between grain boundary state and corrosion behavior of ultrafine grained iron chromium alloy. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 21 (1), 41–46. <https://doi.org/10.17146/jsmi.2019.21.1.5640>
- Prasetya, A. D., **Rifai, M.**, Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2020). X-ray diffraction (XRD) profile analysis of pure ECAP-annealing Nickel samples. *Journal of Physics: Conference Series*, 1436 (1), 1–7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012113>
- Prasetya, A. D., **Rifai, M.**, Mujamilah, M., Sulungbudi, G. Tj., Putri, F. N., Yoviansyah, F. R., & Miyamoto, H. (2021). Corrosion behaviour of ultrafine grained pure magnesium and ZK60 prepared by equal channel angular pressing in simulated body fluid and DMEM solution. *AIP Conference Proceedings*, 2381 (1), 1–5. <https://doi.org/10.1063/5.0066262>

- Purnamasari, I. S., **Rifai, M.**, Ajiriyanto, M. K., Alhamidi, A., Mujamilah, M., Insani, A., & Prasetya, A. D. (2021). Corrosion behavior of pure magnesium processed by accumulative roll bonding for biomaterial application. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 28, 583–590. <https://doi.org/10.56042/ijems.v28i6.43477>
- Rifai, M.**, Haga, R., Miyamoto, H., & Fujiwara, H. (2013). Microstructure quantification and mechanical properties of ultrafine grained Fe-Cr alloys and pure copper by equal channel angular pressing. *Proceedings of the 8th Pacific Rim International Congress on Advanced Materials and Processing, 2013* (1), 3329–3335. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48764-9_412
- Rifai, M.**, & Miyamoto, H. (2019). Effect of stored energy on corrosion fatigue properties of ultrafine grained Fe-20% Cr steel by equal channel angular pressing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 673 (1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/673/1/012131>
- Rifai, M.**, & Miyamoto, H. (2020). Effect of strain energy on the grain growth behaviour of ultrafine-grained iron-chromium alloy by equal channel angular pressing. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 14 (3), 7049–7057. <https://doi.org/10.15282/jmes.14.3.2020.07.0552>
- Rifai, M.**, Miyamoto, H., & Fujiwara, H. (2014a). Effect of deformation route on the development of low CN Fe-20% Cr alloy by Equal Channel Angular Pressing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 63, 1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/63/1/012122>
- Rifai, M.**, Miyamoto, H., & Fujiwara, H. (2014b). Effect of ECAP deformation route on the degree of anisotropy of microstructure of extremely low CN Fe-20mass% Cr alloy. *Metals*, 4 (1), 55–63. <https://doi.org/10.3390/met4010055>

- Rifai, M.,** Miyamoto, H., & Fujiwara, H. (2014c). The effect of ECAP deformation route on microstructure, mechanical and electrochemical properties of low CN Fe-20% Cr alloy. *Materials Sciences and Applications*, 5 (8), 568–578. <https://doi.org/10.4236/msa.2014.58059>
- Rifai, M.,** Miyamoto, H., & Fujiwara, H. (2015). Effects of strain energy and grain size on corrosion resistance of ultrafine grained Fe-20% Cr steels with extremely low C and N fabricated by ECAP. *International Journal of Corrosion*, 2015, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2015/386865>
- Rifai, M.,** Mujamilah, M., Bagherpour, E., & Miyamoto, M. (2022). Effect of strain energy on corrosion behavior of ultrafine grained copper prepared by severe plastic deformation. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 58 (2), 335–344. <https://doi.org/10.2298/JMMB220101015R>
- Rifai, M.,** Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2021a). Effect of preliminary deformation on microstructure and texture of iron-chromium alloy prepared by severe plastic deformation. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 9 (12), 1468–1471. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2021/039122021>
- Rifai, M.,** Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2021b). Microstructure and strain hardening behaviour of iron chromium alloy subjected by severe plastic deformation. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 9 (12), 1472–1476. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2021/049122021>
- Rifai, M.,** Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2021c). Microstructure and strain rate sensitivity in pure magnesium subjected to severe plastic deformation. *AIP Conference Proceedings*, 2381 (1), 1–6. <https://doi.org/10.1063/5.0066260>
- Rifai, M.,** Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2021d). Microstructure homogeneity of ultrafine-grained copper prepared by severe

plastic deformation process. *AIP Conference Proceedings*, 2381 (1), 1–6. <https://doi.org/10.1063/5.0066261>

Rifai, M., Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2021e). The Effect of precipitation on microstructure and corrosion behaviour of ZK60 subjected to severe plastic deformation. *Metallurgi*, 36 (3), 109–118. <https://doi.org/10.14203/metalurgi.v36i3.607>

Rifai, M., Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2022a). Effect of Microstructure Evolution and Corrosion Behavior on Phase Transformation of Nanocrystalline SUS304 Prepared by Dry Ice Shot Peening. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 10 (1). <https://doi.org/10.30534/ijeter/2022/021012022>

Rifai, M., Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2022b). Hardness and Microstructure Homogeneity of Pure Copper and Iron-Chromium Alloy Processed by Severe Plastic Deformation. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 10 (1), 1–8. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2022/011012022>

Rifai, M., Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2022c). Microstructure, hardness and corrosion behaviour of SUS304 subjected by dry ice shot peening. *AIP Conference Proceeding*, 2501 (1), 1–5. <https://doi.org/10.1063/5.0095497>

Rifai, M., Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2022d). Nanoindentation behaviour on magnesium alloy subjected by equal channel angular pressing. *AIP Conference Proceeding*, 2501 (1), 1–6. <https://doi.org/10.1063/5.0095496>

Rifai, M., Mujamilah, M., Muslich, M. R., Ridwan, R., Sarr, M. M., & Miyamoto, H. (2020). Neutron diffraction and the residual stress distribution of magnesium processed by equal channel angular pressing. *Journal of Physics: Conference Series*, 1436 (1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012034>

Rifai, M., Prasetya, A. D., Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2021). Microstructure and corrosion behaviour of ultrafine-grained pure

magnesium by severe plastic deformation as a biodegradable material. *Journal of Physics: Conference Series*, 1825 (1), 1–6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1825/1/012086>

Rifai, M., Ridwan, Mujamilah, Insani, A., & Uus, S. (2021). Pengembangan bahan logam tembaga dengan proses severe plastic deformation untuk in-aktivasi COVID-19 berbasis karakterisasi teknik nuklir, *Proposal Kegiatan Konsorsium COVID-19*.

Rifai, M., Yuasa, M., & Miyamoto, H. (2018a). Effect of deformation structure and annealing temperature on corrosion of ultrafine-grain Fe-Cr Alloy prepared by equal channel angular pressing. *International Journal of Corrosion*, 2018, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2018/4853175>

Rifai, M., Yuasa, M., & Miyamoto, H. (2018b). Enhanced corrosion resistance of ultrafine-grained Fe-Cr alloys with subcritical Cr contents for passivity. *Metals*, 149 (8), 1–10. <https://doi.org/10.3390/met8030149>

Rifai, M., Yunasfi, Y., Sukirman, E., Sarwanto, Y., & Mujamilah, M. (2021). Structure and magnetic properties of Fe/Si nanoparticles prepared by high energy milling process. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 11 (2), 1–9. <https://doi.org/10.13057/ijap.v11i2.51029>

Sabirov, I., Enikeev, N. A., Murashkin, M. Y., & Valiev, R. Z. (2015). *Bulk nanostructured materials with multifunctional properties* (Vol. 10, pp. 978-3). Berlin, Germany: Springer International Publishing. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-19599-5.pdf>

Segal, V. (2018). Review: Modes and Processes of Severe Plastic Deformation (SPD). *Materials*, 11 (7), 1175. <https://doi.org/10.3390/MA11071175>

Sharma, B., Dirras, G., & Ameyama, K. (2020). Harmonic Structure Design: A Strategy for Outstanding Mechanical Properties in

Structural Materials. *Metals*, 10 (12), 1615–1631. <https://doi.org/10.3390/MET10121615>

Sharma, B., Miyakoshi, M., Vajpai, S. K., Dirras, G., & Ameyama, K. (2020). Extra-strengthening in a harmonic structure designed pure titanium due to preferential recrystallization phenomenon through thermomechanical treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 797, 140227. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140227>

Sjögren-Levin, E., Pantleon, W., Ahadi, A., Hegedüs, Z., Lienert, U., Tsuji, N., Ameyama, K., & Orlov, D. (2023). Stress partitioning in harmonic structure materials at the early stages of tensile loading studied in situ by synchrotron X-ray diffraction. *Scripta Materialia*, 226, 115186–115195. <https://doi.org/10.1016/J.SCRIPTAMAT.2022.115186>

Tsuji, N., Gholizadeh, R., Ueji, R., Kamikawa, N., Zhao, L., Tian, Y., ... & Shibata, A. (2019). Formation mechanism of ultrafine grained microstructures: various possibilities for fabricating bulk nanostructured metals and alloys. *Materials transactions*, 60 (8), 1518-1532. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MF201936>

Tsuji, N., Ogata, S., Inui, H., Tanaka, I., & Kishida, K. (2022). Proposing the Concept of Plaston and Strategy to Manage Both High Strength and Large Ductility in Advanced Structural Materials, on the Basis of Unique Mechanical Properties of Bulk Nanostructured Metals. *The Plaston Concept: Plastic Deformation in Structural Materials*, 3–34. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7715-1_1/FIGURES/21

Ueno, A., Fujiwara, H., **Rifai, M.**, Zhang, Z., & Ameyama, K. (2012). Fractographical analysis on fracture mechanism of stainless steel having harmonic microstructure. *Journal of the Society of Materials Science*, 61 (8), 686–691. <https://doi.org/10.2472/JSMS.61.686>

Valiev, R. Z., Prokofiev, E. A., Kazarinov, N. A., Raab, G. I., Minasov, T. B., & Stráský, J. (2020). Developing Nanostructured Ti Alloys

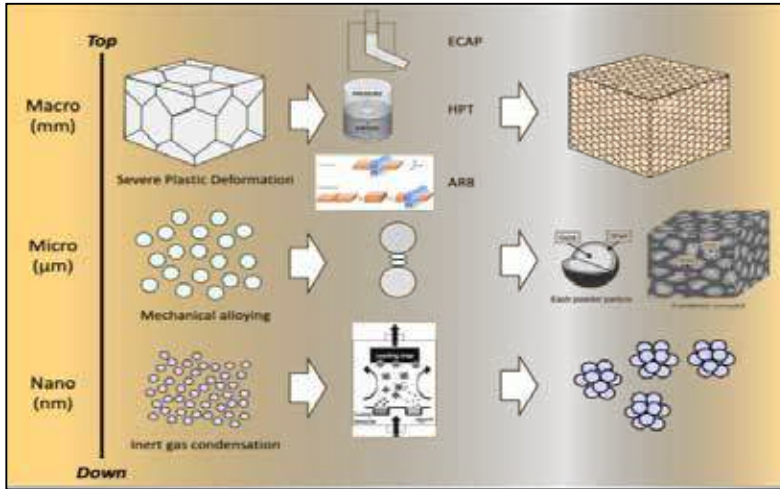
for Innovative Implantable Medical Devices. *Materials*, 13 (4), 967. <https://doi.org/10.3390/MA13040967>

Victor, S.-U., & José Roberto, V.-B. (2015). Gold and Silver Nanotechnology on Medicine. *Journal of Chemistry and Biochemistry*, 3 (1). <https://doi.org/10.15640/jcb.v3n1a2>

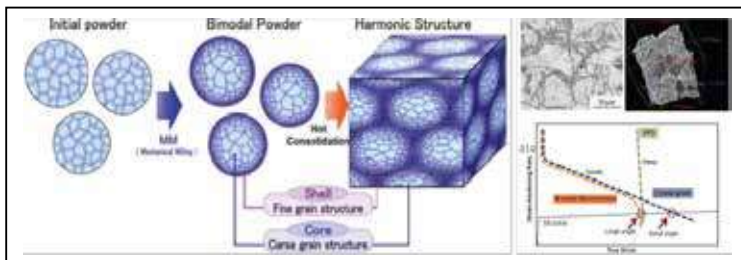
Yuasa, M., Furukawa, R., **Rifai, M.**, & Miyamoto, H. (2017). Corrosion resistance of magnesium alloys processed by equal channel angular pressing. *Proceeding of Harris Foundation Research Presentation, 2017* (1), 25–29. <https://doi.org/undefined>

Zhang, Z., **Rifai, M.**, Kobayakawa, H., Ciuca, O. P., Fujiwara, H., Ueno, A., & Ameyama, K. (2012). Effects of SiO₂ particles on deformation of mechanically milled water-atomized SUS304L powder compacts. *Materials Transactions*, 53 (1), 109–115. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MD201120>

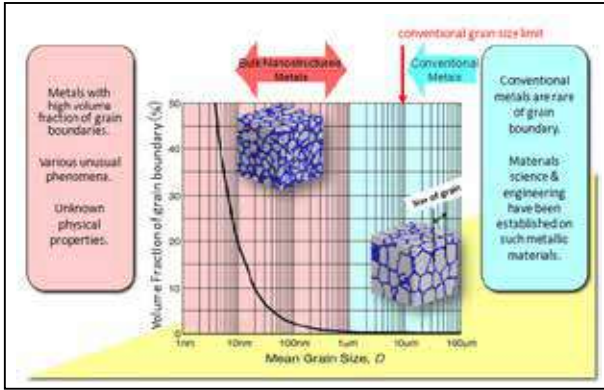
LAMPIRAN



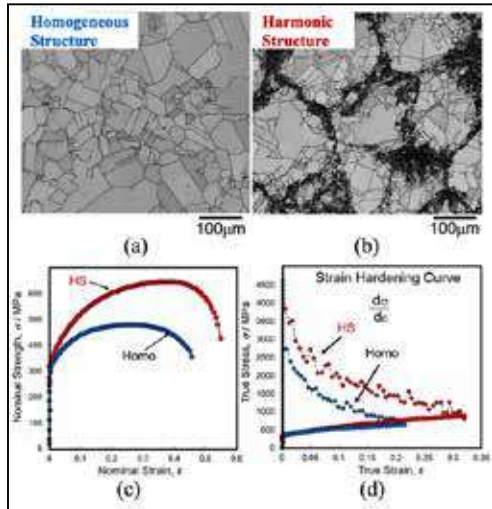
Gambar 1. Konsep “top-down” dan “bottom-up” pengembangan logam berbasis nanostruktur (Abid et al., 2022).



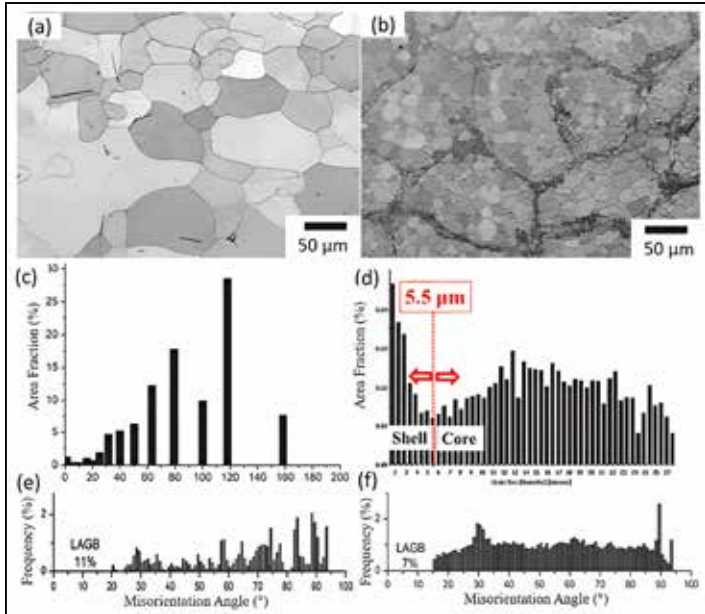
Gambar 2. Konsep logam berbasis *Harmonic Structure* (Sharma et al., 2020).



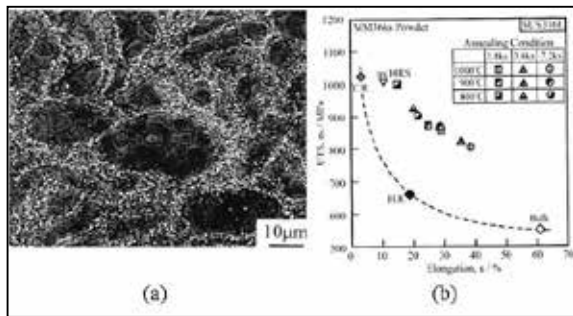
Gambar 3. Konsep *bulk nanostructured* metal yang memiliki sifat unik (Tsuji *et al.*, 2019).



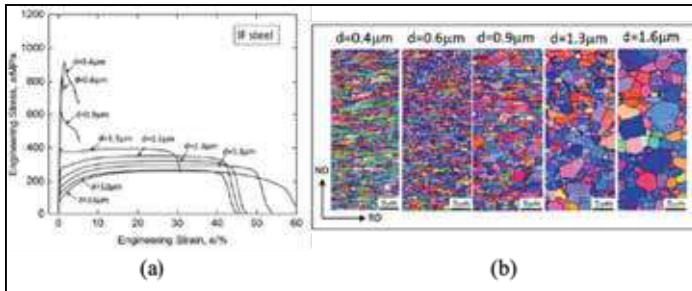
Gambar 4. Mikrostruktur dari (a) *homogeneous structure*; (b) *harmonic structure*; dan hasil (c) uji tarik serta (d) *strain hardening curve* dari logam nikel murni berbasis *Harmonic Structure* dan *Homogenous Structure* (Ameyama *et al.*, 2022a).



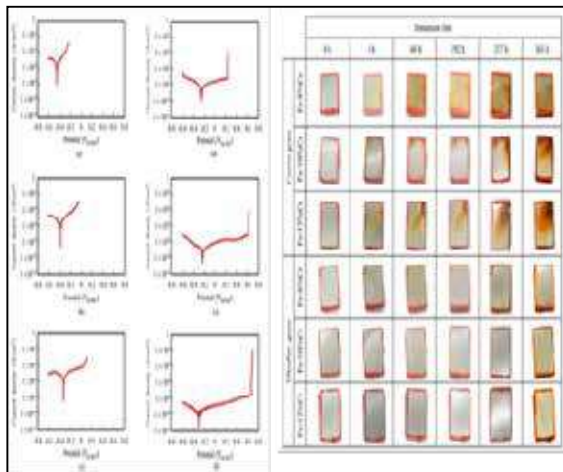
Gambar 5. Hasil observasi EBSD untuk *homogeneous structure* dan *harmonic structure* (a,b) mikrostruktur; (c,d) distribusi ukuran butir dan (e,f) distribusi sudut misorientasi yang telah proses *sintering* (Sharma *et al.*, 2020).



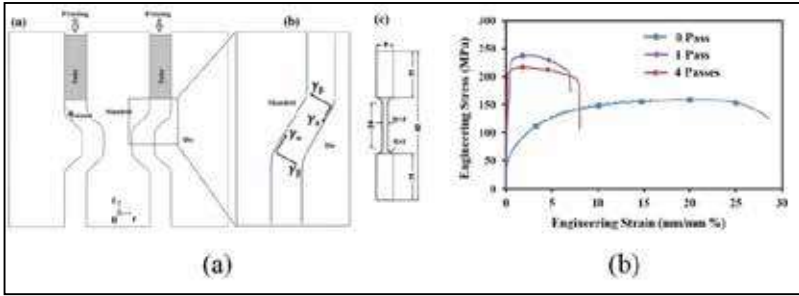
Gambar 6. (a) Mikrostruktur dan (b) kekuatan dan keuletan dari spesimen *Harmonic Structure-SUS316L* (Ameyama *et al.*, 2010).



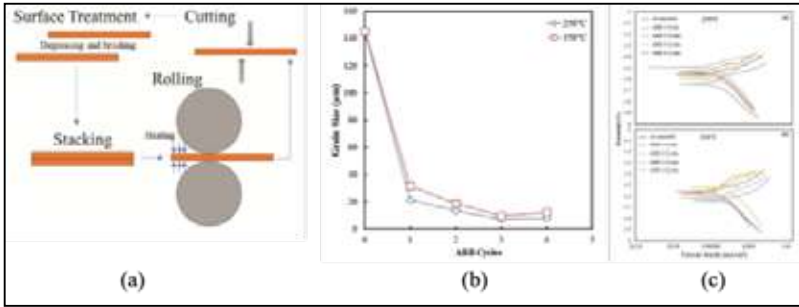
Gambar 7. (a) Kurva regangan–tegangan baja IF (*Interstitial Free*) *low carbon* dengan berbagai ukuran butir rata-rata yang berkisar dari 0.4 μm hingga 5.3 μm dengan teknik ARB. (b) Peta orientasi dengan EBSD menunjukkan mikrostruktur dengan orientasi kristalografi sejajar *rolling direction* (RD) (Tsuji *et al.*, 2019).



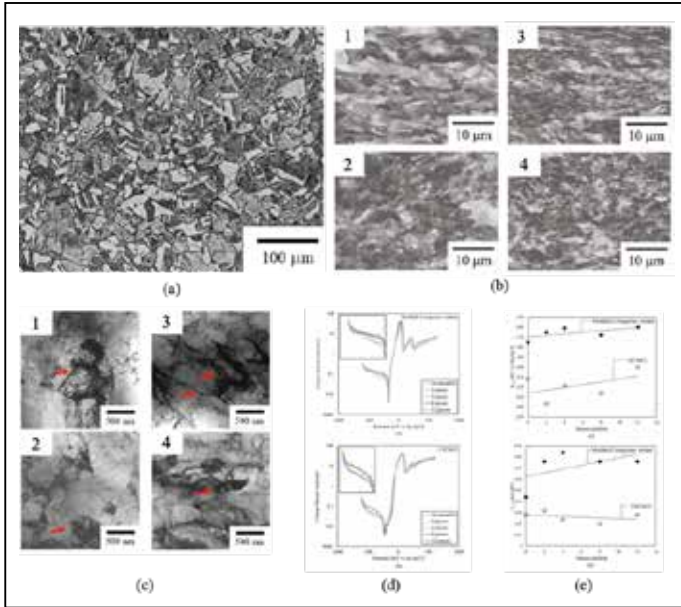
Gambar 8. Hasil penampakan permukaan specimen butiran kasar (*coarse*) dan halus (*ultra-fine*) immersion test di dalam larutan NaCl 0.6 mol/L dengan waktu yang berbeda (Rifai *et al.*, 2018b).



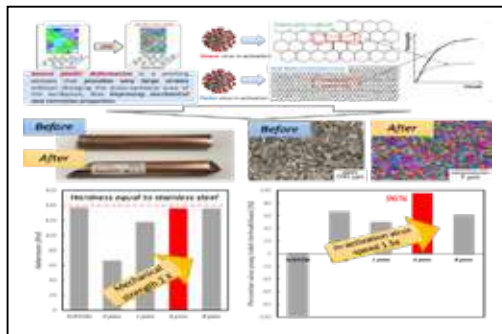
Gambar 9. (a) Skema die of TCP dan (b) hasil uji tarik sampel TCP untuk 1 dan 4 pass TCP (Farshidi *et al.*, 2023).



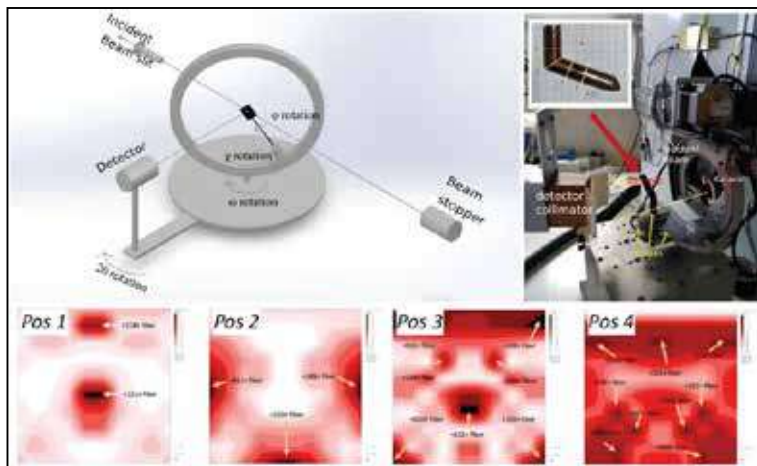
Gambar 10. Skema dari proses accumulative roll bonding (ARB); (b) ukuran butir ARB; dan (c) perilaku sifat korosi setelah proses ARB (Purnamasari *et al.*, 2021).



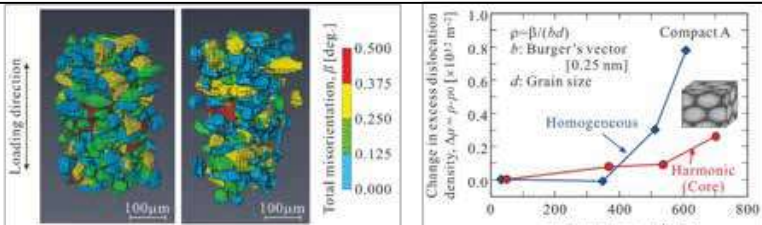
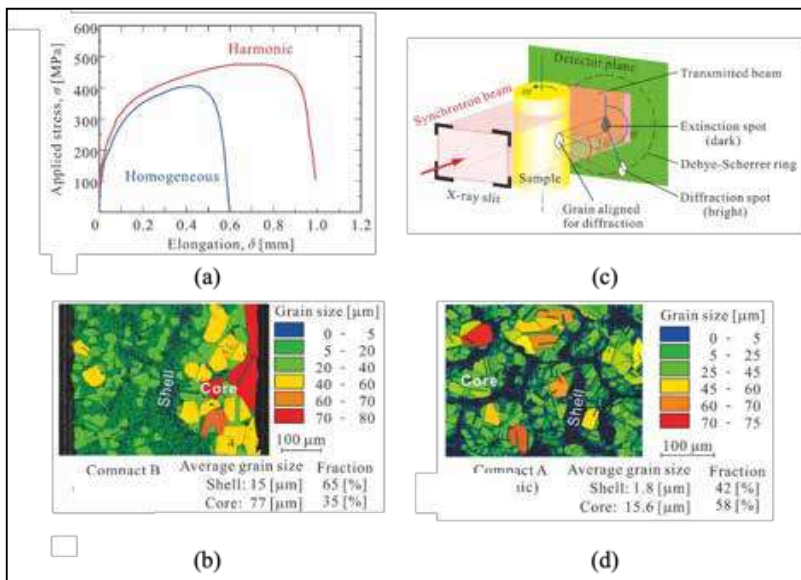
Gambar 11. (a) struktur sebelum SSE process; (b) (1) 1 pass; (2) 4 pass; (3) 8 pass dan (4) 12 pass SSE process; (c) dislokasi di dalam butir dan batas butir; (d) kurva anodic polarization; (e) pengaruh nomor pass pada arus korosi (Rifai *et al.*, 2022).

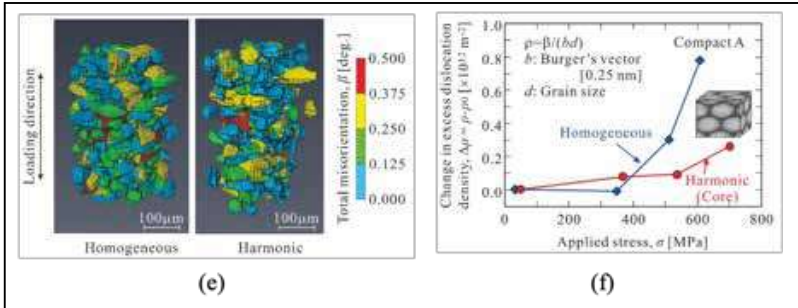


Gambar 12. Pemanfaatan logam nanostruktur untuk in-aktivasi virus COVID-19 (Rifai *et al.*, 2021).



Gambar 13. Hasil *pole figure* dari logam tembaga berbasis nanostruktur yang dikarakterisasi dengan hamburan neutron (Muslih *et al.*, 2022).





Gambar 14. (a) hasil uji tarik antara sampel dengan *harmonic structure* dan *homogeneous structure*; (b) skema kerja dari karakterisasi DCT dengan *ultra-bright synchrotron*; (c) EBSD analisis dari logam berbasis *harmonic structure*; dan (d) *homogenous structure*; (e) hasil DCT dari sampel dengan *harmonic structure* dan *homogeneous structure* dan (f) kerapatan dislokasi (Nakai et al., 2023).

DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

Jurnal Internasional

1. Farshidi, M. H., **Rifai, M.**, & Miyamoto, H. (2023). Grain refinement, texture evolutions, and strengthening of a recycled aluminium alloy subjected to tube channel pressing. *Metallic Materials/Kovové Materiály*, 61, 13–21. <https://doi.org/10.31577/km.2023.1.13>
2. Purnamasari, I. S., **Rifai, M.**, Ajiriyanto, M. K., Alhamidi, A., Mujamilah, M., Insani, A., & Prasetya, A. D. (2021). Corrosion behavior of pure magnesium processed by accumulative roll bonding for biomaterial application. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 28, 583–590. <https://doi.org/10.56042/ijems.v28i6.43477>
3. **Rifai, M.**, Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2022). Hardness and Microstructure Homogeneity of Pure Copper and Iron-Chromium Alloy Processed by Severe Plastic Deformation. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 10 (1), 1–8. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2022/011012022>
4. **Rifai, M.**, Mujamilah, M., Bagherpour, E., & Miyamoto, M. (2022). Effect of strain energy on corrosion behavior of ultrafine grained copper prepared by severe plastic deformation. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 58 (2), 335–344. <https://doi.org/10.2298/JMMB220101015R>
5. **Rifai, M.**, Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2022). Effect of Microstructure Evolution and Corrosion Behavior on Phase Transformation of Nanocrystalline SUS304 Prepared by Dry Ice Shot Peening. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 10 (1). <https://doi.org/10.30534/ijeter/2022/021012022>
6. **Rifai, M.**, Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2021). Effect of preliminary deformation on microstructure and texture of iron-chro-

- mium alloy prepared by severe plastic deformation. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 9 (12), 1468–1471. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2021/039122021>
7. **Rifai, M.**, Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2021). Microstructure and strain hardening behaviour of iron chromium alloy subjected by severe plastic deformation. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 9 (12), 1472–1476. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2021/049122021>
 8. **Rifai, M.**, Mujamilah, Miyamoto, H. (2021). Microstructure and Strain Hardening Behaviour of Iron Chromium Alloy Subjected by Severe Plastic Deformation. *Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 9 (12).
 9. Miyamoto, H., Yuasa, M., **Rifai, M.**, & Fujiwara, H. (2019). Corrosion behavior of severely deformed pure and single-phase materials. *Materials Transactions*, 60 (7), 1243–1255. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MF201935>
 10. Gostariani, R., Bagherpour, E., **Rifai, M.**, Ebrahimi, R., & Miyamoto, H. (2018). Fabrication of Al/AlN in-situ nanocomposite through planetary ball milling and hot extrusion of Al/BN: Microstructural evaluation and mechanical behavior. *Journal of Alloys and Compounds*, 768, 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.07.256>
 11. Farshidi, M. H., **Rifai, M.**, & Miyamoto, H. (2018). Microstructure evolution of a recycled Al–Fe–Si–Cu alloy processed by tube channel pressing. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 25 (10), 1166–1172. <https://doi.org/10.1007/S12613-018-1668-6>
 12. **Rifai, M.**, Yuasa, M., & Miyamoto, H. (2018). Enhanced corrosion resistance of ultrafine-grained Fe-Cr alloys with subcritical Cr contents for passivity. *Metals*, 149 (8), 1–10. <https://doi.org/10.3390/met8030149>
 13. **Rifai, M.**, Yuasa, M., & Miyamoto, H. (2018). Effect of deformation structure and annealing temperature on corrosion of ultrafine-grain Fe-Cr Alloy prepared by equal channel angular press-

ing. *International Journal of Corrosion*, 2018, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2018/4853175>

14. Asabe, T., **Rifai, M.**, Yuasa, M., & Miyamoto, H. (2017). Effect of grain size on the stress corrosion cracking of ultrafine grained Cu-10 wt% Zn alloy in ammonia. *International Journal of Corrosion*, 2017, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2017/2893276>
15. **Rifai, M.**, Miyamoto, H., & Fujiwara, H. (2015). Effects of strain energy and grain size on corrosion resistance of ultrafine grained Fe-20% Cr steels with extremely low C and N fabricated by ECAP. *International Journal of Corrosion*, 2015, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2015/386865>
16. **Rifai, M.**, Miyamoto, H., & Fujiwara, H. (2014). The effect of ECAP deformation route on microstructure, mechanical and electrochemical properties of low CN Fe-20% Cr alloy. *Materials Sciences and Applications*, 2014.
17. **Rifai, M.**, Miyamoto, H., & Fujiwara, H. (2014). Effect of ECAP deformation route on the degree of anisotropy of microstructure of extremely low CN Fe-20mass% Cr alloy. *Metals*, 4 (1), 55–63.
18. Ueno, A., Fujiwara, H., **Rifai, M.**, Zhang, Z., & Ameyama, K. (2012). Fractographical analysis on fracture mechanism of stainless steel having harmonic microstructure. *Journal of the Society of Materials Science*, 61 (8), 686–691. <https://doi.org/10.2472/JSMS.61.686>
19. Zhang, Z., **Rifai, M.**, Kobayakawa, H., Ciuca, O. P., Fujiwara, H., Ueno, A., Ameyama, K. (2012). Effects of SiO₂ particles on deformation of mechanically milled water-atomized SUS304L powder compacts. *Materials transactions*, 53 (1), 109–115. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MD201120>

Jurnal Nasional

20. Muslih, M. R., Priyanto, T. H., **Rifai, M.**, Andryansah, A., & Riasuti, R. (2022). Texture characterization of the copper produced by

ECAP process using neutron diffraction technique. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 23 (2), 2614–087. <https://doi.org/10.17146/jsmi.2022.23.5.6604>

21. **Rifai, M.**, Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2021e). The Effect of precipitation on microstructure and corrosion behaviour of ZK60 subjected to severe plastic deformation. *Metalurgi*, 36 (3), 109–118. <https://doi.org/10.14203/metalurgi.v36i3.607>
22. Prasetya, A. D., **Rifai, M.**, As'ari, A. H., Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2020). Electrochemistry study on the relationship between grain boundary state and corrosion behavior of ultrafine grained iron chromium alloy. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 21 (1), 41–46. <https://doi.org/10.17146/jsmi.2019.21.1.5640>
23. **Rifai, M.**, Yunasfi, Y., Sukirman, E., Sarwanto, Y., & Mujamilah, M. (2021). Structure and magnetic properties of Fe/Si nanoparticles prepared by high energy milling process. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 11 (2), 1–9. <https://doi.org/10.13057/ijap.v11i2.51029>
24. Handayani, A., **Rifai, M.**, Pramono, E., & Mujamilah, M. (2013). Morphology and magnetic properties of Fe/Fe-oxide core/shell nanoparticle prepared by high energy milling process in varied medium. *Indonesian Journal of Materials Science*, 151–155. <https://doi.org/10.17146/jsmi.2013.14.2.4438>
25. **Rifai, M.**, Baskan, H., Putra, D. (2003). Wall-Thickness Determination by Means of Tangential Radiography Technique using Digital Radiology (DIR) Processing. *Sigma Epsilon*, 2003.

Prosiding Internasional

26. **Rifai, M.**, Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2022d). Nanoindentation behaviour on magnesium alloy subjected by equal channel angular pressing. *AIP Conference Proceeding*, 2501 (1), 1–6. <https://doi.org/10.1063/5.0095496>
27. **Rifai, M.**, Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2022c). Microstructure, hardness and corrosion behaviour of SUS304 subjected by

- dry ice shot peening. *AIP Conference Proceeding*, 2501 (1), 1–5. <https://doi.org/10.1063/5.0095497>
28. Prasetya, A. D., **Rifai, M.**, Mujamilah, M., Sulungbudi, G. Tj., Putri, F. N., Yoviansyah, F. R., & Miyamoto, H. (2021). Corrosion behaviour of ultrafine grained pure magnesium and ZK60 prepared by equal channel angular pressing in simulated body fluid and DMEM solution. *AIP Conference Proceedings*, 2381 (1), 1–5. <https://doi.org/10.1063/5.0066262>
 29. **Rifai, M.**, Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2021d). Microstructure homogeneity of ultrafine-grained copper prepared by severe plastic deformation process. *AIP Conference Proceedings*, 2381 (1), 1–6. <https://doi.org/10.1063/5.0066261>
 30. **Rifai, M.**, Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2021c). Microstructure and strain rate sensitivity in pure magnesium subjected to severe plastic deformation. *AIP Conference Proceedings*, 2381 (1), 1–6. <https://doi.org/10.1063/5.0066260>
 31. Insani, A., Patriati, A., Sulungbudi, G. T., **Rifai, M.** (2021). Intensive Study of Ceria Microsphere Stabilized with Zirconia by The External Gelatin Method. *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2048, No. 1, p. 012016). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2048/1/012016>
 32. **Rifai, M.**, Prasetya, A. D., Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2021). Microstructure and corrosion behaviour of ultrafine-grained pure magnesium by severe plastic deformation as a biodegradable material. *Journal of Physics: Conference Series*, 1825 (1), 1–6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1825/1/012086>
 33. Insani, A., **Rifai, M.**, Prasetya, A. D. (2021). XRD study of ceria stabilized zirconia (CSZ) microsphere synthesized by external gelation. *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1825, No. 1, p. 012064). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1825/1/012064>
 34. Prasetya, A. D., **Rifai, M.**, Mujamilah, M., & Miyamoto, H. (2020). X-ray diffraction (XRD) profile analysis of pure ECAP-annealing

- Nickel samples. *Journal of Physics: Conference Series*, 1436 (1), 1–7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012113>
35. **Rifai, M.**, Mujamilah, M., Muslich, M. R., Ridwan, R., Sarr, M. M., & Miyamoto, H. (2020). Neutron diffraction and the residual stress distribution of magnesium processed by equal channel angular pressing. *Journal of Physics: Conference Series*, 1436 (1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012034>
 36. **Rifai, M.**, & Miyamoto, H. (2019). Effect of stored energy on corrosion fatigue properties of ultrafine grained Fe-20% Cr steel by equal channel angular pressing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 673 (1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/673/1/012131>
 37. Yuasa, M., Furukawa, R., **Rifai, M.**, & Miyamoto, H. (2017). Corrosion resistance of magnesium alloys processed by equal channel angular pressing. *Proceeding of Harris Foundation Research Presentation*, 2017 (1), 25–29. <https://doi.org/undefined>
 38. Hirota, K., Ge, X., Kato, M., & **Rifai, M.** (2016). The microstructure and mechanical properties of ZrO₂-Al₂O₃ thick film formed on the SUS304 sheet using thermal spray. *Proceeding of Harris Foundation Research Presentation*, 2016 (1), 96–101. <https://doi.org/undefined>
 39. **Rifai, M.**, Haga, R., Miyamoto, H., & Fujiwara, H. (2013). Microstructure quantification and mechanical properties of ultrafine grained Fe-Cr alloys and pure copper by equal channel angular pressing. *Proceedings of the 8th Pacific Rim International Congress on Advanced Materials and Processing*, 2013 (1), 3329–3335. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48764-9_412
 40. Abiko, M., Miyamoto, H., Fujiwara, H., & **Rifai, M.** (2015). Fatigue properties of UFG low C, N, ferrite stainless steel produced by ECAP. *Proceeding Processing and Fabrication of Advanced Material XXIV*, 21 (1), 712–721.
 41. **Rifai, M.**, Miyamoto, H., & Fujiwara, H. (2014). Effect of deformation route on the development of low CN Fe-20% Cr alloy by Equal Channel Angular Pressing. *IOP Conference Series: Mate-*

rials Science and Engineering (Vol. 63, No. 1, p. 012122). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/63/1/012122>

42. Tomita, R., Kaneko, Y., Miyamoto, H., & **Rifai, M.** (2014). ECAP Processing history dependence of low cycle fatigue properties of processed ferritic stainless steel. M&M Mechanics of Materials Conference, *Japan Society of Mechanical Engineers*, 2014 (1), 1–3. <https://doi.org/undefined>
43. Miyamoto, H., **Rifai, M.**, & Fujiwara, H. (2014). Severe plastic deformation as a new processing for enhancing the performance of metallic components. *Proceedings of the First International Conference on Construction*.
44. Ameyama, K., Fujiwara, H., Sekiguchi, T., Sabrina N. B. R., & **Rifai, M.** (2010). Creation of harmonic structure materials with outstanding mechanical properties. *International Symposium on Giant Straining Process for Advanced Materials Proceedings*, 2010 (1), 35–46. <https://doi.org/unidentified>

Prosiding Nasional

45. **Rifai, M.** (2006) Thickness Determination of Corroded Plat with Digital Industrial Radiology (DIR). *National Seminar on The Development Research and Technology in Industry 2006*.
46. **Rifai, M.**, Rukijatmo. (2005). Study of Election Voltage and Beam Current Radiation for Pilot Plant as Flue Gas Treatment of PLTU Coal-Suralaya. *National Seminar on The Development Research and Technology in Industry 2005*.
47. **Rifai, M.** (2004) Radiograph Reference For Personnel Certification of Radiographic Testing. *National Seminar on The Development Research and Technology in Industry 2004*.
48. **Rifai, M.**, Widjanarko. (2004) Determination Silver Concentration on Waste of Result Non-Destructive Testing Radiography Personnel Certification Using Atomic Absorption Spectrophotometer. *National Seminar on Material Science and Technology 2004*.

49. **Rifai, M.**, Tjipto, S. (2004) Study on Ru Ion Implantation to CeO_2 and TiO_2 Thin Film For Gas Sensing Application Using SRIM/TRIM 1996, *National Seminar on Material Science and Technology 2004*.
50. **Rifai, M.**, Baskan, H. (2003) Non-Destructive Testing and Equipment Maintenance Program in Product Quality Assurance. *National Seminar on Standardization and Quality Assurance 2003*.
51. **Rifai, M.** (2003) Standardization of System Non-Destructive Testing-Radiography Qualification and Certification of Personnel. *National Seminar on Monitoring Nuclear Energy 2003*.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. Data Pribadi

Nama Lengkap	: Muhammad Rifai
Tempat/Tgl. Lahir	: Yogyakarta, 22 Oktober 1980
Anak ke	: Pertama dari dua bersaudara
Nama Ayah Kandung	: Muhammad Taufik
Nama Ibu Kandung	: Sri Sumarsih
Nama Istri	: Selli Reviona
Jumlah Anak	: 2 (dua)
Nama Anak	: Muhammad Rafa Muhammad Razzaq
Nama Instansi	: Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN)
Judul Orasi	: Teknologi Nuklir dalam Pengembangan Proses Logam Nanostruktur
Bidang Kepakaran	: Logam, Paduan dan Intermetalik
No. SK Pangkat Terakhir	: Keppres Nomor 13/K Tahun 2023 Tanggal 13 Juni 2023 TMT 1 April 2023
No. SK Peneliti Ahli Utama	: Keppres Nomor 2/M Tahun 2023 Tanggal 9 Januari 2023 TMT 25 Januari 2023

B. Pendidikan Formal

No.	Jenjang	Nama Sekolah/ PT/ Universitas	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
1.	SD	SD Muhammadiyah Sukonandi	Yogyakarta/ Indonesia	1992
2.	SMP	SMP N 6	Yogyakarta/ Indonesia	1995
3.	SMA	SMU N 4	Yogyakarta/ Indonesia	1998
4.	S1	Universitas Gadjah Mada	Yogyakarta/ Indonesia	2002
5.	S2	Ritsumeikan University	Shiga/ Jepang	2011
6.	S3	Doshisha University	Kyoto/ Jepang	2015

C. Pendidikan Non-Formal

No.	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
1.	Post doctoral program at Mechanical and System Engineering, Doshisha University, Japan	Kyoto/ Jepang	2018

D. Jabatan Struktural

No.	Jabatan	Instansi	Tahun Menjabat
1.	Kepala Pusat Riset Teknologi Akselerator	Badan Riset dan Inovasi Nasional	2022 - Sekarang

E. Jabatan Fungsional

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1.	Peneliti Ahli Muda	18 Juni 2019
2.	Peneliti Ahli Madya	4 November 2020
3.	Peneliti Ahli Utama	25 Januari 2023

F. Penugasan Khusus Nasional/Internasional

No.	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
1.	Anggota Delegasi Indonesia dalam Kegiatan Kunjungan ke Fasilitas Teknologi Akselerator di TINT, SLRI dan SUT Thailand pada bulan Agustus 2022	Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional	2022
2.	Anggota Delegasi Indonesia dalam Kegiatan Kunjungan ke Fasilitas Teknologi Akselerator di KAERI, SKKU dan Jeju Hospital Korea pada bulan Agustus 2023	Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional	2023

G. Ikutsertaan dalam Kegiatan Ilmiah

Kegiatan Ilmiah di Luar Negeri

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota,Negara)	Tahun
1.	Broad Exposure to Science and Technology 2019 dengan judul Effect of stored energy on corrosion fatigue properties of ultrafine grained Fe-20% Cr steel by equal channel angular pressing	Pembicara	Bali	2019
2.	International Conference on Nuclear Capacity building, Education, Research and Applications 2019 dengan judul Neutron diffraction and the residual stress distribution of magnesium processed by equal channel angular pressing	Pembicara	Yogyakarta	2019

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota,Negara)	Tahun
3.	International Conference on Nuclear Science, Technology, and Application 2020 dengan judul Microstructure and Strain Rate Sensitivity in Pure Magnesium Subjected to Severe Plastic Deformation	Pembicara	Online	2020
4.	Broad Exposure to Science and Technology 2021 dengan judul Effect of Preliminary Deformation on Microstructure and Texture of Iron-Chromium Alloy Prepared by Severe Plastic Deformation	Pembicara	Online	2021
5.	The 4th International Conference on Nuclear Energy Technologies and Sciences dengan judul NanoIndentation Behaviour on Magnesium Alloy Subjected by Equal Channel Angular Pressing	Pembicara	Online	2021

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
6.	NanoSPD 6 dengan judul Effect of deformation route on the development of low CN Fe-20%Cr alloy by Equal Channel Angular Pressing.	Pembicara	France	2014
7.	Processing and Fabrication of Advanced Materials XXIV dengan judul Fatigue Properties of UFG Low C, N Ferrite Stainless Steel Produced by ECAP	Pembicara	Osaka	2015
8.	International workshop on giant straining process for advanced materials (GSAM 2016) dengan judul Microstructure and corrosion properties of ultrafine-grained copper by simple shear extrusion	Pembicara	Fukuoka	2016

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota,Negara)	Tahun
9.	The 54th Joint Symposium Harris Research Presentation 2016 dengan judul The Microstructure and Mechanical Properties of ZrO ₂ -Al ₂ O ₃ Thick Film Formed on the SUS304 Sheet using Thermal Spray	Pembicara	Kyoto	2016
10.	Annual Meeting of Harris Foundation Doshisha University, 2017 dengan judul Corrosion Resistance of Tembaga Alloys Processed by Equal Channel Angular Pressing	Pembicara	Kyoto	2017
11.	The 15th International Conference on Advanced Materials, IUMRS-ICAM Title: High Strength and Super Corrosion Resistance of Ultrafine-grained Iron Chromium Alloy by Equal Channel Angular Pressing	Pembicara	Kyoto, Japan	2017

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
12.	JIM-ISIJ Annual Meeting 2017 Title: Corrosion behavior of ultrafine-grained iron chromium alloy by equal channel angular pressing	Pembicara	Sapporo, Japan	2017
13.	JIM-ISIJ Annual Meeting 2016 Title: Corrosion behavior of ultrafine grained copper by simple shear extrusion	Pembicara	Osaka, Japan	2016
14.	International Symposium on Giant Straining Process for Advanced Material (GSAM 2016) Title: Microstructure and corrosion properties of ultrafine-grained copper by simple shear extrusion.	Pembicara	Kyushu, Japan	2016

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota,Negara)	Tahun
15.	The 23rd International Conference on Nuclear Engineering Title: Model simulation of geometry and stress-strain variation of BATAN fuel pin prototype-01 during irradiation test in RSG-GAS Reactor.	Pembicara	Chiba, Japan	2015.
16.	NanoSPD 2014, The 6th International Conference on Nanomaterials by SPD Title: Effect of deformation route on the development of low CN Fe-20%Cr alloy by equal channel angular pressing.	Pembicara	METZ,France	2014
17.	JIM-ISIJ Annual Meeting 2014 Title: Effect of ECAP deformation route on microstructure development of low CN Fe-20%Cr ultrafine-grained.	Pembicara	Tokyo, Japan	2014

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota,Negara)	Tahun
18.	PRICM 8, The 8th Pacific RIM International Congress on Advanced Materials and Processing Title: Microstructure quantification and mechanical properties of ultrafine grained Fe-Cr alloys and pure copper by ECAP.	Pembicara	Waikoloa, Hawaii, USA	2013
19.	4th International Symposium on Nanostructure (OZ- 11) Title: Tensile deformation and fracture behavior of SUS316L and SUS304L austenitic stainless steel compacts with harmonic microstructure.	Pembicara	Shiga, Japan	2011

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota,Negara)	Tahun
20.	International Symposium on Giant Straining Process for Advanced Material (GSAM 2010) Title: Strain hardening and fracture behavior of SUS304L and SUS316L austenitic stainless steel compacts with harmonic microstructure.	Pembicara	Kyushu, Japan	2010
21.	Rits-Beihang Research Exchange Joint Symposium Title: Microstructure and fracture mechanism of austenitic stainless steel compacts with harmonic structure.	Pembicara	Shiga, Japan	2010
22.	The 7th AONSA School-Neutron diffraction/3rd MLF	Pembicara	Tokai, Japan	2015
23.	Nondestructive Inspection for Quality Management and Plant Assessment	Pembicara	Kitakyushu, Japan	2008

Kegiatan Ilmiah di Dalam Negeri

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
1.	Lead Assesor OHSAS 18000 at SGS, Indonesia	Peserta	Jakarta, Indonesia	2009
2.	Transition Lead Auditor/Auditor ISO 9001 at SGS, Indonesia	Peserta	Jakarta, Indonesia	2009
3.	Lead Auditor/ Auditor ISO 14001 at SGS, Indonesia	Peserta	Jakarta, Indonesia	2008
4.	Assessor for ISO/ IEC 17020:1998 Inspection Bodies at KAN, Indonesia	Peserta	Jakarta, Indonesia	2007
5.	Laboratory Accreditation ISO 17025 at PSJMN, Indonesia	Peserta	Jakarta, Indonesia	2004
6.	Application of nuclear technique in industry and environment available for safety of nuclear facility at BATAN and JAERI, Indonesia	Peserta	Jakarta, Indonesia	2004

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
7.	Radiation measurement and gamma spectroscopy at BATAN and JAERI, Indonesia	Peserta	Jakarta, Indonesia	2003
8.	Industrial Radiographic Testing Level 1 at BATAN, Indonesia	Peserta	Jakarta, Indonesia	2003
9.	Industrial Accelerator at BATAN, Indonesia	Peserta	Jakarta, Indonesia	2003

H. Keterlibatan dalam Pengelolaan Jurnal Ilmiah

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/ Tugas	Tahun
1.	Jurnal Sains Materi Indonesia	PSTBM, BATAN	Chief Editor	2018–2022
2.	I-Concern International Proceeding	IOP	Chief Editor	2019
3.	ICONSTA 2019 International Proceeding	AIP	Chief Editor	2020
4.	Material Transactions	JIM	Reviewer	2023
5.	Metal and Material International	Springer	Reviewer	2023

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/ Tugas	Tahun
6.	Journal of Mining and Metallurgy, Section B:Metallurgy	SCIndexs	Reviewer	2022
7.	Jurnal Teknik	Untirta	Editor dan Reviwer	2019-2020
8.	BEST 2019	IOP	Reviewer	2019
9.	International Conference and Workshop Material Science and Technology 2018	IOP	Editor and Reviewer	2018

I. Karya Tulis Ilmiah

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Sebagai penulis tunggal	1
2.	Bersama penulis lainnya	50
	Total	51

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Indonesia	6
2.	Bahasa Inggris	45
	Total	51

No.	Kualifikasi Publikasi	Jumlah
1.	Jurnal	25
2.	Prosiding	26
	Total	51

J. Pembinaan Kader Ilmiah

No.	Nama Perguruan Tinggi	Tahun Mengajar
1.	Doshisha University, Jepang	2016-2018

No.	Nama	PT/ Universitas	Peran/Tugas	Tahun
1.	Tatsuya Sekiguchi	Ritsumeikan University	Researcher	2015
2.	Takuma Asabe	Doshisha University, Japan	Co-supervisor	2016– 2018
3.	Abiko	Doshisha University, Japan	Co-supervisor	2016- 2018
4.	Yosuke Kasazaki	Doshisha University, Japan	Co-supervisor	2016
5.	Yamaguchi	Doshisha University, Japan	Co-supervisor	2016
6.	Mayu Asano	Doshisha University, Japan	Researcher	2016 –2018
7.	Gostariani	Shiraz University, Iran	Researcher	2018
8.	Alijani, Fatemeh	Payame Noor University, Iran	Researcher	2019
9.	Muhammad Ivan Pratama	Untirta	Academic supervisor	2020
10.	Titan	Untirta	Academic supervisor	2020

No.	Nama	PT/ Universitas	Peran/Tugas	Tahun
11.	Purnamasari IS	Untirta	Academic supervisor	2020

K. Organisasi Profesi Ilmiah

No.	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1.	Anggota	Japan Institute of Metal	2009–2018
2.	Anggota	ISIJ, Jepang	2009–2018
3.	Anggota	Consortium Bulk Nanostructure Metal	2009– sekarang
4.	Anggota	Himpenindo	2019–2021
5.	Anggota	PPI	2021– sekarang

I. Tanda Penghargaan

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1.	Excellent Poster Award at International Symposium on Giant Straining Process for Advanced Material (GSAM 2010), Fukuoka, Japan, Fukuoka, Jepang, 19- 22 November 2010	Bulk Nanostructured Metal Consortium	2010

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
2.	Poster Award at German-Japan Nanotechnology International Conference, OZ-13 , Kyoto, Japan, 3-5 Maret 2013	German-Japan Nanotechnology International Conference	2013
3.	Satya Lencana Karya Satya X Tahun	Presiden RI	2013
4.	Satya Lencana Karya Satya XX Tahun	Presiden RI	2023

Buku ini tidak untuk diperjualbelikan

Peran teknik nuklir dalam pengembangan teknologi proses logam nanostruktur mencakup tentang bagaimana teknik nuklir, seperti hamburan neutron dan sinar-X *synchrotron* digunakan untuk karakterisasi mendalam material nanostruktur, yang memungkinkan pemahaman yang lebih baik tentang sifat-sifat material ini dan memfasilitasi pengembangan material dengan karakteristik yang disesuaikan untuk berbagai aplikasi praktis.

Orasi Teknologi Nuklir dalam *Pengembangan Teknologi Proses Logam Nanostruktur* bertujuan untuk menyoroti pentingnya kerja sama antar disiplin untuk mendorong inovasi dan aplikasi teknologi material nanostruktur dalam berbagai sektor. Orasi ini diharapkan dapat memberikan pemahaman tentang bagaimana integrasi teknik nuklir dalam penelitian dan pengembangan logam nanostruktur berpotensi memajukan pemahaman kita tentang material ini dan mengoptimalkan penggunaannya di industri dan medis. Orasi ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber referensi bagi peneliti atau akademisi untuk pembelajaran terkait teknik nuklir dalam pengembangan teknologi proses logam nanostruktur.

BRIN Publishing
The Legacy of Knowledge

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Gedung B.J. Habibie Lt. 8,
Jln. MH. Thamrin No. 3,
Kota Jakarta Pusat 10340
Email: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.1261



ISBN 978-623-8372-92-8



9 786238 372928