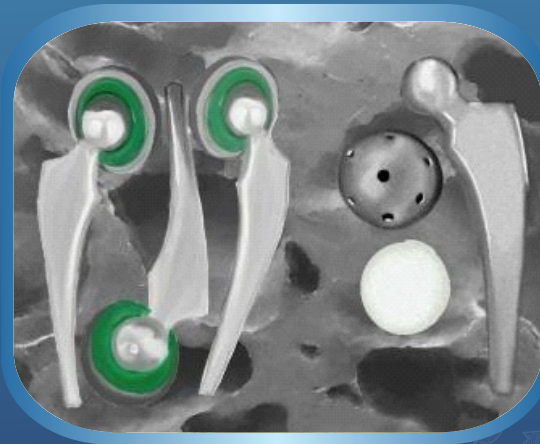


ORASI ILMIAH: RISET DAN INOVASI

PENGEMBANGAN MATERIAL IMPLAN TULANG PERMANEN DAN SEMENTARA UNTUK Mendukung Kemandirian Kesehatan Nasional: Sinergi Antara Riset Material dan Tantangan Demografi Indonesia

**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
ILMU TEKNIK
BIDANG METALURGI DAN MATERIAL
KEPAKARAN LOGAM DAN PADUAN**



**OLEH:
IKA KARTIKA**

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

Buku ini tidak diperjualbelikan.

**PENGEMBANGAN MATERIAL IMPLAN
TULANG PERMANEN DAN SEMENTARA
UNTUK MENDUKUNG KEMANDIRIAN
KESEHATAN NASIONAL: SINERGI ANTARA
RISET MATERIAL DAN TANTANGAN
DEMOGRAFI INDONESIA**

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Diterbitkan pertama pada 2025 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/>



**PENGEMBANGAN MATERIAL
IMPLAN TULANG PERMANEN DAN
SEMENTARA UNTUK MENDUKUNG
KEMANDIRIAN KESEHATAN NASIONAL:
SINERGI ANTARA RISET MATERIAL DAN
TANTANGAN DEMOGRAFI INDONESIA**

**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
ILMU TEKNIK
BIDANG METALURGI DAN MATERIAL
KEPAKARAN LOGAM DAN PADUAN**

**OLEH:
IKA KARTIKA**

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2025 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Pusat Riset Metalurgi

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Pengembangan Material Implan Tulang Permanen dan Sementara untuk Mendukung Kemandirian Kesehatan Nasional: Sinergi Antara Riset Material dan Tantangan Demografi Indonesia/Ika Kartika-Jakarta: Penerbit BRIN, 2025.

xvii + 95 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISSN 3090-8485

- | | |
|----------------------------------|----------------------------------|
| 1. Implan tulang permanen | 4. Paduan logam berpori Mg-Ca-Zn |
| 2. Implan tulang sementara | 5. Paduan Ti-6Al-4V |
| 3. <i>Total hip arthroplasty</i> | |

617.47

Copy editor : Meita Safitri
Proofreader : Martinus Helmiawan
Penata Isi : Meita Safitri
Desainer Sampul : Meita Safitri

Edisi pertama : November 2025



Diterbitkan oleh:

Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie Lt. 8, 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 diperjualbelikan.

DAFTAR ISI

BIODATA RINGKAS	xi
PRAKATA PENGUKUHAN	xv
I. PENDAHULUAN.....	1
II. PERKEMBANGAN GLOBAL MATERIAL UNTUK IMPLAN TULANG PERMANEN DAN SEMENTARA	5
A. Perkembangan Disain dan Material THA Sebagai Implan Tulang Permanen.....	5
B. Perkembangan Material Berpori Berbasis Magnesium sebagai Implan Sementara	12
III. PENGEMBANGAN NASIONAL MATERIAL DAN IMPLAN TULANG PERMANEN DAN SEMENTARA	21
A. Pengembangan Material Implan Tulang Permanen.....	21
B. Pengembangan Implan Sementara dari Paduan Logam Berpori	29
IV. IMPLIKASI STRATEGIS IMPLAN PERMANEN DAN IMPLAN SEMENTARA TERHADAP KEUNGGULAN INSTITUSI RISET	39
A. Pengembangan Implan Permanen Berbasis Paduan Co-Cr-Mo dan Titanium.....	39
B. Pengembangan Implan Sementara Berbasis Paduan Magnesium Berpori.....	40
C. Implikasi Strategis Terhadap Institusi Riset.....	42
V. MENJAWAB TANTANGAN MASA DEPAN: STRATEGI PENGEMBANGAN IMPLAN TULANG PERMANEN DAN SEMENTARA	45
A. Tantangan dalam Pengembangan Implan Tulang Permanen	45
B. Tantangan dalam Pengembangan Implan Sementara Berbasis Logam Berpori.....	46
C. Peran <i>Stakeholder</i> dalam Menjawab Tantangan.....	48
D. Integrasi dengan Teknologi Pendukung dan Agenda Nasional.	48

VI. KESIMPULAN	51
VII. PENUTUP.....	53
UCAPAN TERIMA KASIH	55
DAFTAR PUSTAKA.....	59
DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH.....	71
DAFTAR PUBLIKASI LAINNYA.....	87
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	91

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Disain paling awal dari implan THA yang merevolusi bedah ortopedi.....	6
Gambar 1.2	Baja tahan karat 316L implan Charnley <i>prosthesis</i> dari Royal United Hospital setelah 4 tahun diimplankan.....	7
Gambar 1.3	Perbandingan modulus Young tulang dan biomaterial logam.....	10
Gambar 1.4	Jenis logam berpori.....	16
Gambar 1.5	Ilustrasi yang menunjukkan pertumbuhan tulang ke dalam struktur pori.....	17
Gambar 1.6	Kurva DTA TGA campuran Mg dan CaCO_3 dengan rasio mol yang sama sebagai dasar temperatur proses <i>sintering</i>	18
Gambar 2.1	Foto mikrostruktur hasil citra SEM paduan Co-Cr-Mo dengan penambahan karbon 0,25 % berat.....	22
Gambar 2.3	Proses pemasangan disain awal THA pada cadaver dengan ortopedist di RSUPN Cipto Mangunkusumo.....	27
Gambar 2.3	Citra SEM pada berbagai komposisi paduan Mg-Ca-Zn dengan senyawa pengembang CaH_2	33
Gambar 2.4	Efek <i>thermal pre-treatment</i> TiH_2 sebagai kinetika pelepasan gas hidrogen dari senyawa pengembang TiH_2	35
Gambar 2.5	Citra SEM paduan Mg-Ca-Zn setelah proses sinterring pada $T=550^\circ\text{C}$ selama 3 jam.....	36
Gambar 2.6	Performa mekanis sekrup kompresi Herbert pada paduan Mg berpori.....	37
Gambar 2.7	Hasil uji in-vivo viabilitas sel setelah 15 hari pada paduan berpori Mg-1Ca-10Zn-3TiH ₂ menghasilkan 50% sel hidup.....	38

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Karakteristik mekanik tulang dan magnesium serta paduannya.....	21
-----------	---	----

Buku ini tidak diperjualbelikan.

BIODATA RINGKAS



Ika Kartika, lahir di Bandung, pada tanggal 25 Januari 1972 merupakan anak ke dua dari Bapak Iro Karnawijaya (almarhum) dan Ibu Imas Rokayah (almarhumah). Menikah dengan Iwan Kurniawan S.KM dan dikaruniai seorang putera, yaitu Muhammad Zaydan Kamil.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 3/M Tahun 2022 tanggal 19 Januari 2022 yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama terhitung mulai 1 Oktober 2021.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional Nomor 220/I/HK/2025, tanggal 11 November 2025 tentang Majelis Pengukuhan Profesor Riset, yang bersangkutan dapat melakukan Orasi Ilmiah Pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Negeri Halimun III Bandung, tahun 1984, Sekolah Menengah Pertama Negeri 13 Bandung, tahun 1987, dan Sekolah Menengah Atas Negeri 12 Bandung, tahun 1990. Memperoleh gelar Sarjana Teknik Metalurgi dari Universitas Jenderal Achmad Yani Bandung tahun 1996, gelar Magister Teknik Material dari Institut Teknologi Bandung tahun 2006, dan gelar Doktor bidang *Material Processing* dari Universitas Tohoku Jepang tahun 2009.

Mengikuti beberapa pelatihan yang terkait dengan bidang kompetensinya, antara lain: *Heat Treatment and Surface Engineering in Industry*, Pelatihan JICA, Osaka, Jepang

(Desember 2000), Pelatihan Teknologi Pembuatan Implan Menggunakan *electron beam melting (EBM)* di Institute for Materials Research Tohoku University Japan (Oktober 2014), *Development of Nickel-Free Cobalt Base Alloy for Intravascular Stent*, GMIRT, Institute for Materials Research Tohoku University Jepang (Juli 2019), *Japan Decarbonizations Activities*, NEDO Jepang (Maret 2024), *International Symposium on Critical Metals for Battery Production from Primary and Alternative Resources*, Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia (Juli 2024).

Pernah menduduki jabatan struktural sebagai Kepala Sub Bidang Rekayasa Metalurgi Pusat Penelitian Metalurgi LIPI (tahun 2010–2012), Kepala Bidang Metalurgi Ekstraksi Pusat Penelitian Metalurgi LIPI (tahun 2012–2014), dan Kepala Bidang Pengelolaan dan Diseminasi Hasil Penelitian Pusat Penelitian Metalurgi dan Material-LIPI (tahun 2014–2019), Kepala Pusat Riset Metalurgi BRIN (tahun 2022–masih menjabat di 2025).

Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Asisten Peneliti Muda golongan III-a tahun 2000, Asisten Peneliti Madya golongan III-b tahun 2003, Peneliti Ahli Muda golongan III-b tahun 2004, Peneliti Ahli Muda golongan III-c tahun 2007, Peneliti Ahli Muda gol. III-d tahun 2011, Peneliti Ahli Madya golongan IV-a tahun 2015, Peneliti Ahli Madya golongan IV-b tahun 2017 dan memperoleh jabatan Peneliti Ahli Utama golongan IV-b bidang Metalurgi dan Material tahun 2020.

Menghasilkan 85 (delapan puluh lima) karya tulis ilmiah (KTI) bersama penulis lain dalam bentuk buku, jurnal, dan prosiding. Sebanyak 56 (lima puluh enam) KTI ditulis dalam bahasa Inggris.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing jabatan fungsional peneliti, pembimbingan karya

tulis ilmiah untuk instansi BMKG, BPOM, pembimbing skripsi (S-1) pada Universitas Pertamina, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Universitas Teknologi Sumbawa, Universitas Negeri Islam Syarif Hidayatullah Jakarta, pembimbing tesis (S-2) pada Institut Teknologi Bandung, dan Universitas Indonesia; pembimbing disertasi (S-3) pada Universitas Indonesia dan Swinburne University of Technology Australia; serta penguji disertasi (S-3) pada Universitas Indonesia dan Institut Pertanian Bogor.

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, yaitu sebagai anggota *Japan Institute of Metals and Materials* JIMM (2007–2009), anggota Masyarakat Biomaterial Indonesia (2011–2013), anggota Himpunan Peneliti Indonesia HIMPENINDO (2018–2020), dan anggota Persatuan Peneliti Indonesia PPI (2022–2025). Menerima tanda penghargaan Satyalancana Karya Satya X Tahun (2011), Satyalancana Karya Satya XX Tahun (2018) dari Presiden RI.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillaahirrahmaanirrahiim.

Assalaamu 'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Kepala Instansi yang mulia dan hadirin yang saya hormati.

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

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya pada tanggal (tanggal/bulan/tahun orasi dilaksanakan) menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

**“PENGEMBANGAN MATERIAL IMPLAN TULANG
PERMANEN DAN SEMENTARA UNTUK MENDUKUNG
KEMANDIRIAN KESEHATAN NASIONAL: SINERGI
ANTARA RISET MATERIAL DAN TANTANGAN
DEMOGRAFI INDONESIA”**

Orasi ini menyajikan *state of the art* mengenai kebutuhan implan tulang di Indonesia yang erat kaitannya dengan dinamika demografi dan tantangan kesehatan masyarakat. Dalam konteks ini, demografi merujuk pada struktur dan dinamika kependudukan Indonesia yang meliputi pertumbuhan jumlah penduduk, distribusi usia, serta perubahan pola penyakit seiring

Buku ini tidak diperjualbelikan.

bertambahnya usia harapan hidup masyarakat. Peningkatan jumlah penduduk lanjut usia, tingginya angka kecelakaan, serta prevalensi penyakit degeneratif mendorong urgensi pengembangan implan tulang permanen dalam negeri. Di sisi lain, dalam kasus pediatrik seperti kerusakan tulang tengkorak maupun patah tulang yang terjadi di dekat daerah pertumbuhan tulang, menuntut hadirnya implan sementara yang terdegradasi yang dapat menyatu dengan tulang alami seiring pertumbuhan pasien.

Dengan demikian, penguasaan teknologi material implan di Indonesia perlu diarahkan pada dua jalur strategis:

- 1) Implan permanen, berbasis paduan logam seperti titanium, untuk menopang kebutuhan jangka panjang pada pasien degeneratif dan trauma berat.
- 2) Implan sementara yang terdegradasi, seperti paduan berbasis magnesium untuk pasien anak dan kasus tertentu, sehingga tidak memerlukan operasi pengangkatan ulang.

Agenda ini memiliki makna strategis, bukan hanya dari sisi kesehatan dan kesejahteraan sosial, tetapi juga sebagai upaya penguatan kemandirian nasional. Dari sisi kesehatan, ketersediaan implan yang sesuai kebutuhan akan meningkatkan kualitas hidup pasien dan mempercepat pemulihan. Dari sisi ekonomi, penguasaan teknologi ini berpotensi menciptakan industri manufaktur berbasis riset, membuka lapangan kerja baru, dan menekan ketergantungan impor. Secara makro, arah ini mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDG 3: *Good Health and Wellbeing*) serta Asta Cita Pemerintah khususnya terkait peningkatan kualitas sumber daya manusia, penguasaan ilmu pengetahuan dan teknologi, serta penguatan kemandirian ekonomi berbasis riset dan inovasi.

Peta jalan riset menunjukkan arah yang konsisten. Pada periode 2017–2019, penelitian difokuskan pada disain purwarupa *total hip arthroplasty* (THA). Tahun 2020, dilakukan uji coba purwarupa THA pada kadaver disertai evaluasi ortopedis RSUPN Cipto Mangunkusumo. Periode 2020–2024 sesuai Program Prioritas Riset Nasional (PRN) implan tulang melahirkan paten dan prototipe THA berbasis paduan Ti-6Al-4V yang disesuaikan dengan antropometri wanita Indonesia dewasa. Paralel dengan itu, sejak 2012–2017 telah dikembangkan material terdegradasi berbasis magnesium, dari paduan biner Mg-Ca hingga paduan logam berpori (*metal foam*) Mg-Ca-Zn, sebagai langkah menuju implan tulang sementara yang lebih adaptif terhadap kondisi biologis pasien.

Dengan pendekatan multidisiplin, riset implan tulang ini bukan sekadar menjawab kebutuhan medis, melainkan juga memperkuat posisi Indonesia dalam rantai nilai global, mendukung pembangunan berkelanjutan, dan mewujudkan visi bangsa yang sehat, mandiri, serta berdaya saing.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

I. PENDAHULUAN

Indonesia menghadapi dinamika demografi dan kesehatan yang semakin kompleks. Berdasarkan proyeksi BPS (Badan Pusat Statistik), jumlah penduduk diperkirakan mencapai 284,44 juta jiwa pada pertengahan 2025, meningkat dari 281,60 juta jiwa pada 2024 (BPS, 2025b). Seiring itu, angka harapan hidup terus naik menjadi 72,67 tahun, dengan proporsi penduduk lanjut usia pada 2023 telah mencapai 11,75% (Rizaty, 2024). Tren ini sejalan dengan laporan WHO yang menyebutkan bahwa populasi lansia global akan meningkat dua kali lipat pada 2050, dengan 80% di antaranya tinggal di negara berpenghasilan rendah-menengah (Senopati et al., 2023). Di Indonesia, BPS memproyeksikan jumlah lansia mencapai 72 juta jiwa atau 21,9% dari populasi pada 2050 (BPS, 2023). Konsekuensi penuaan populasi adalah meningkatnya penyakit degeneratif, termasuk osteoporosis, dengan prevalensi pada usia >50 tahun mencapai 32,3% pada wanita dan 28,8% pada pria (Lita et al., 2019; Utomo et al., 2021). Di sisi lain, tingginya angka kecelakaan lalu lintas juga memperbesar kebutuhan akan implan tulang. Pada 2022, tercatat 13.364 kasus cedera berat akibat kecelakaan (BPS, 2025a), sementara BPJS Kesehatan melaporkan rata-rata 50.000 pemasangan implan tulang setiap tahun. Kondisi ini semakin diperberat oleh kerentanan geografis Indonesia terhadap bencana alam, seperti gempa bumi dan letusan gunung berapi (Utomo et al., 2021).

Dari perspektif ekonomi, pasar implan ortopedi Indonesia sangat potensial. Laporan KenResearch memperkirakan nilai segmen *orthopedic artificial joints* pada 2023 mencapai USD 1,2 miliar (Indonesia Orthopedic Artificial Joints Market Outlook to

2030e, 2024), dengan proyeksi pertumbuhan *Compound Annual Growth Rate* (CAGR) 8–10% dalam beberapa tahun mendatang (Orthopedic et al., 2025).

Menjawab tantangan tersebut, kebijakan nasional telah menempatkan teknologi medis, termasuk implan, sebagai prioritas strategis. RPJMN 2020–2024 menekankan peningkatan akses dan kualitas layanan kesehatan berbasis riset dan inovasi, sedangkan RIRN (rencana induk riset nasional) 2017–2045 memfokuskan riset implan medis untuk mendukung kemandirian teknologi nasional. Kebijakan Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN), yang diperkuat oleh Instruksi Presiden No. 2 Tahun 2022 serta Gerakan Nasional Bangga Buatan Indonesia, menjadi langkah konkret untuk mendorong penggunaan material lokal yang sesuai dengan antropometri penduduk Indonesia.

Implan adalah alat yang ditanam di dalam tubuh untuk menggantikan fungsi organ atau struktur yang rusak akibat kecelakaan maupun penuaan, misalnya sebagai penyangga fraktur (Asmaria et al., 2020). Syarat utama material implan adalah biokompatibilitas, yaitu tidak menimbulkan kematian sel, peradangan kronis, atau gangguan fungsi jaringan (Bauer et al., 2013). Secara garis besar, implan tulang terbagi menjadi dua kategori: implan permanen, yang dirancang untuk mendukung fungsi jangka panjang, dan implan terdegradasi (sementara), yang mendukung penyembuhan yang kemudian larut secara alami sehingga tidak memerlukan operasi pengangkatan ulang.

Dalam penggunaan implan permanen, aspek desain harus disesuaikan dengan bentuk dan ukuran tulang manusia Indonesia, sementara material yang digunakan harus aman, tidak toksik, dan diterima oleh tubuh (Asmaria et al., 2020). Saat ini, baja tahan karat, paduan kobalt-kromium (Co–Cr), dan titanium (Ti) banyak digunakan, dengan paduan titanium sebagai kandidat terbaik (Niinomi et al., 2012a).

Namun, riset nasional menunjukkan kendala dimana desain masih berbasis template komersial yang kurang sesuai antropometri lokal, teknik fabrikasi terbatas, serta pemrosesan paduan titanium yang menantang (Utomo et al., 2021).

Sementara itu, implan sementara (terdegradasi) berkembang sebagai solusi baru berbasis biomaterial bioaktif. Implan ini dirancang untuk mendukung penyembuhan jaringan dalam periode tertentu lalu terurai secara progresif (Gorejová et al., 2019). Dengan struktur berpori mikro dan makro, implan terdegradasi mampu menurunkan kekakuan material sehingga lebih mendekati sifat alami tulang (Lestari et al., 2019).

Implan terdegradasi sangat relevan untuk pasien pediatrik. Berbagai studi menunjukkan keterbatasan penggunaan flap tulang autologous (*autograft*) pada anak di bawah delapan tahun. melaporkan 50% pasien kranioplasti pediatrik dengan autograf mengalami resorpsi simtomatik (Grant et al., 2004). Hersh menegaskan risiko penyerapan tulang tertunda (Hersh et al., 2021), sedangkan Lee et al. (Lee et al., 2014) mencatat 44,4% kasus resorpsi pada defek kranial besar ($>120 \text{ cm}^2$). Meta-analisis Aprianto et al. (Aprianto et al., 2022) bahkan menyoroti keterbatasan donor tulang autologus pada anak dengan defek luas. Kondisi ini menegaskan pentingnya implan sementara yang lebih adaptif dengan kebutuhan klinis pediatrik.

Paduan berbasis magnesium menjadi kandidat menjanjikan karena sifatnya sementara (terdegradasi), sehingga dapat terurai tanpa operasi lanjutan (Li et al., 2008; Todros et al., 2021; Seyedraoufi & Mirdamadi, 2013; Amal et al., 2016). Namun, tantangan utama magnesium adalah degradasi yang terlalu cepat dan penurunan sifat mekanik sebelum proses penyembuhan jaringan selesai (Kamrani & Fleck, 2019). Laju korosi paduan magnesium dilaporkan 0,16–12,56 mm/tahun, jauh lebih tinggi

dibandingkan paduan titanium 0,0001778 mm/tahun (Gurappa, 2002). Oleh karena itu, riset lanjutan diperlukan untuk mengoptimalkan kinerja paduan Mg sebagai implan sementara (terdegradasi).

Perkembangan riset implan tulang menunjukkan pergeseran paradigma, dari fokus pada kekuatan mekanik menuju integrasi dengan proses biologis alami. Implan permanen digunakan untuk kasus kerusakan tulang jangka panjang seperti *Total Hip Arthroplasty* (THA), sementara implan terdegradasi dikembangkan untuk mendukung penyembuhan tulang sementara tanpa operasi tambahan. Pendekatan baru ini membuka jalan bagi inovasi implan yang lebih adaptif, mendukung regenerasi jaringan, dan sesuai dengan keragaman antropometri penduduk Indonesia. Dalam konteks tersebut, kegiatan pengembangan disain dan material implan tulang THA telah dilakukan berdasarkan Prioritas Riset Nasional (PRN) Pengembangan Implan Tulang 2020–2024. Program ini menegaskan pentingnya pengembangan implan permanen berbasis data klinis dan antropometri lokal, sehingga dapat menghasilkan produk yang lebih sesuai dengan kebutuhan pasien Indonesia sekaligus memperkuat kemandirian teknologi kesehatan nasional.

Naskah orasi ini akan menguraikan perjalanan riset material implan tulang di Indonesia: mulai dari desain dan ukuran THA berbasis paduan titanium sesuai antropometri lokal, kajian paduan logam kobalt-kromium dan titanium untuk implan permanen, hingga riset paduan logam berpori (*metal foaming*) berbasis magnesium sebagai implan sementara (terdegradasi). Semua ini diarahkan untuk memperkuat kemandirian bangsa di bidang kesehatan, mendukung pembangunan berkelanjutan, dan meningkatkan daya saing teknologi alat kesehatan nasional.

II. PERKEMBANGAN GLOBAL MATERIAL UNTUK IMPLAN TULANG PERMANEN DAN SEMENTARA

Dalam bab ini akan dijelaskan perkembangan mengenai material implan ortopedis yang bersifat permanen di dalam tubuh yaitu implan sendi panggul (THA) mulai dari penggunaan material baja tahan karat, paduan kobal dan paduan titanium.

Untuk material implan sementara (terdegradasi) akan dijelaskan mengenai perkembangan logam berpori berbasis magnesium dengan elemen-elemen pepadu, penggunaan senyawa pengembang dan teknologi proses yang sedang berkembang.

A. Perkembangan Disain dan Material THA Sebagai Implan Tulang Permanen

1. Sejarah Awal Implan Logam dalam Bedah Ortopedi

Sir William Arbuthnot Lane, dokter bedah dan dokter Inggris (1856–1943), bersama dengan perawat ortopedi pertama, juga Dame Agnes Gwendoline Hunt dari Inggris (1866–1948) dan dokter bedah Belgia Albin Lambotte (1866–1955) merancang pelat implan yang terbuat dari baja tahan karat (Markatos et al., 2016). Penemuan dan inovasi ini telah membuka jalan bagi perkembangan teknologi implan ortopedi modern yang kita kenal saat ini.

Pada tahun 1935, William Sherman dan F. Pauwels memodifikasi metode Lane untuk mengurangi gaya tekan tinggi dengan menghilangkan sudut pelat yang tajam. Mereka menggunakan

Vanadium-Besi karena ketahanan dan elastisitasnya. Adalbert Zierold memperkenalkan Stellite, campuran kromium-kobalt, pada tahun 1924, yang diterima secara luas pada akhir tahun 1930-an. Molibdenum ditambahkan pada baja tahan karat, kemudian digunakan karena ketahanannya terhadap senyawa organik dan cairan biologis. Vitallium, yang mengandung kromium dan nikel, menyusul diaplikasikan. Martin Kirschner dari Greifswald menggunakan pin dan kawat untuk memperkuat sambungan implan-tulang, metode yang dikenal sebagai kawat K atau kawat Kirschner (Fernández et al., 2007).

Pada tahun 1950-an, ahli bedah ortopedi Amerika Moore AT dan Thompson FR memberikan kontribusi penting dengan mengembangkan implan logam yang stabil untuk THA ditunjukkan pada Gambar 1.1. Implan ini memiliki bagian *acetabular cup*, kepala dan *femoral stem* yang panjang dengan sudut poros leher 135 derajat untuk distribusi gaya yang lebih baik. Pada tahun 1950, ia mendesain ulang *acetabular* implan dengan dua femoral stem yang diisi dengan *bone graft* untuk meningkatkan stabilitas (Anderson et al., 2007).

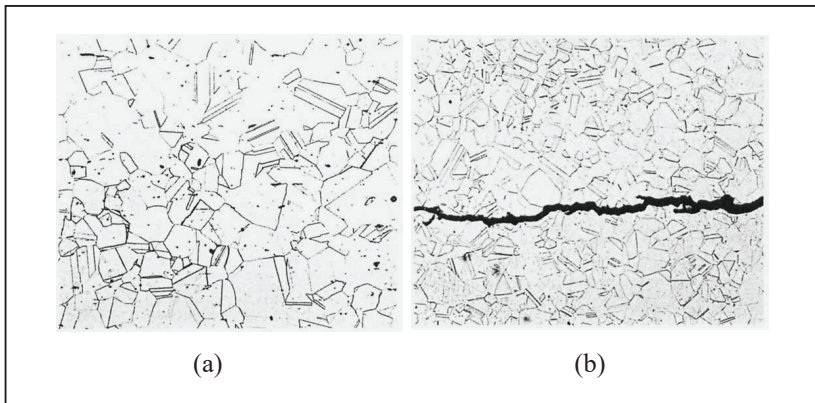


Sumber: Markatos (2016)

Gambar 1.1 Disain paling awal dari implan THA yang merevolusi bedah ortopedi

2. Disain THA Era Modern dan Keterbatasan Baja Tahan Karat

Era modern artroplasti pinggul dimulai dengan desain McKee GK berupa cangkir baja tahan karat pada kepala Thompson, yang disempurnakan Watson Farrar pada 1960 dengan tambahan engsel bergigi. Pada tahun yang sama, Charnley memperkenalkan penggunaan semen akrilik PMMA untuk fiksasi implan, dan pada 1963, polietilena mulai digunakan sebagai permukaan gesekan. Charnley juga merancang artroplasti gesekan rendah dengan kepala femoralis kecil (22,225 mm) dan mangkuk polietilen bersemen, yang menjadi tonggak penting (Gambar 1.1). Selain itu, Muller ME mengembangkan desain implan pinggulnya sendiri. Berbagai pendekatan bedah osterior, anterolateral, posteriolateral, dan lateral yang dikembangkan untuk memaksimalkan rentang gerak dan mengurangi dislokasi.



Keterangan: (a) Struktur hasil aniling di area dekat kegagalan lelah (*fatigue*), perbesaran 130x, (b) Retakan mikro akibat lelah, perbesaran 80x

Sumber: Harris (1979)

Gambar 1.2 Baja tahan karat 316L implan Charnley *prosthesis* dari Royal United Hospital setelah 4 tahun diimplankan

Diameter kepala femoralis pun sempat dinaikkan menjadi 40 mm sebelum akhirnya distandarkan menjadi 28 mm. Baja tahan karat 316L awalnya banyak digunakan sebagai material implan ortopedi. Namun, meningkatnya tuntutan kualitas hidup mendorong pasien memilih implan yang lebih unggul untuk pemulihan lebih cepat. Penggunaan baja tahan karat khususnya 316 L yang umum digunakan dinilai berisiko karena rentan terhadap korosi lokal, pengelupasan, dan kegagalan akibat kelelahan (*fatigue*) (Gambar 1.2), yang dapat mengganggu integritas struktural dan menimbulkan komplikasi serius (Harris, 1979).

3. Perkembangan Teknik Fiksasi, Modifikasi Permukaan dalam THA dan Teknologi Manufaktur

Penemuan dan penggunaan semen secara signifikan memodifikasi biomaterial implan. Tiga metode fiksasi utama digunakan: (1) semen akrilik polimetil metakrilat (PMMA) untuk fiksasi kuat dan mobilisasi dini; (2) permukaan berpori berlapis hidroksiapatit untuk integrasi tulang; dan (3) *press-fit* yang mengandalkan kecocokan mekanis. PMMA meningkatkan luas fiksasi dan menurunkan tekanan antarmuka implan-tulang (Anderson et al., 2007).

Paduan kromium-kobal, dicampur dengan logam minor, meningkatkan penerapan gaya dan stabilitas. Dalam teknik tanpa semen (*cementless*), titanium lebih disukai karena kekakuan dan biokompatibilitasnya. Selain itu, lapisan hidroksiapatit meningkatkan gaya kontak logam-tulang. Perkembangan desain *acetabular* pada THA menunjukkan perjalanan panjang. Pada awalnya, kontak logam-ke-logam digunakan, namun segera muncul masalah gesekan yang signifikan. Inovasi kemudian mengarah pada penggunaan keramik, yang terbukti mampu menurunkan gesekan. Pada 1970-an, Wagner dan Freeman

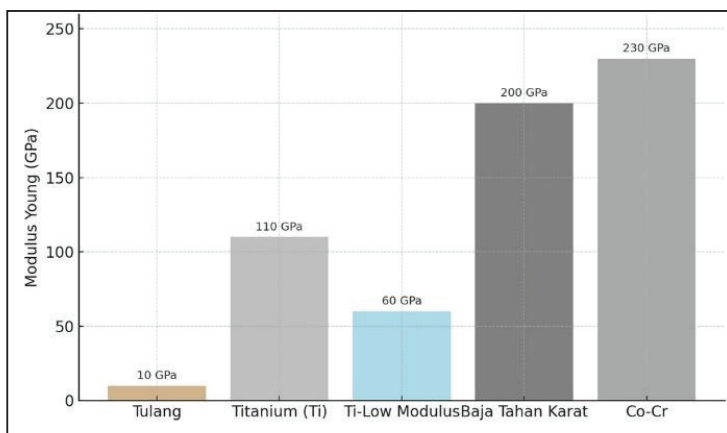
mempelopori modifikasi permukaan implan THA, tetapi desain tersebut menghadapi tingkat kegagalan tinggi akibat kelonggaran acetabular dan kehilangan tulang. Memasuki era pasca-1990, kemajuan signifikan dicapai melalui penggunaan kepala logam yang difiksasi dengan semen (*cemented*) serta komponen acetabular dengan teknik press-fit. Inovasi ini secara nyata menurunkan angka osteolisis dan metallosis, sekaligus meningkatkan keberhasilan jangka panjang prosedur THA (Anderson et al., 2007).

Selain inovasi desain, kemajuan proses manufaktur turut mempercepat evolusi implan permanen. Pada tahap awal, produksi implan dilakukan dengan casting konvensional, yang memungkinkan pembentukan geometri kompleks namun dengan kendala porositas dan ketidakhomogenan mikrostruktur. Seiring perkembangan teknologi, metode tempa dan canai panas mulai diterapkan untuk menghasilkan kekuatan mekanik dan ketahanan lelah yang lebih baik (Hanawa, 2024). Pada dekade 1970–1990, muncul teknologi precision machining berbasis *computer numerical control* (CNC) yang memungkinkan toleransi geometrik tinggi dan permukaan halus, dimana dua hal penting untuk mencegah kegagalan akibat keausan pada sendi buatan (Long & Rack, 1998).

4. Pengembangan Material Implan Tulang dengan Modulus Elastisitas Rendah

Baru-baru ini, telah dicapai kemajuan dalam peningkatan biokompatibilitas mekanis biomaterial logam, terutama terkait sifat-sifat seperti modulus Young, keseimbangan antara kekuatan dan keuletan, kekuatan lelah, ketangguhan patah, dan ketahanan aus. Di antara sifat-sifat tersebut, pengendalian modulus Young telah menjadi fokus utama penelitian, karena

perbedaan yang signifikan antara modulus Young biomaterial logam dan tulang dapat menyebabkan atrofi tulang serta proses rekayasa ulang tulang yang kurang optimal, meskipun implan tetap harus memiliki kekakuan struktural yang memadai. Oleh karena itu, paduan titanium dengan modulus Young rendah sangat diperlukan untuk menggantikan jaringan keras yang rusak, seperti pada implan sendi pinggul buatan, pelat tulang, dan batang fiksasi tulang belakang. Gambar 1.3 menunjukkan grafik perbandingan modulus Young antara tulang dan biomaterial logam utama. Terlihat bahwa modulus tulang (~10 GPa) jauh lebih rendah dibanding baja tahan karat (~200 GPa) dan paduan Co-Cr (~230 GPa), sementara titanium (~110 GPa) masih lebih tinggi tetapi relatif lebih mendekati. Paduan titanium dengan modulus rendah (~60 GPa) dikembangkan untuk lebih sesuai dengan tulang, sehingga dapat mengurangi risiko atrofi dan *mismatch* biomekanis (Niinomi et al., 2012a).



Sumber: Niinomi (2012a)

Gambar 1.3 Perbandingan modulus Young tulang dan biomaterial logam

Titanium (Ti) dan paduannya dikenal memiliki biokompatibilitas paling tinggi di antara biomaterial logam utama seperti baja tahan karat dan paduan Co-Cr. Pada tahap awal pengembangannya, paduan Ti yang bebas vanadium (V) seperti Ti-6Al-7Nb, Ti-Nb-Sn (Utomo et al., 2018), Ti-Mo-Nb-Sn (Senopati et al., 2020; Senopati et al., 2019), Ti-6Al-6Mo (Kartika et al., 2019), Ti-Mo-Fe-Cu (Senopati et al., 2023) dan Ti-5Al-2,5Fe dikembangkan karena toksisitas V. Selanjutnya, paduan bebas V dan aluminium (Al) juga dibuat karena dugaan kaitan Al dengan penyakit Alzheimer, meskipun hal ini tidak terbukti (Niinomi et al., 2012a).

Dalam beberapa tahun terakhir, perhatian tertuju pada masalah *stress shielding*, yaitu distribusi tegangan yang tidak merata antara implan logam dan tulang akibat perbedaan signifikan dari modulus Young. Hal ini dapat mengakibatkan resorpsi tulang dan kegagalan implan. Di antara material logam yang digunakan untuk aplikasi medis, paduan Ti memiliki modulus paling rendah (Gambar 1.3). Paduan Ti tipe- β , yang memiliki struktur kristal *body centered cubic* (bcc) dengan kerapatan atom lebih rendah dibanding tipe- α (*hexagonal closed-packed*, hcp), menunjukkan modulus elastisitas yang lebih rendah dan kini tengah dikembangkan secara intensif untuk aplikasi implan (Niinomi et al., 2002).

Perspektif ke depan pengembangan implan permanen untuk THA difokuskan pada optimalisasi paduan titanium tipe- β generasi terbaru yang memiliki modulus elastisitas rendah mendekati tulang, tetapi tetap dengan kekuatan *fatigue* dan ketahanan aus yang tinggi dengan memanfaatkan teknologi *additive manufacturing* sehingga meningkatkan osteointegrasi dan menurunkan risiko *stress shielding* (Liang-yu et al., 2020).

B. Perkembangan Material Berpori Berbasis Magnesium sebagai Implan Sementara

1. Potensi Logam Terdegradasi dalam Aplikasi Implan

Implan sementara (terdegradasi) dirancang untuk mendukung regenerasi dan penyembuhan jaringan dengan cara terdegradasi secara alami, seiring dengan penggantian oleh jaringan tubuh di sekitarnya. Pendekatan ini mengubah paradigma pengembangan biomaterial, dari yang semula hanya menekankan penggunaan logam tahan korosi untuk implan tulang permanen, menjadi logam yang secara khusus dirancang dapat terurai secara terkendali sebagai implan terdegradasi. Logam yang tersusun dari unsur alami tubuh menjadi kandidat ideal, karena selain biokompatibel, juga memiliki keunggulan mekanik seperti kekuatan tarik tinggi dan modulus Young yang mendekati tulang yang tidak dimiliki material terdegradasi lain seperti polimer, keramik, atau kaca bioaktif (Witte et al., 2008). Sebagaimana dibahas dalam bidang material terdegradasi, terdapat setidaknya hubungan dua arah antara material dan respons biologis penerima. Proses degradasi atau produk korosi dapat menyebabkan peradangan lokal, sementara produk peradangan dapat mempercepat proses degradasi. Kompleksitas hubungan ini umumnya belum dipahami untuk logam terdegradasi (Witte et al., 2008).

Lebih dari dua abad sejak Sir Humphrey Davy pertama kali menghasilkan magnesium elemental, minat terhadap paduan berbasis magnesium sebagai biomaterial kembali meningkat tajam dalam dekade terakhir. Padahal, ide penggunaan magnesium sebagai implan sudah dieksplorasi sejak awal abad ke-20, meski kemudian meredup setelah munculnya baja tahan karat pasca-Perang Dunia II. Daya tarik magnesium sebagai logam ringan dengan sifat mekanik yang sesuai, awalnya

diminati untuk otomotif dan kedirgantaraan, kini kembali mendorong riset intensif di bidang medis, khususnya sebagai material implan terdegradasi yang inovatif (Witte et al., 2011).

Pada akhir 1990, riset logam terdegradasi untuk implan mulai berkembang, menantang paradigma lama bahwa logam harus selalu tahan korosi. Berbeda dengan polimer terdegradasi yang telah diterima luas, pengembangan logam terdegradasi memerlukan pendekatan interdisipliner yang meliputi ilmu material, rekayasa jaringan, toksikologi, biologi sel, karakterisasi permukaan, hingga aplikasi klinis di bidang kardiologi dan ortopedi. Salah satu pencapaian penting adalah uji klinis *stent* koroner berbasis paduan magnesium, yang menunjukkan bagaimana inovasi material dan teknik manufaktur dapat berhasil diterapkan secara nyata di bidang medis melalui kolaborasi lintas disiplin (Witte et al., 2011).

2. Karakteristik dan Potensi Magnesium dan Paduannya sebagai Implan Sementara

Magnesium (Mg) merupakan logam yang dapat diaplikasikan sebagai material untuk implan ortopedi yang bersifat sementara atau berpotensi terurai secara hayati, karena laju degradasi yang relatif cepat di dalam tubuh (Lestari et al., 2022). Magnesium sangat menjanjikan karena merupakan elemen yang ditemukan dalam tubuh manusia dan dapat memberikan dukungan mekanis selama penyembuhan jaringan. Beberapa karakteristik Mg dan paduan Mg untuk aplikasi material biokompatibel antara lain (a) Logam ringan dengan nilai densitas $1,738 \text{ g/cm}^3$ dan mendekati kepadatan tulang kortikal yang khas yaitu $1,75\text{-}2,1 \text{ g/cm}^3$ (Tabel 1.1); (b) Kapasitas redaman cukup tinggi, efektif menyerap guncangan dan getaran yang baik, penting dalam aplikasi menahan beban berat seperti dalam aplikasi biomedis; (c) Kemampuan

mesin dan dimensi yang baik yang diperlukan untuk bentuk khusus dalam aplikasi medis individu; (d) Modulus elastisitas sekitar 45 GPa, lebih kecil daripada paduan biomaterial umum Ti (115 GPa) dan lebih dekat dengan tulang kortikal manusia (20 GPa); (e) Berperan penting dalam metabolisme, pembentukan jaringan tulang yang mempengaruhi kerapuhan dan kekuatan tulang dan juga sebagai penstabil struktur DNA dan RNA serta kofaktor enzim; (f) Laju korosi relatif cepat (potensial elektroda standar -2,37 V), memungkinkan implan terurai setelah fungsi selesai, meminimalkan risiko komplikasi jangka panjang.

Tabel 1.1 Karakteristik mekanik tulang dan magnesium serta paduannya

Sifat	Tulang Cortical	Tulang Cancellous	Mg dan Paduannya
Berat Jenis (g/cm ³)	1,75–2,1	1,0–1,4	1,74–2,0
Modulus Elastisitas (GPa)	7–30	0,3–4	41–45
Fracture Toughness (MPa/m ²)	-	-	~ 15
Kuat Tekan Maksimum (MPa)	35–283	0,2-80	135–285

Sumber: Annur (2015)

Terlepas dari semua sifat yang diinginkan ini, paduan magnesium memiliki beberapa kelemahan yaitu kekuatan mekanik dan modulus elastisitas rendah, degradasi cepat, masalah resorpsi, dan evolusi hidrogen (Annur et al., 2015).

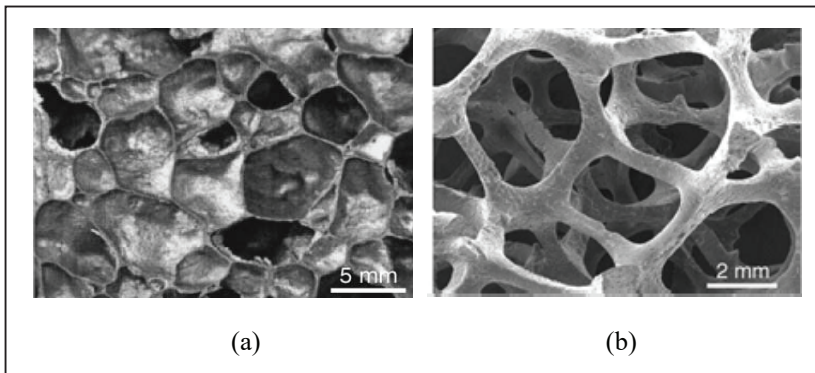
Kelemahan magnesium perlu ditingkatkan dengan penambahan elemen padu diantaranya kalsium (Ca), dan seng (Zn). Ca selain sebagai elemen utama yang ada di dalam tubuh, juga

sebagai elemen penting pemberi isyarat pada sel (Kartika et al., 2018). Ca juga dapat meningkatkan kemampuan canai dan menurunkan oksidasi saat proses perlakuan panas (Annur et al., 2015). Selain itu, Ca dapat membentuk senyawa intermetalik seperti Mg_2Ca , yang memperkuat struktur paduan dan menurunkan laju korosi (Ashari et al., 2019). Kalsium berfungsi sebagai penghalusbutiran paduan magnesium dan penstabil ukuran butiran dengan penambahan lebih dari 0,5% berat kalsium (Agarwal et al., 2016). Akan tetapi perlu diperhatikan kelarutan maksimum Ca dalam darah yaitu sebesar 0,919-0,993 mg/L (Thaha et al., 2014), sedangkan kelarutan maksimum Ca dalam Mg sebesar 0,8% pada temperatur ruang. Seng atau Zn juga menarik untuk ditambahkan dalam paduan magnesium, selain sebagai nutrisi yang diperlukan oleh tubuh, Zn dapat meningkatkan ketahanan korosi dan meningkatkan sifat mekanik dari paduan Mg yang sangat penting untuk kebutuhan implan atau *scaffold* tulang (Kartika et al., 2018). Zn dapat memperhalus permukaan ukuran butir Mg, dan penambahan Zn ke dalam Mg maksimal sebesar 1-4% berat (Ashari et al., 2019).

3. Karakteristik, Proses Pembentukan dan Aplikasi Logam Berpori Berbasis Magnesium untuk Implan Sementara

Logam berpori merupakan material inovatif dengan kombinasi sifat mekanik unik, seperti densitas rendah, kemampuan penyerapan energi tinggi, serta peredaman getaran yang efektif (Kennedy, 2012). Struktur berpori ini dapat berupa pori tertutup (*closed-cell foam*), yang kuat dan cocok untuk aplikasi struktural, maupun pori terbuka (*opened-cell foam*), yang lebih rapuh namun sangat fungsional berkat pori-porinya yang saling terhubung. Contoh struktur kedua jenis logam berpori ini ditunjukkan pada Gambar 1.4 (Kennedy, 2012). Riset ini

secara orisinal mengembangkan logam berpori magnesium berbasis pori tertutup dengan volume porositas tinggi (75–95%), yang dirancang agar menyerupai struktur tulang spons alami. Pendekatan ini diharapkan membuka peluang baru pemanfaatan logam berpori sebagai material implan terdegradasi dengan kekuatan mekanik memadai dan kemampuan mendukung osseointegrasi.



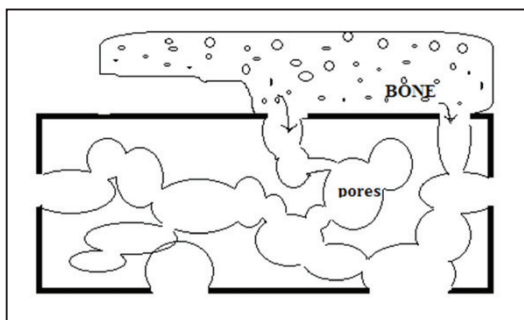
Keterangan: (a) logam pori tertutup, (b) logam pori terbuka

Sumber: Kennedy, 2012

Gambar 1.4 Jenis logam berpori

Secara struktural, logam berpori tersusun dari gelembung gas yang terperangkap dalam dinding logam tipis, membentuk struktur selular khas yang tidak dimiliki logam padat. Dalam aplikasi biomedis, struktur ini sangat penting karena memungkinkan penyesuaian sifat mekanik material agar mendekati karakteristik tulang sehingga meningkatkan osseointegrasi dan kestabilan implan (Gambar 1.5), sehingga dapat meningkatkan integrasi dan kestabilan implan. Penyesuaian ini dapat dilakukan melalui kontrol terhadap parameter proses selama tahap pembentukan pori (Patel et al., 2018).

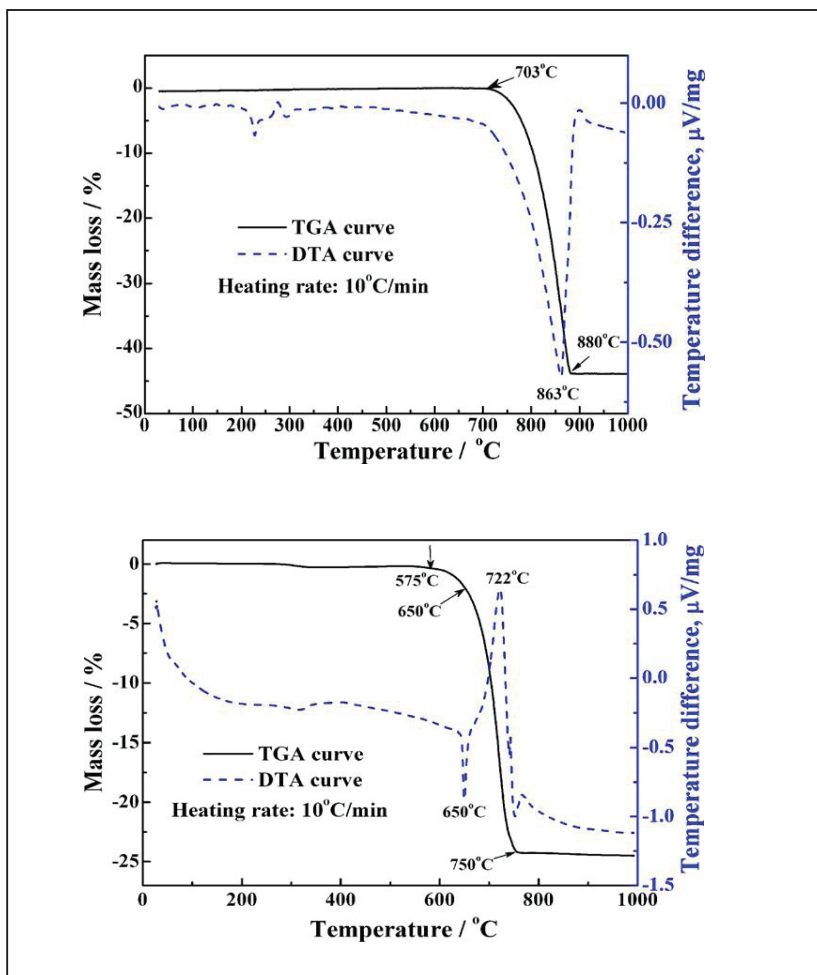
Senyawa pengembang adalah senyawa yang ditambahkan ke logam cair untuk menghasilkan gas melalui dekomposisi termal, sehingga membentuk struktur berpori khas busa logam. Pada pengembangan implan terdegradasi, senyawa pengembang seperti CaH_2 , TiH_2 , atau karbonat logam (CaCO_3 , MgCaCO_3 , SrCO_3) berperan penting menciptakan pori-pori yang memungkinkan pertumbuhan tulang sekaligus mendukung degradasi alami material (Patel et al., 2018).



Sumber: Patel (2018)

Gambar 1.5 Ilustrasi yang menunjukkan pertumbuhan tulang ke dalam struktur pori

Uji TGA-DTA (*thermal gravimetric analysis-differential thermal analysis*) merupakan langkah fundamental dan tahap awal yang penting untuk memahami proses *sintering* dalam pengembangan paduan terdegradasi (Gambar 1.6). Melalui uji ini, Yang et. al., berhasil memperoleh data eksperimental pada campuran Mg dan CaCO_3 dengan rasio mol yang sama. Hasilnya menunjukkan puncak endotermik pada 650°C yang menandai lelehnya magnesium, serta puncak eksotermik pada 722°C yang menunjukkan terjadinya reaksi antara magnesium cair dan CaCO_3 . Selain itu, teramati penurunan massa mulai 575°C dengan



Sumber: Yang (2008)

Gambar 1.6 Kurva DTA TGA campuran Mg dan CaCO₃ dengan rasio mol yang sama sebagai dasar temperatur proses *sintering*

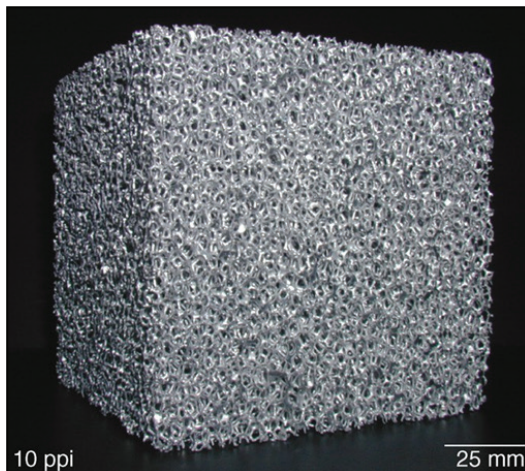
total kehilangan massa sebesar 23,8% pada rentang 575–750°C, mendekati nilai teoritis sebesar 22,6% akibat pelepasan gas CO. Temuan ini menjadi dasar penting dalam menentukan kondisi optimal proses *sintering* selanjutnya, sekaligus memperkuat hasil riset sebelumnya (Yang et al., 2008).

Titanium hidrida (TiH_2) dikenal sebagai bahan dengan potensi pembentukan pori terbaik dan umum digunakan untuk membusa logam bertitik leleh rendah seperti aluminium, magnesium, dan paduannya, berkat kemampuannya melepaskan hidrogen dalam jumlah besar selama pemanasan. Pelepasan gas hidrogen bebas dari TiH_2 dimulai pada sekitar 400°C, dengan pelepasan signifikan terjadi di atas 500°C. Untuk mengendalikan laju pelepasan gas agar terjadi mendekati atau setelah titik leleh paduan, dilakukan perlakuan panas awal terhadap TiH_2 di udara, membentuk lapisan oksida pelindung pada permukaan hidrida. Dalam studi ini, perlakuan awal pada berbagai temperatur dalam atmosfer argon diterapkan terhadap serbuk TiH_2 guna mengkaji pengaruh oksidasi terhadap perilaku dekomposisi serta morfologi TiH_2 sebagai agen pembentuk busa (Malachevsky et al., 2009; Lestari et al., 2018).

Terdapat berbagai metode untuk memproduksi logam berpori, antara lain melalui pemrosesan logam cair, serbuk logam (*metal powder*), uap logam, maupun ion logam. Dari metode tersebut, teknik berbasis metalurgi serbuk (*powder metallurgy*) banyak digunakan karena relatif sederhana dan memungkinkan kontrol bentuk, ukuran, serta distribusi pori dengan mengatur ukuran serbuk logam, *space holder*, dan parameter proses seperti tekanan serta temperatur *sintering* (Kennedy, 2012; Yang et al., 2008). *Spark plasma sintering* (SPS) merupakan salah satu teknologi maju metalurgi serbuk yang dapat menghasilkan paduan logam berpori dengan *space holder*; mikrostruktur yang

homogen, menurunkan modulus elastis hingga mendekati tulang *cortical* (7–30 GPa) dan tulang *cancellous* (0,3–4 GPa) serta meningkatkan osseointegrasi melalui struktur pori interkoneksi (Annur et al., 2021; Annur et al., 2021).

Logam berpori paduan Fe-Cr-Al-Y dengan jenis pori terbuka yang diproduksi seperti ditunjukkan dalam Gambar 1.7 menunjukkan struktur pori yang dapat dibuat dari berbagai jenis material, seperti *bioinert* (tidak menimbulkan respon biologis), *bioaktif* (menstimulasi respons dari jaringan hidup), *terdegradasi* (dapat terurai menjadi bentuk yang lebih sederhana melalui proses biologis), *bioresorbable* (dapat diserap atau dipecah oleh tubuh), dan *biokompatibel* (tidak menimbulkan efek berbahaya atau toksik terhadap jaringan tubuh). Material-material ini digunakan secara luas dalam aplikasi biomedis, termasuk rekayasa jaringan, perancah (*scaffold*), dan implan tubuh (Patel et al., 2018).



Sumber: Zhao (2012)

Gambar 1.7 Paduan logam berpori FeCrAlY hasil proses *sintering*

III. PENGEMBANGAN NASIONAL MATERIAL DAN IMPLAN TULANG PERMANEN DAN SEMENTARA

Bab ini akan menjelaskan perolehan hasil riset mengenai pengembangan material implan tulang permanen dan implan sementara (terdegradasi).

Pada pengembangan material implan tulang permanen, sesuai dengan kegiatan riset prioritas nasional 2020–2024, riset fokus pada desain implan pengganti sendi panggul (THA) mengacu pada ukuran antropometri tulang manusia Indonesia, pengembangan paduan material dan proses manufaktur.

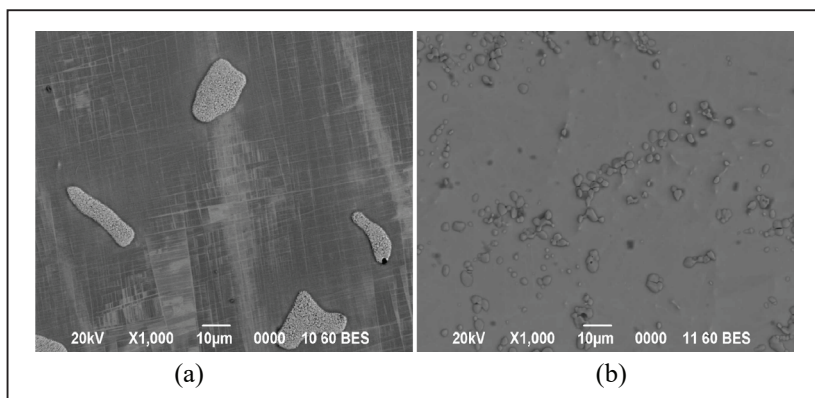
Riset pengembangan material implan terdegradasi terfokus pada pengembangan paduan logam berpori berbasis magnesium dan pemilihan teknologi manufaktur menggunakan metalurgi serbuk konvensional (*conventional powder metallurgy*).

A. Pengembangan Material Implan Tulang Permanen

1. Riset Implan Tulang Permanen Berbasis Paduan Co-Cr-Mo

Riset diawali dengan mengkaji paduan Co-33Ni-20Cr-10Mo selama proses deformasi pada berbagai temperatur (950–1200 °C) dengan laju regangan pada rentang 0,1–30 s⁻¹ (Kartika et al., 2009). Riset ini menunjukkan bagaimana mengontrol kondisi proses deformasi panas dapat mengoptimalkan mikrostruktur paduan Co-Ni-Cr-Mo, sehingga meningkatkan kombinasi kekuatan, keuletan, dan ketahanan lelah yang sangat penting untuk performa jangka panjang implan tulang.

Riset mengenai paduan berbasis Co-Cr-Mo terus berkembang untuk aplikasi implan sendi panggul, khususnya untuk aplikasi implan THA. Salah satu paduan yang dipelajari adalah Co-28Cr-6Mo-0,8Si-0,8Mn-0,4Fe-0,2Ni, yang sesuai dengan standar material medis ASTM F75. Variasi dilakukan pada kandungan karbon (0,08; 0,15; dan 0,25% berat) serta penambahan nitrogen sebesar 0,2% berat. Inovasi ini berhasil mengembangkan kombinasi komposisi dengan kekuatan tarik mencapai 1178 N/mm² dan kekuatan luluh (*yield strength*) sebesar 780 N/mm². Namun temuan penting lain adalah bahwa peningkatan kadar karbon dan nitrogen juga memicu pembentukan presipitat karbida $M_{23}C_6$ (Gambar 2.1) yang berdampak negatif terhadap keuletan (Rokhmanto et al., 2018).



Keterangan: (a) struktur hasil coran, (b) paduan hasil *hot roll* dengan reduksi 80%. Elektro etsa methanol 10% H_2SO_4

Sumber: Rokhmanto (2016)

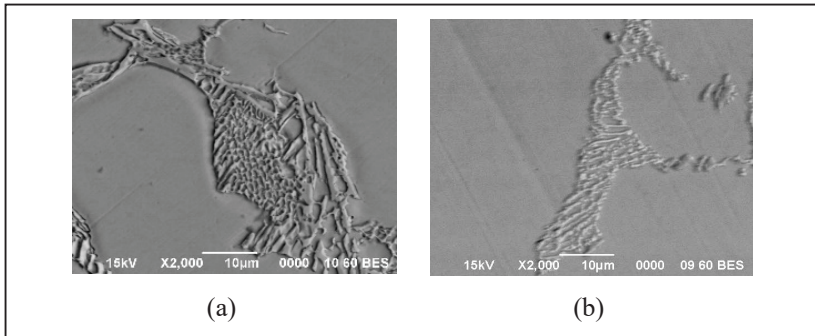
Gambar 2.1 Foto mikrostruktur hasil citra SEM paduan Co-Cr-Mo dengan penambahan karbon 0,25 % berat

Riset ini juga berhasil merumuskan paduan Co-Cr-Mo inovatif untuk aplikasi THA dengan kontribusi orisinal melalui penggantian unsur nikel (Ni) yang berpotensi memicu alergi, digantikan oleh nitrogen (N). Pendekatan ini memungkinkan tercapainya kombinasi sifat mekanik tinggi, ketahanan korosi baik, serta biokompatibilitas yang lebih aman bagi pasien (Rokhmanto et al., 2018). Pengembangan paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N menegaskan pentingnya kontrol pendinginan pasca canai panas dalam menjaga kestabilan fasa γ -Co dengan struktur kristal FCC, sekaligus mencegah terbentuknya fasa intermetalik Co_7Mo_6 yang rapuh. Pendinginan udara terbukti menjadi kunci untuk mencapai keseimbangan antara kestabilan fasa dan sifat mekanik yang sesuai, dibandingkan dengan pendinginan cepat dalam air yang masih menghasilkan fasa metastabil Co_7Mo_6 (Rokhmanto et al., 2017). Penelitian ini juga mengungkap pengaruh transformasi fasa γ -Co menjadi fasa ϵ -Co yang lebih getas selama pendinginan, memperkaya pemahaman tentang mikrostruktur paduan Co-Cr-Mo (Astawa et al., 2018).

Lebih lanjut, riset mendalam terhadap paduan Co-30Cr-5Mo-0,32C-0,23N yang diproses melalui pengecoran, homogenisasi, canai panas, dan *solution treatment* mengungkap bahwa temperatur *solution treatment* dapat mempengaruhi morfologi presipitat serta nilai kekerasan akhir paduan. Temuan perubahan morfologi presipitat dari *starlike-dense* menjadi *starlike-stripes* pada 1250 °C (Gambar 2.1) menambah pengetahuan baru mengenai kontrol mikrostruktur untuk mengoptimalkan sifat mekanik paduan (Rokhmanto et al., 2023).

Selain itu, riset ini juga menunjukkan kontribusi penting melalui penerapan *multipass thermomechanical processing* untuk menghasilkan struktur mikro yang lebih halus dengan akumulasi dislokasi, yang berperan ganda: meningkatkan kekuatan mekanik dan mempercepat pembentukan film pasif

tanpa meningkatkan laju korosi. Hal ini dibuktikan melalui uji polarisasi pada paduan Co-28Cr-6Mo-0,14N-0,04C yang memperlihatkan ketahanan korosi tetap terjaga meski terjadi penguatan signifikan (Yamanaka et al., 2019).



Keterangan : (a) Hasil coran, (b) *Solution treatment* pada $T = 1250^{\circ}\text{C}$

Sumber: Rokhmanto (2023)

Gambar 2.2 Foto mikrostruktur hasil citra BSE-SEM paduan Co-30Cr-5Mo-0,32C-0,23N

Perjalanan panjang riset paduan kobalt-kromium-molibdenum (Co-Cr-Mo) telah memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan material implan medis yang andal dan berkelanjutan. Paduan ini tidak hanya memenuhi standar ASTM untuk implan permanen, tetapi juga memperhatikan aspek penting biokompatibilitas, ketahanan korosi, dan stabilitas fasa. Semua ini menjadi fondasi bagi terciptanya implan sendi panggul buatan (THA), yang aman dan efektif bagi pasien tidak hanya di Indonesia, tetapi juga di tingkat global.

Meskipun saat ini pengembangan paduan titanium semakin berkembang, riset paduan Co-Cr-Mo tetap relevan. Meski riset paduan titanium berkembang pesat, paduan Co-Cr-Mo tetap

relevan dan berdaya saing tinggi. Kombinasi kekuatan mekanik, ketahanan aus, serta stabilitas fasanya menjadikannya material unggulan untuk aplikasi implan permanen yang menanggung beban berat, seperti pada prosedur THA dan *total knee replacement* (TKR) (Long & Rack, 1998). Dari sisi ekonomi, paduan Co–Cr–Mo relatif lebih terjangkau dibandingkan paduan titanium murni, dan proses manufakturnya, seperti pengecoran dan canai panas, sudah mapan sehingga memudahkan skala produksi (Hanawa, 2024). Namun demikian, riset lanjutan tetap diperlukan untuk mengoptimalkan mikrostruktur, mengurangi potensi alergi akibat unsur nikel, serta meningkatkan biokompatibilitas secara keseluruhan.

Riset pengembangan paduan material untuk implan tulang THA juga dilakukan menggunakan material paduan titanium. THA sendiri merupakan prosedur bedah ortopedi untuk mengganti sendi panggul dengan implan buatan, yang bertujuan memulihkan fungsi gerak dan mengurangi rasa sakit pada pasien. Namun, mayoritas desain implan yang tersedia saat ini didasarkan pada data morfometri tulang masyarakat Barat. Ketidaksesuaian antara desain tersebut dengan morfologi tulang pasien Indonesia sering kali memicu komplikasi seperti dislokasi, fraktur, osteolisis, hingga nyeri paha pascaoperasi. Selain berisiko bagi pasien, kondisi ini juga berdampak pada meningkatnya biaya operasi karena diperlukan fabrikasi tambahan untuk menyesuaikan ukuran dan bentuk implan dengan anatomi pasien di Indonesia.

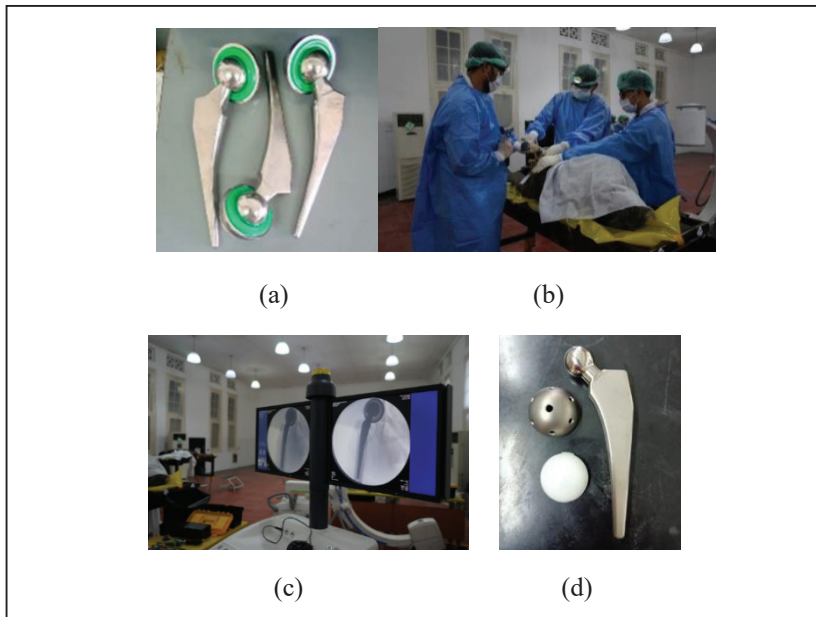
Titanium dan paduannya (misalnya Ti–6Al–4V) dibutuhkan karena memiliki biokompatibilitas tinggi, ketahanan korosi, dan berat jenis yang lebih ringan dibandingkan Co–Cr–Mo. Modulus elastisitas titanium (~110 GPa) juga lebih dekat ke tulang (~10–30 GPa) dibandingkan baja tahan karat (~200 GPa)

atau Co–Cr (~230 GPa), sehingga dapat mengurangi risiko *stress shielding* (Niinomi et al., 2012b). Selain itu, dengan berkembangnya teknologi fabrikasi seperti pemesian CNC, *additive manufacturing*, dan metalurgi serbuk, titanium menjadi material yang semakin kompetitif untuk dikembangkan (Geetha et al., 2009). Oleh karena itu, riset titanium tidak berdiri terpisah dari riset Co–Cr–Mo, melainkan saling melengkapi. Paduan Co–Cr–Mo untuk kebutuhan implan permanen berdaya tahan tinggi, dan paduan titanium untuk aplikasi yang membutuhkan keseimbangan antara kekuatan, biokompatibilitas, serta kesesuaian biomekanis dengan tulang pasien.

Untuk menjawab tantangan ketidaksesuaian desain implan dengan morfologi tulang pasien Indonesia, dikembangkan purwarupa implan THA tanpa semen (*uncementless*) berbahan paduan Ti-6Al-4V dan polietilen. Purwarupa ini diproduksi menggunakan kombinasi proses *investment casting* dan CNC (*computer numerical control*) *machining*, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3(a). Sebagai langkah validasi awal, dilakukan uji coba implantasi pada kadaver di Indonesia bekerja sama dengan tim ortopedis RSUPN Dr. Cipto Mangunkusumo Jakarta (Gambar 2.3(b)). Uji coba dilakukan melalui pendekatan pembedahan posterolateral dan mencakup evaluasi menyeluruh terhadap tiga aspek penting: desain implan, pemilihan material, dan kelengkapan instrumentasi bedah. Hasilnya, dua dari tiga implantasi THA berhasil dilakukan dengan baik, sebagaimana terlihat pada hasil *rontgen* (Gambar 2.3(c)), sedangkan satu kasus gagal akibat ukuran batang femur pada kadaver yang terlalu besar sehingga menimbulkan fraktur.

Hasil uji coba purwarupa implan THA tanpa semen pada kadaver menunjukkan bahwa pengembangan implan dalam negeri masih menghadapi tantangan, terutama dalam hal desain

(penyesuaian ukuran dan bentuk dengan morfologi tulang pasien Indonesia), pemilihan material (untuk kemudahan fabrikasi dan mendukung osseointegrasi), serta kebutuhan akan instrumentasi bedah yang sesuai (Utomo et al., 2021). Menyadari pentingnya data morfometri yang akurat, pengusul dan tim kemudian menginisiasi pembangunan *database* antropometri tulang penduduk Indonesia dan melakukan kolaborasi lintas disiplin untuk memperbaiki desain purwarupa agar lebih sesuai, seperti terlihat pada Gambar 2.3(d).



Keterangan: (a) Purwarupa riset awal implan THA tanpa semen, (b) Proses implantasi, (c) Hasil CT-Scan THA pada kadaver, (d) Purwarupa THA baru hasil evaluasi

Gambar 2.3 Proses pemasangan disain awal THA pada cadaver dengan ortopedist di RSUPN Cipto Mangunkusumo

Sebagai bentuk kontribusi orisinal riset, pengembangan desain ini didukung dengan validasi berbasis model tulang nyata menggunakan data citra medis, sehingga dapat menghasilkan rekomendasi yang lebih tepat untuk perencanaan operasi penggantian sendi panggul (Asmaria et al., 2020). Selain itu, dilakukan simulasi performa mekanik menggunakan metode *finite element analysis* (FEA) pada pelat tulang khusus untuk seorang pasien perempuan berusia 49 tahun dengan berat 61 kg dan tinggi 165 cm. Hasilnya menunjukkan tegangan maksimum von Mises sebesar 3,616 dan 664 MPa. Dimana keduanya jauh di bawah kekuatan luluh paduan Ti-6Al-4V, yang menegaskan bahwa desain pelat tersebut aman secara mekanis (Asmaria et al., 2022).

Namun demikian, riset ini juga mengidentifikasi potensi masalah klinis berupa *stress shielding* akibat perbedaan modulus elastisitas paduan Ti-6Al-4V (≈ 110 GPa) yang jauh lebih tinggi dibandingkan tulang kortikal (10–30 GPa). Untuk mengatasi tantangan tersebut, beberapa paduan titanium baru dikembangkan dengan tujuan menurunkan modulus Young. Misalnya, paduan Ti-Mo-Fe-Cu yang dilaporkan memiliki modulus sekitar 97 GPa, atau hanya menurun sekitar 12% dibanding Ti-6Al-4V, sehingga meskipun menawarkan peningkatan kombinasi kekuatan–keuletan, kontribusinya dalam mengurangi *stress shielding* masih terbatas (Senopati et al., 2024). Sebaliknya, paduan β -Ti lain seperti Ti-Mo-Nb-Sn atau Ti-6Al-6Mo dilaporkan mampu mencapai modulus lebih rendah, yakni pada kisaran 70–90 GPa, yang berarti terdapat reduksi modulus hingga 20–35% dari Ti-6Al-4V (Rokhmanto et al., 2021; Senopati et al., 2019; 2020; 2023). Penurunan modulus ini lebih mendekati tulang manusia sehingga secara klinis lebih efektif dalam meminimalkan risiko *stress shielding*. Dengan demikian, strategi pengembangan paduan β -Ti menegaskan pentingnya keseimbangan: menjaga

kekuatan mekanik memadai, namun sekaligus mendekatkan modulus elastisitas ke rentang alami tulang untuk menunjang integrasi biomekanik yang optimal.

B. Pengembangan Implan Sementara dari Paduan Logam Berpori

1. Keuntungan Penggunaan Paduan Magnesium

Paduan magnesium telah dianggap sebagai material biomedis yang menjanjikan karena biokompatibilitas, biodegradabilitas, serta modulus Young yang relatif rendah dan kekuatan mekanik yang sesuai (Thaha et al., 2014; Annur et al., 2017; Erryani et al., 2018; Lestari et al., 2019; Erryani et al., 2017). Selain itu, pembentukan pori (*porous*) pada material ini penting untuk mendukung integrasi tulang (*osteointegration*) dalam aplikasi implan sementara (Pramono et al., 2021), dimana dukungan regenerasi jaringan dengan cara terdegradasi secara terkendali dalam tubuh dapat digantikan oleh jaringan baru tanpa menimbulkan reaksi merugikan seperti *stress shielding effect* (Kartika et al., 2014; Lestari et al., 2017; Erryani et al., 2019).

2. Elemen Pemasu dan Teknologi yang Dikembangkan

Elemen pemasu dalam paduan berbasis magnesium yang dikembangkan dalam riset ini adalah kalsium (Ca) dan seng (Zn) (Kartika et al., 2014) dengan mempertimbangkan beberapa manfaat sesuai penjelasan rinci dalam Bab II.

Teknologi pemrosesan yang digunakan adalah metalurgi serbuk konvensional. Lebih lanjut, untuk menghasilkan paduan berpori dengan distribusi pori yang homogen, pendekatan melalui penggunaan *space holder* telah dicoba. Pendekatan ini memungkinkan kombinasi sifat-sifat unggul dari campuran

serbuk logam yang dipilih dapat disesuaikan dengan karakteristik target yang diinginkan, melalui kontrol struktur pori. Dalam penggunaan *space holder*, beberapa jenis senyawa telah digunakan, seperti partikel karbamida ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) (Annur et al., 2018), dan NaCl (Erryani et al., 2021) yang keduanya berhasil dimanfaatkan untuk menghasilkan paduan magnesium berpori.

3. Senyawa pengembang, Waktu *Milling*, Temperatur dan Waktu *Sintering*

Sebagai bagian dari upaya pengembangan material implan sementara (terdegradasi), telah dilakukan pengembangan paduan berpori Mg-Zn-Ca menggunakan metode metalurgi serbuk. Optimalisasi proses dilakukan melalui penggunaan berbagai jenis senyawa pengembang, antara lain: CaH_2 (Amal et al., 2016; Lestari et al., 2017; Kartika et al., 2018), TiH_2 (Lestari et al., 2018; Lestari et al., 2017), CaCO_3 (Erryani et al., 2018), CaCO_3 dengan dilapis Na_2SiO_3 (Erryani et al., 2019; Ashari, et al., 2019), SrCO_3 (Erryani et al., 2019), serta MgCaCO_3 (Lestari et al., 2021).

Hasil analisis termal diferensial (DTA) pada komposisi Mg-0,5CaH₂-2Zn dan Mg-1,2CaH₂-2Zn menunjukkan bahwa dekomposisi gas pada sistem Mg-Zn-CaH₂ terjadi pada rentang temperatur 320–400°C dan 580–630°C (Kartika et al., 2014). Sementara itu, penggunaan TiH_2 sebagai senyawa pengembang menunjukkan potensi terbaik untuk menghasilkan pori pada paduan magnesium, karena mampu melepaskan gas hidrogen dalam jumlah besar saat dipanaskan. Namun, pelepasan hidrogen berlebih dapat menyebabkan kerapuhan, retak, peningkatan laju korosi, dan memicu respons inflamasi yang mengganggu regenerasi tulang. Dalam penelitian ini, pelepasan hidrogen dari TiH_2 diamati di atmosfer argon dengan dua *pre-*

treatment berbeda: 450 dan 500 °C selama 2 jam. Hasil analisis menunjukkan bahwa pelepasan hidrogen dari TiH_2 terjadi dalam dua tahap. Terjadi pergeseran temperatur dekomposisi saat dilakukan *pre-treatment* pada temperatur lebih tinggi, yang disebabkan oleh terbentuknya lapisan oksida lebih tebal. Lapisan oksida ini berperan sebagai penghalang difusi gas sehingga menghambat laju pelepasan hidrogen (Lestari et al., 2018).

Riset terkait optimalisasi waktu *milling* pada paduan biner Mg-Ca dilakukan dengan variasi waktu *milling* selama 3, 5, dan 8 jam, serta temperatur *sintering* pada 450 dan 550°C, dengan waktu sinter yang dijaga konstan selama 1 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin lama waktu *milling* dan semakin tinggi temperatur *sintering* (hingga 550°C), maka nilai kekerasan dan laju korosi paduan juga meningkat. Peningkatan ini berkaitan dengan semakin dominannya pembentukan fasa Mg_2Ca , yang diketahui memiliki aktivitas elektrokimia tinggi, sehingga rentan terhadap korosi galvanik (Annur et al., 2017).

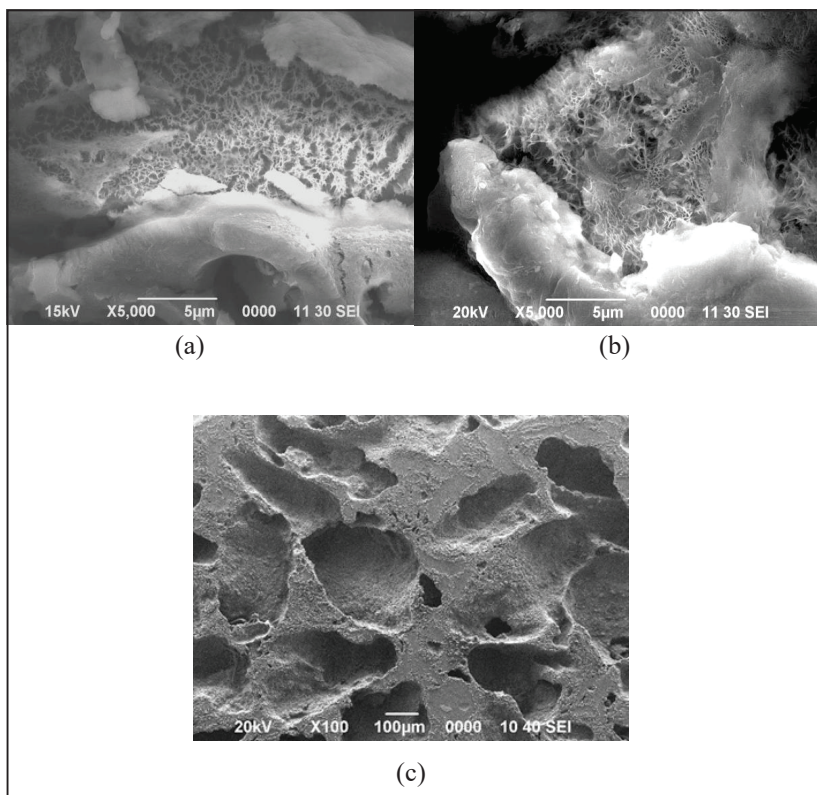
4. Pengembangan Paduan Berpori Mg-Ca-Zn Menggunakan Variasi Senyawa Pengembang dengan Teknologi Metalurgi Serbuk

Penelitian ini diawali dengan pembuatan paduan biner Mg-Ca dengan variasi kandungan Ca sebesar 0, 5, dan 7% berat, yang selanjutnya dicampur dengan senyawa pengembang CaH_2 dan disinter pada temperatur 520°C selama 1 jam. Proses awal ini menghasilkan pembentukan fasa MgO dan Mg_2Ca , yang diketahui berdampak negatif terhadap sifat mekanik dan ketahanan korosi paduan. Untuk mengatasi kendala tersebut, dilakukan optimasi proses pembuatan paduan berpori Mg-Ca-Zn dengan CaH_2 sebagai senyawa pengembang pada temperatur *sintering* yang bervariasi, yaitu 350, 520, dan 600 °C selama

2 jam dalam atmosfer argon. Hasil karakterisasi menunjukkan terbentuknya fasa utama seperti Mg, MgO, CaO, serta fasa intermetalik $\text{Ca}_2\text{Mg}_6\text{Zn}_3$ dan Mg_2Ca . Peningkatan kadar CaH_2 diketahui mendorong pembesaran ukuran pori dan meningkatkan kekasaran butir, sementara penambahan unsur Ca secara signifikan membantu menekan pembentukan fasa Mg_2Ca dan MgO yang merugikan dari segi kekuatan mekanik dan ketahanan korosi. Hal yang menarik, struktur pori seluler yang dihasilkan pada komposisi 10% CaH_2 menunjukkan potensi besar untuk aplikasi sebagai implan biomedis, karena mampu menghasilkan struktur yang menyerupai jaringan tulang alami dan berpori terbuka (Amal et al., 2016). Penambahan 10% berat CaH_2 pada Mg-2Zn tanpa Ca (Gambar 2.3[a]) memunculkan makropori kasar dan beberapa struktur pori seluler yang saling terhubung dan menghadirkan struktur pori yang lebih terbuka. Ketika ditambahkan hanya 1% berat CaH_2 bersama 9% berat Ca (Gambar 2.3[b]) tetap terbentuk pori-pori seluler, meski lebih terkendali sehingga memperkaya variasi mikrostruktur hasil riset ini (Amal et al., 2016).

Penggunaan senyawa pengembang CaH_2 pada komposisi paduan $\text{Mg}_3\text{Zn}_5\text{CaH}_2$ dengan variasi temperatur sintering 550, 600, dan 650°C selama 5 jam di atmosfer argon menunjukkan hasil pori tertutup. Tren yang dihasilkan menunjukkan semakin tinggi temperatur *sintering*, ukuran pori semakin besar, berkisar antara 50-300 μm , dengan jenis pori tertutup (Gambar 2.3[c]) (Lestari et al., 2017).

Dengan memadukan paduan Mg-Ca-Zn dan variasi senyawa pengembang TiH_2 , riset ini berhasil membuat paduan logam berpori tertutup berukuran 10–500 μm melalui proses *sintering* pada temperatur 550–600°C dalam atmosfer argon. Temuan yang paling menarik, semakin tinggi kandungan TiH_2 , porositas meningkat; sedangkan dengan penambahan Zn justru



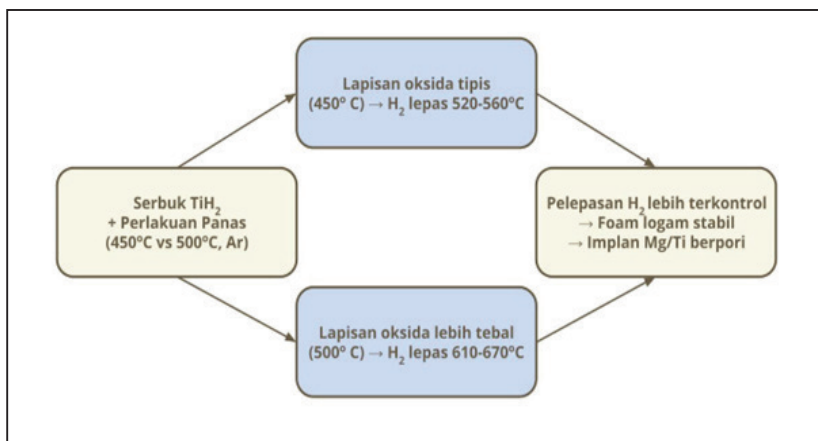
Keterangan: (a) $\text{Mg}_2\text{Zn}_{10}\text{CaH}_2$, (b) $\text{Mg}_2\text{Zn}_9\text{Ca}_1\text{CaH}_2$, (c) $\text{Mg}_3\text{Zn}_5\text{CaH}_2$ pada $T_{\text{sinter}} 600^\circ\text{C}$ selama 5 jam

Sumber: Amal (2016);Lestari (2017)

Gambar 2.3 Citra SEM pada berbagai komposisi paduan Mg-Ca-Zn dengan senyawa pengembang CaH_2

menutup pori melalui difusi padat, menurunkan porositas namun memperkuat struktur. Hasil puncak tercapai dengan 3% TiH₂ dan 10% Zn, menghasilkan kekuatan tekan hingga 229,84 MPa. Sementara itu, tanpa *pre-heating*, kombinasi Mg-Ca-Zn-(0,5–3% TiH₂) pada temperatur 550°C selama 3 jam menghasilkan kekerasan 30,78–50,96 HVN, seperti yang ditampilkan dalam Gambar 2.4. Hasil ini menegaskan potensi paduan Mg-Ca-Zn-TiH₂ sebagai material implan generasi baru yang ringan, kuat, dan biokompatibel (Lestari et al., 2018; Risanti et al., 2021). Fenomena yang ditunjukkan pada penelitian *The Effect of Thermal Pre-Treatment of Titanium Hydride* (Franciska et al., 2018) memberikan gambaran penting tentang bagaimana perlakuan panas awal dapat mengendalikan kinetika pelepasan gas hidrogen dari serbuk TiH₂. Hasilnya menunjukkan bahwa perlakuan pada temperatur 450 °C menghasilkan lapisan oksida tipis dengan pelepasan hidrogen pada rentang 520–560 °C, sedangkan perlakuan pada temperatur 500 °C menghasilkan lapisan oksida lebih tebal dengan pelepasan hidrogen tertunda pada 610–670 °C. Temuan ini relevan bagi pengembangan teknologi metal foaming untuk implan tulang berbasis logam, khususnya pada paduan titanium maupun magnesium, karena pelepasan gas terkontrol merupakan kunci dalam pembentukan porositas yang seragam dan stabil.

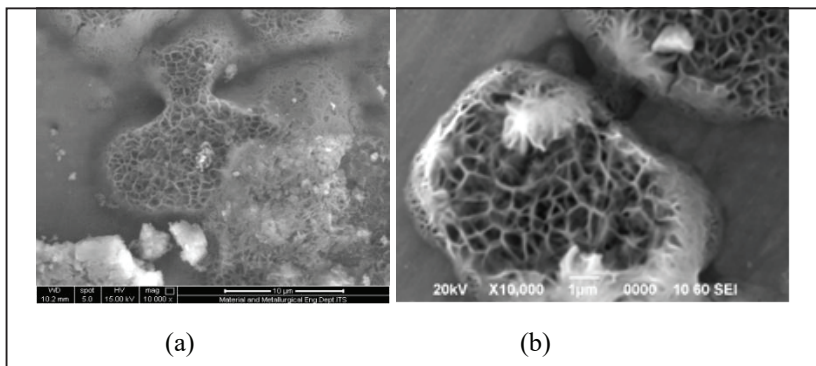
Dengan demikian, makalah ini dapat dijadikan rujukan strategis untuk memperkuat pemahaman mengenai mekanisme *gas release control* pada proses metalurgi serbuk, yang pada gilirannya berkontribusi pada optimasi desain implan berpori. Integrasi hasil riset ini ke dalam pengembangan implan bukan hanya mendukung peningkatan sifat mekanik dan biokompa-



Gambar 2.4 Efek *thermal pre-treatment* TiH_2 sebagai kinetika pelepasan gas hidrogen dari senyawa pengembang TiH_2

tibilitas, tetapi juga memastikan keberhasilan translasi teknologi logam berpori ke aplikasi klinis, sehingga berhubungan langsung dengan strategi riset nasional dalam mengembangkan implan tulang permanen dan terdegradasi.

Penggunaan senyawa pengembang SrCO_3 pada komposisi paduan $\text{Mg}_4\text{Zn}_5\text{SrCO}_3$ dengan $T_{\text{sinter}} 700^\circ\text{C}$ selama 3 jam menghasilkan kekuatan tekan 283,28 MPa (Erryani et al., 2019). Nilai ini mendekati nilai kuat tekan dari tulang *cortical*. Penggunaan dolomit sebagai senyawa pengembang dalam paduan Mg-Ca-Zn secara signifikan mengurangi laju degradasi dibandingkan CaCO_3 berlapis Na_2SiO_3 . Peningkatan densitas material dan formasi fase sekunder homogen menjadi kunci peningkatan ketahanan korosi, membuat metode ini menjanjikan untuk aplikasi implan sementara (Pramono et al., 2021).



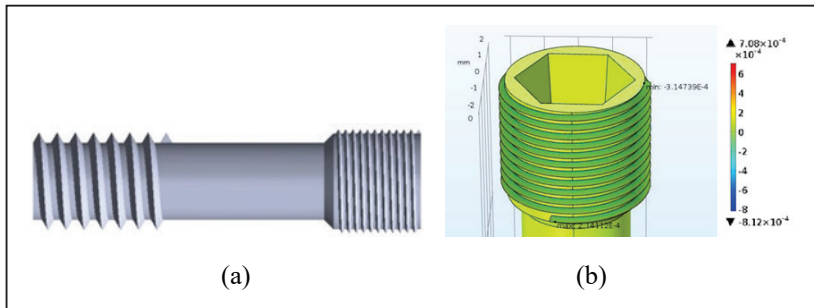
Keterangan: (a) *unpreheated* 0,5%TiH₂, (b) 3%TiH₂ *pre-heated* T=450°C selama 2 jam

Sumber: Risanti (2021)

Gambar 2.5 Citra SEM paduan Mg-Ca-Zn setelah proses sintering pada T=550°C selama 3 jam

Dalam penelitian ini, paduan Mg-Zn-Ca berpori juga telah dicoba dikembangkan dengan teknik *space holder* melalui metode metalurgi serbuk. Partikel karbamida (CO(NH₂)₂) dipilih sebagai partikel *space holder*. Komposisi *space holder* (karbamida) divariasikan untuk mempelajari pengaruh penambahan karbamida terhadap mikrostruktur, pembentukan fasa, dan juga sifat mekanik paduan Mg-Zn-Ca (Annur et al., 2018).

Analisis performa mekanis sekrup kompresi Herbert telah dilakukan menggunakan pendekatan komputasional FEA berdasarkan produk komersial berbahan paduan magnesium berpori, khususnya pada kasus osteotomi hallux valgus (Gambar 2.6). Hasil analisis ini kemudian dibandingkan dengan sekrup berbahan titanium dan magnesium. Dari perbandingan tersebut, sekrup berbahan paduan magnesium berpori (dengan porositas 40%) dinilai memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut



Keterangan: (a) *Herbert compression screw*, (b) *Graphical distribution of Herbert Screw*

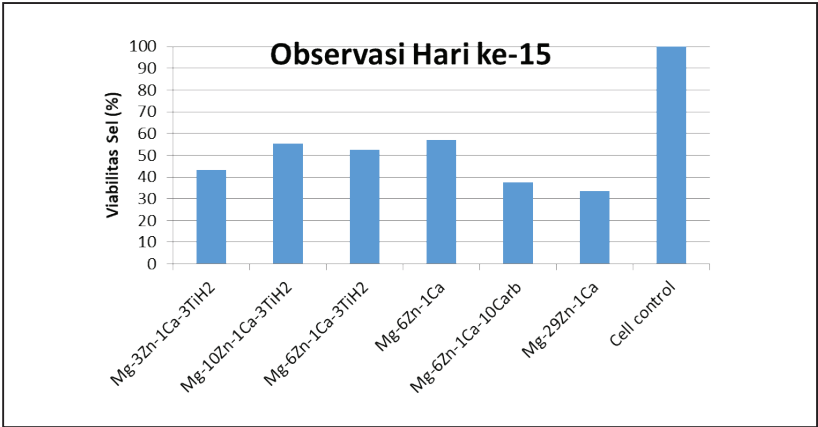
Sumber: Utomo (2020)

Gambar 2.6 Performa mekanis sekrup kompresi Herbert pada paduan Mg berpori

sebagai bahan alternatif sekrup Herbert. Namun demikian, peningkatan kekuatan mekanik atau modifikasi desain tetap diperlukan guna menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata sebelum dapat digunakan secara klinis (Utomo et al., 2020).

Hasil uji in-vivo menggunakan MTT Assay pada paduan Mg-1Ca-10Zn-3TiH₂ selama 15 hari menunjukkan tingkat kelangsungan hidup sel sebesar 50%. Temuan ini memperlihatkan potensi biokompatibilitas material tersebut, seperti ditampilkan dalam Gambar 2.7 yang menunjukkan tren viabilitas sel sepanjang periode observasi. Walaupun angka ini belum memenuhi standar klinis, temuan ini menegaskan bahwa paduan tersebut memiliki potensi biokompatibilitas awal yang signifikan. Dengan optimasi lebih lanjut melalui pengendalian porositas, perlakuan permukaan, serta rekayasa laju degradasi, paduan ini berpotensi dikembangkan sebagai kandidat implan

tulang terdegradasi berbasis magnesium. Oleh karena itu, data ini dapat dijadikan pijakan untuk riset lanjutan menuju material yang lebih aman, efektif, dan sesuai dengan kebutuhan klinis di Indonesia.



Sumber: Kartika (n.d.)

Gambar 2.7 Hasil uji in-vivo viabilitas sel setelah 15 hari pada paduan berpori Mg-1Ca-10Zn-3TiH₂ menghasilkan 50% sel hidup

IV. IMPLIKASI STRATEGIS IMPLAN PERMANEN DAN IMPLAN SEMENTARA TERHADAP KEUNGGULAN INSTITUSI RISET

Pengembangan implan tulang permanen dan implan sementara (terdegradasi) yang dipaparkan dalam riset ini memiliki implikasi strategis yang signifikan terhadap keunggulan institusi riset, baik dari sisi kontribusi ilmiah, inovasi teknologi, maupun relevansi sosial-ekonomi.

A. Pengembangan Implan Permanen Berbasis Paduan Co-Cr-Mo dan Titanium

Riset awal sebagai upaya untuk mendalami proses deformasi panas dari paduan berbasis Co-Cr-Mo sehingga diperoleh keseimbangan optimal antara kekuatan, keuletan, dan ketahanan lelah sebagai tiga pilar penting untuk menentukan daya tahan dan keandalan implan tulang permanen dalam jangka panjang (Kartika et al., 2009). Publikasi hasil riset ini telah tersitasi sebanyak 27 kali oleh berbagai penelitian lanjutan di bidang pengembangan material medis dan proses deformasi panas.

Pendekatan riset yang terintegrasi pada paduan berbasis Co-Cr-Mo, mulai dari desain komposisi dengan mengganti elemen pepadu nikel yang toksik dengan nitrogen, serta menambahkan elemen pepadu lainnya seperti mangan dan karbon disertai dengan kontrol proses termomekanik untuk meningkatkan kekuatan, keuletan, ketahanan korosi, serta stabilitas fasa (Yamanaka et al., 2019), dimana nilai temuan ini diakui secara luas, melalui perolehan 43 sitasi dari peneliti lain. Sebagai catatan penting dari riset berbasis Co-Cr dalam peningkatan

kadar karbon dan nitrogen dapat memicu terbentuknya presipitat karbida yang berdampak negatif terhadap keuletan material. Temuan penting ini menjadi dasar bagi riset lanjutan untuk merumuskan keseimbangan optimal antara kekuatan dan keuletan, sehingga mendukung performa jangka panjang implan tulang (Rokhmanto et al., 2023).

Sementara itu, pada pengembangan implan THA berbasis paduan titanium, riset ini mengangkat isu penting mengenai kesesuaian desain implan dengan morfometri tulang penduduk Indonesia. Upaya merancang purwarupa berbasis data lokal, validasi klinis bersama rumah sakit nasional terkemuka, hingga pengembangan database antropometri nasional, menjadi kontribusi strategis yang diakui dalam publikasi ilmiah dan tersitasi di berbagai riset lanjutan (Utomo et al., 2021). Selain menghasilkan inovasi desain dan material, riset ini juga menunjukkan kepekaan akademik terhadap tantangan klinis seperti *stress shielding*, dengan mengembangkan paduan titanium baru yang lebih mendekati karakteristik elastisitas tulang manusia (Senopati et al., 2024; Senopati et al., 2019; Senopati et al., 2020). Pendekatan komprehensif yang memadukan desain, material, dan data antropometri nasional inilah yang menjadi kekuatan strategis institusi riset: tidak hanya menghasilkan produk inovatif, tetapi juga membangun fondasi ilmu pengetahuan yang bermanfaat untuk kebutuhan kesehatan nasional.

B. Pengembangan Implan Sementara Berbasis Paduan Magnesium Berpori

Riset material implan terdegradasi berbasis paduan Mg-Zn-Ca berpori berhasil menunjukkan keunggulan ilmiah dan aplikatif. Kontribusi orisinal riset ini terletak pada pemahaman mendalam tentang pengaruh variasi kadar Ca dan temperatur *sintering*

terhadap pembentukan fasa dan struktur mikro. Kontribusi mendalam hasil riset lainnya pada penambahan Ca terhadap paduan logam berpori berbasis magnesium adalah mampu menghasilkan struktur yang menyerupai jaringan tulang alami dan berpori terbuka (Amal et al., 2016).

Hasil riset mengenai pengembangan paduan Mg-Ca-Zn dengan bahan pengembang TiH_2 , yang berhasil menghasilkan paduan logam pori tertutup dengan ukuran pori 10–500 μm dan memiliki kekuatan tekan hingga 229,84 MPa, tidak hanya menjadi capaian ilmiah semata, tetapi juga memiliki implikasi strategis yang sangat signifikan bagi keunggulan institusi riset. Inovasi ini menunjukkan kemampuan institusi untuk merancang material implan sementara yang ringan, kuat, dan berpori sesuai kebutuhan rekayasa jaringan tulang. Penemuan hubungan antara variasi TiH_2 yang meningkatkan porositas dan peran Zn yang menutup pori melalui difusi padat, juga mencerminkan kedalaman riset dalam memahami dan mengendalikan mikrostruktur material (Lestari et al., 2018; Kartika et al., 2021). Dari sisi strategis, capaian ini mencerminkan kemampuan dalam mengendalikan mikrostruktur melalui peran TiH_2 yang meningkatkan porositas serta Zn yang berkontribusi pada penutupan pori lewat difusi padat. Implikasi ilmiahnya sangat besar: material yang dihasilkan tidak sekadar *scaffold* ringan dan berpori, tetapi juga memiliki kekuatan mekanik yang berpotensi menanggung beban berat. Namun, jika dibandingkan dengan target aplikasi trabekular (*cancellous bone*), nilai 229 MPa justru terlalu tinggi. Trabekular hanya menuntut kekuatan tekan di kisaran 0,1–16 MPa, sehingga potensi terjadinya *stress shielding* perlu dicermati. Sebaliknya, jika ditujukan untuk aplikasi kortikal atau zona transisi yang menanggung beban, capaian ini bisa dikatakan sangat ideal dan bahkan melampaui target desain.

Riset implan sementara melalui pendekatan sistematis menghasilkan eksplorasi komposisi paduan, senyawa pengembang, optimasi temperatur *sintering*, hingga uji biokompatibilitas dan analisis performa mekanik berbasis simulasi (FEA). Inovasi ini membuka peluang pengembangan implan yang mendukung regenerasi jaringan secara terkendali dan dapat terurai tanpa operasi lanjutan, sekaligus mengurangi risiko *stress shielding*.

C. Implikasi Strategis Terhadap Institusi Riset

Gabungan riset implan permanen dan implan sementara memperkuat posisi institusi riset sebagai pelopor pengembangan material maju berbasis kebutuhan nasional. Hasil riset tidak hanya mendukung pemenuhan standar internasional (misalnya ASTM F75 untuk Co-Cr-Mo) dan memenuhi kriteria biokompatibilitas serta keamanan, tetapi juga meningkatkan nilai tambah melalui pemanfaatan data antropometri penduduk Indonesia. Ini selaras dengan kebijakan nasional seperti RPJMN 2020–2024, RIRN 2017–2045, TKDN, dan Inpres Nomor 2 Tahun 2022 yang menekankan kemandirian teknologi serta substitusi impor.

Peta jalan pengembangan implan tulang menunjukkan pola yang bersifat evolutif sekaligus saling melengkapi. Paduan Co–Cr dikembangkan terlebih dahulu sebagai fondasi untuk memenuhi standar internasional dan kebutuhan implan permanen dengan ketahanan mekanik tinggi. Selanjutnya, riset bertransformasi ke paduan titanium yang lebih biokompatibel, dengan fokus penyesuaian desain terhadap antropometri pasien Indonesia serta upaya mengatasi isu klinis seperti *stress shielding*. Pada tahap terdepan, penelitian diarahkan pada paduan magnesium berpori sebagai implan terdegradasi, yang membuka peluang baru untuk mendukung regenerasi jaringan tulang tanpa operasi lanjutan. Dengan demikian, pengembangan Co–Cr, Ti, dan Mg

tidak berdiri sendiri, melainkan merupakan satu seri roadmap siklus inovasi yang berkembang secara bertahap namun juga berjalan simultan sesuai kebutuhan klinis dan pasar. Pendekatan ini memperlihatkan kapasitas institusi riset untuk beradaptasi, sekaligus memimpin dalam menjawab tantangan teknologi medis nasional dan global.

Dengan demikian, upaya riset ini tidak hanya menghasilkan inovasi material dan desain implan yang relevan secara klinis dan ilmiah, tetapi juga memperkuat daya saing institusi riset sebagai pusat unggulan nasional dalam pengembangan teknologi implan yang lebih inklusif, adaptif, dan berkelanjutan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

V. MENJAWAB TANTANGAN MASA DEPAN: STRATEGI PENGEMBANGAN IMPLAN TULANG PERMANEN DAN SEMENTARA

Tantangan pengembangan implan tulang masa depan, baik implan permanen maupun implan sementara (terdegradasi) sangat kompleks. Aspek yang dihadapi meliputi teknologi manufaktur, karakteristik material, regulasi, serta kesiapan ekosistem riset dan industri. Faktor-faktor mendesak seperti tingginya angka cedera akibat kecelakaan lalu lintas, meningkatnya jumlah penderita penyakit degeneratif seiring penuaan populasi, serta ketergantungan tinggi pada produk impor menegaskan pentingnya inovasi implan dalam negeri.

A. Tantangan dalam Pengembangan Implan Tulang Permanen

Implan permanen menghadapi tantangan dari sisi manufaktur, material, dan klinis. Permintaan terus meningkat seiring bertambahnya populasi lanjut usia yang membutuhkan layanan ortopedi, khususnya prosedur penggantian sendi panggul (THA). Tantangan utama adalah menciptakan implan berkualitas yang dapat diproduksi massal dengan biaya terjangkau tanpa mengorbankan performa, sejalan dengan target pemerintah dalam mengurangi ketergantungan impor alat kesehatan.

Teknologi manufaktur presisi seperti pemesinan *CNC*, pengecoran dan *additive manufacturing* (*3D printing*) diperlukan untuk memastikan kesesuaian geometri dan kualitas permukaan implan. Selain itu, implan harus tahan terhadap kelelahan material akibat aktivitas fisik pasien Indonesia yang

relatif tinggi, meski berusia lanjut. Tantangan lainnya meliputi risiko keausan, korosi, dan respon imun jangka panjang yang dapat memicu inflamasi kronis dan kegagalan implan. Untuk mengatasi hal ini, dibutuhkan inovasi pada teknologi pemaduan logam, nanomaterial, serta modifikasi permukaan (misalnya pelapisan dengan *polishing*, *plasma spraying*, atau *anodizing*) guna meningkatkan osteointegrasi, ketahanan korosi, dan biokompatibilitas.

Aspek regulasi dan standarisasi nasional juga krusial. Selain memastikan keamanan, pemerintah menargetkan penurunan biaya pembiayaan JKN dengan mendorong penggunaan implan produksi dalam negeri yang aman, berkualitas, dan sesuai karakteristik pasien Indonesia.

B. Tantangan dalam Pengembangan Implan Sementara Berbasis Logam Berpori

Implan sementara (terdegradasi) berbasis magnesium menawarkan solusi inovatif, terutama untuk kasus fraktur atau cedera tulang pada populasi muda dan pediatrik. Namun, tantangan utamanya adalah menjaga keseimbangan antara kekuatan mekanik dan laju degradasi. Implan harus cukup kuat menopang struktur tulang selama penyembuhan, tetapi juga dapat terurai secara bertahap tanpa menimbulkan efek samping.

Selain tantangan-tantangan tersebut, hasil penelitian terbaru pada paduan berpori Mg-1Ca-10Zn-3TiH₂ memperlihatkan potensi penting untuk pengembangan ke depan. Uji *in-vivo* menggunakan metode MTT Assay menunjukkan bahwa setelah 15 hari tingkat viabilitas sel mencapai 50% (Kartika et al., n.d.). Walaupun angka ini belum sepenuhnya ideal untuk aplikasi klinis, temuan tersebut menegaskan bahwa material berbasis magnesium dengan senyawa pengembang TiH₂ tetap memiliki

biokompatibilitas awal yang relevan. Dengan optimasi lebih lanjut, seperti pengendalian ukuran pori, perlakuan permukaan, serta rekayasa laju degradasi, paduan ini berpotensi menjadi kandidat implan terdegradasi yang lebih aman dan adaptif untuk mendukung regenerasi tulang.

Prospek ini tidak hanya penting dari sisi sains dan teknologi, tetapi juga sejalan dengan tujuan pembangunan nasional. Dari perspektif *Sustainable Development Goals* (SDG), pengembangan material ini mendukung SDG 3 (*Good Health and Wellbeing*) melalui peningkatan akses pada terapi ortopedi inovatif; SDG 8 (*Decent Work and Economic Growth*) melalui penciptaan lapangan kerja di sektor industri biomaterial; serta SDG 9 (*Industry, Innovation, and Infrastructure*) dengan memperkuat industri manufaktur berbasis teknologi tinggi. Di tingkat nasional, arah penelitian ini juga selaras dengan Asta Cita Pemerintah, khususnya peningkatan kualitas SDM, penguasaan iptek, serta kemandirian ekonomi berbasis riset dan inovasi. Dengan demikian, paduan logam berpori berbasis magnesium tidak hanya merepresentasikan peluang ilmiah, tetapi juga menjadi bagian dari strategi besar menuju kemandirian kesehatan nasional yang berbasis inovasi material lokal.

Masalah yang sering muncul adalah korosi terlalu cepat yang memicu pelepasan ion magnesium berlebih, perubahan pH lokal, dan akumulasi gas hidrogen. Oleh karena itu, pengendalian porositas pada logam berpori menjadi kunci agar implan tetap mendukung regenerasi jaringan sambil mempertahankan kekuatan mekanik yang memadai. Struktur berpori yang terkontrol, termasuk 3D-magnesium *scaffolds*, terbukti dapat memperlambat korosi sekaligus mendukung pertumbuhan tulang.

Tantangan lain adalah keterbatasan data klinis jangka panjang. Untuk itu, pemerintah melalui Kemenkes dan BPOM

perlu mendorong kebijakan regulasi yang seimbang: menjaga keselamatan pasien, namun tetap mendukung percepatan inovasi produk dalam negeri melalui penelitian lanjutan dan uji klinis komprehensif.

C. Peran *Stakeholder* dalam Menjawab Tantangan

Keberhasilan pengembangan implan sangat ditentukan oleh kolaborasi lintas sektor. Akademisi dan peneliti (BRIN, UI, ITB) berperan dalam pengembangan teknologi dasar, perancangan prototipe, dan penyusunan database antropometri pasien Indonesia. Industri nasional (BUMN dan swasta) mengembangkan manufaktur massal dengan standar mutu tinggi serta investasi pada teknologi modern. Profesi klinis (PABOI, rumah sakit rujukan) memberikan masukan praktis terkait kebutuhan klinis dan validasi desain implan. Regulator (Kemenkes, BPOM, Kemenperin) menjamin keamanan, efektivitas, dan standardisasi produk. Investor dan pendana (LPDP, INA) memastikan keberlanjutan riset hingga komersialisasi.

D. Integrasi dengan Teknologi Pendukung dan Agenda Nasional

Pengembangan implan masa depan juga erat dengan kemajuan berbagai disiplin ilmu dan teknologi pendukung (*adjacent technologies*). Teknologi metalurgi serbuk mendukung produksi paduan berpori, heat treatment dan thermomechanical processing mengoptimalkan mikrostruktur logam, sementara AI dan data science membantu analisis morfometri berbasis citra medis untuk personalisasi desain implan. *Additive manufacturing (3D printing)* memungkinkan fabrikasi presisi, sedangkan nano

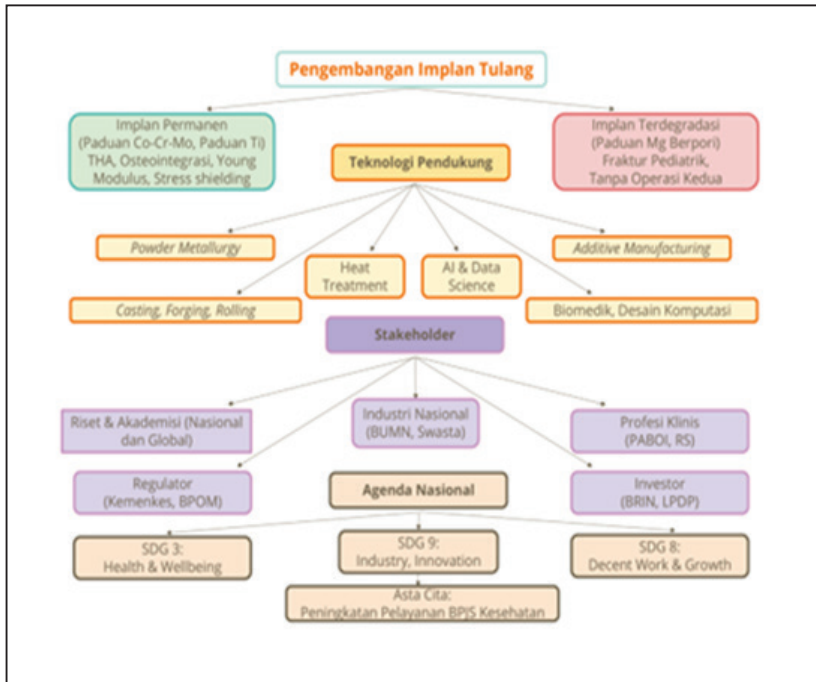
material dan modifikasi teknologi permukaan meningkatkan osteointegrasi dan ketahanan korosi. Biomekanik dan komputasi modeling mendukung perancangan berbasis simulasi, termasuk prediksi risiko seperti *stress shielding*.

Sinergi riset implan dengan teknologi pendukung tersebut memperluas “pohon keilmuan” dalam ekosistem material, manufaktur presisi, dan teknologi kesehatan (Gambar 5.1). Manfaatnya bersifat multidimensi:

1. Dari sisi kesehatan, memperluas akses pada implan yang aman, adaptif, dan terjangkau.
2. Dari sisi ekonomi, memperkuat rantai pasok manufaktur teknologi tinggi, menciptakan lapangan kerja, dan meningkatkan nilai tambah produk dalam negeri.
3. Dari sisi sosial, memperluas layanan ortopedi, terutama bagi lansia dan anak-anak.

Capaian ini selaras dengan *Sustainable Development Goals* (SDG 3, 8, 9) serta Asta Cita Pemerintah dalam meningkatkan kualitas SDM, penguasaan iptek, dan kemandirian ekonomi berbasis inovasi.

Dengan demikian, pengembangan implan tulang, baik permanen maupun terdegradasi, tidak hanya menjawab kebutuhan medis dan demografi, tetapi juga menjadi motor penggerak transformasi ilmu pengetahuan, teknologi, serta pembangunan nasional.



Gambar 5.1 Pohon keilmuan dan ekosistem pengembangan implan tulang

VI. KESIMPULAN

Perjalanan panjang dalam riset pengembangan material implan tulang, baik yang bersifat permanen maupun implan sementara (terdegradasi), merupakan cerminan dari upaya strategis dalam menjawab tantangan nyata di bidang kesehatan dan teknologi material di Indonesia. Orasi ini telah berusaha menguraikan sinergi antara kemajuan riset material implan dengan dinamika demografi nasional yang terus berkembang.

Perolehan penting dari riset ini dalam pengembangan material implan tulang permanen meliputi;

- Paten desain implan THA yang disesuaikan dengan antropometri tulang penduduk dewasa Indonesia, terdaftar dengan nomor P00202108162.
- Purwarupa implan THA tanpa semen yang dirancang khusus untuk ukuran dan karakteristik anatomi lokal, terdiri atas *femoral stem*, *acetabular liner* dan *acetabular cup*, yang diproduksi menggunakan teknologi CNC *machining*.
- Penggunaan material paduan Ti-6Al-4V untuk komponen *femoral stem* dan *acetabular cup*, serta bahan polimer untuk *acetabular liner*, yang berfungsi mendukung pergerakan sendi dan menyerap beban kejut.

Penelitian mengenai implan sementara (terdegradasi) telah menghasilkan antara lain :

- Material paduan magnesium berpori yang memiliki struktur dan sifat mekanik mendekati karakteristik tulang

manusia (*cortical bone* dan *cancellous bone*). Dengan penggunaan berbagai bahan pembentuk pori dan teknik metalurgi serbuk, diperoleh beberapa komposisi paduan magnesium dengan kekuatan yang memadai serta memiliki laju degradasi yang relatif terkendali.

- Uji biokompatibilitas yang menunjukkan tingkat viabilitas sel yang tinggi, sehingga material ini berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai alternatif implan yang dapat terurai secara alami di dalam tubuh.

Pengembangan implan tulang permanen dan implan sementara (terdegradasi) merupakan tantangan ilmiah sekaligus strategi nasional untuk kemandirian kesehatan. Di tengah tingginya kebutuhan ortopedi, inovasi material sangatlah penting untuk menghadirkan implan yang aman dan sesuai bagi pasien Indonesia.

VII. PENUTUP

Dalam perjalanan pengembangan teknologi medis, implan tulang permanen dan implan tulang sementara (terdegradasi) hadir sebagai dua arah inovasi yang sama-sama krusial. Kedua jenis implan ini memiliki tujuan klinis, basis keilmuan, serta segmen pasar yang berbeda, namun saling melengkapi dalam upaya memperkuat kemandirian kesehatan nasional.

Implan permanen, seperti yang terbuat dari paduan titanium atau kobalt-krom, ditujukan untuk kasus kerusakan sendi atau tulang yang berat dan bersifat jangka panjang, misalnya pada pasien *osteoarthritis* lanjut atau trauma berat yang membutuhkan implant THA. Segmen ini memiliki pangsa pasar yang luas dan stabil karena tingginya angka kejadian penyakit degeneratif dan kecelakaan, sehingga riset diarahkan pada peningkatan daya tahan, biokompatibilitas, dan desain sesuai antropometri pasien Indonesia.

Sebaliknya, implan terdegradasi, terutama berbasis paduan magnesium dengan teknologi logam berpori, difokuskan untuk aplikasi sementara, misalnya mendukung penyembuhan fraktur, rekonstruksi tulang, atau kasus pediatrik di mana pertumbuhan tulang masih berlangsung. Pasar implan jenis ini berkembang pesat secara global karena menawarkan keunggulan berupa kemampuan terurai alami dalam tubuh, mengurangi kebutuhan operasi lanjutan, serta lebih sesuai dengan kebutuhan klinis anak-anak.

Dengan demikian, pengembangan implan permanen dan terdegradasi perlu dilakukan secara paralel: implan permanen menyasar ketahanan jangka panjang dan segmen pasar besar

pasien dewasa/lansia, sementara implan terdegradasi menjawab kebutuhan penyembuhan sementara, regenerasi tulang, dan kasus pediatrik. Dari sisi keilmuan, keduanya juga membutuhkan pendekatan berbeda. Dimana implan permanen menekankan rekayasa mekanik dan ketahanan material, sedangkan implan sementara (terdegradasi) menuntut riset biomaterial bioaktif dan kontrol degradasi.

Secara strategis, keberhasilan pengembangan kedua jenis implan akan mengurangi ketergantungan pada produk impor, memperkuat daya saing industri biomaterial nasional, serta membuka peluang pasar domestik dan global. Di Indonesia, BRIN bersama perguruan tinggi seperti Universitas Indonesia (UI) dan Institut Teknologi Bandung (ITB) berperan dalam riset dasar hingga purwarupa; industri medis BUMN dan swasta dalam produksi massal; sementara masukan klinis dari dokter ortopedi melalui PABOI, serta pengawasan dari Kementerian Kesehatan dan BPOM, menjamin mutu dan keamanan. Dukungan pendanaan riset dari LPDP dan investor menjadi kunci untuk menjaga kesinambungan inovasi.

Sebagai penutup, mari kita pahami bahwa implan permanen dan implan terdegradasi bukanlah pilihan yang saling menggantikan, tetapi dua inovasi yang saling melengkapi, ditujukan untuk kebutuhan klinis yang berbeda dan pasar yang sama-sama besar. Sinergi antar akademisi, industri, pemerintah, dan profesi medis menjadi pondasi kokoh untuk mewujudkan solusi implan tulang yang inovatif, aman, dan berkelanjutan bagi kesehatan masyarakat Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan segala kerendahan hati dan rasa syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, izinkan saya menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada berbagai pihak yang telah memberikan dukungan, arahan, dan kepercayaan kepada saya hingga tercapainya amanah sebagai Profesor Riset.

Pertama-tama, saya sampaikan rasa hormat dan terima kasih yang mendalam kepada Presiden Republik Indonesia, Bapak Prabowo Subianto atas dukungan dan perhatian beliau terhadap pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di tanah air, serta penguatan peran para periset dalam membangun bangsa dan Presiden Republik Indonesia ke-7 Bapak Ir. Joko Widodo atas amanat dan penugasan saya sebagai peneliti ahli utama di BRIN.

Ucapan terima kasih kepada Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Prof. Dr. Arif Satria dan Kepala BRIN periode 2021–2025 Dr. Laksana Tri Handoko, M.Sc, atas arahan dan kepercayaan yang diberikan dalam mendukung pengembangan karier kepakaran saya sebagai peneliti.

Ucapan terima kasih saya lanjutkan kepada Wakil Kepala BRIN Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian M.Sc., DESD., ASEAN Eng., atas dukungan beliau dalam menciptakan ekosistem riset yang kondusif bagi para periset untuk berkarya dan berkembang secara profesional.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Ketua Majelis Pengukuhan Profesor Riset Prof. Ir. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, MSCE, Ph.D. beserta Sekretaris Majelis Prof. Dr. Ir. Zainal Arifin, M.Sc., atas pelaksanaan proses pengusulan dan penilaian jabatan fungsional ini secara objektif dan profesional.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Tim Penelaah Naskah Orasi Ilmiah Prof. Dr. Jarot Raharjo, ST., MSc., Prof. Dr. Efendi, S.T., M.T., Prof. Dr. Andika Widya Pramono, M.Sc, Prof. Dr. Nurul Taufiqu Rochman, M.Eng dan Prof. Dr. Yudan Wulanza, M.Sc., atas penelaahan, masukan yang konstruktif, serta semangat akademik yang turut menyempurnakan naskah orasi saya.

Ucapan terima kasih kepada Sekretaris Utama BRIN Rr. Nur Tri Aries Suestiningtyas S.IP., M.A., Kepala Organisasi Riset Prof. Dr. Ratno Nuryadi M.Eng., dan Kepala Biro Organisasi dan Sumber Daya Manusia Ratih Retno Wulandari S.Sos., M.Si., yang telah memberikan dukungan administratif maupun kebijakan yang sangat berarti dalam perjalanan proses pengukuhan ini.

Ucapan terima kasih kepada Prof. Akihiko Chiba, Prof. Dr. Rudi Subagja, para kolega peneliti di kelompok riset Metalurgi Paduan Non-Besi (Dr. Yudi Nugraha Thaha, Dr. Franciska Pramuji Lestari, Dr. Dhyah Annur, Aprilia Erryani, M.Si, Fendy Rokhmanto, M.Si, Galih Senopati, M.T, M. Satrio Utomo, M.Sc, Joko Triwardono, M.T), mitra kerja Talitha Asmaria, M.Sc Pusat Riset Biomedis BRIN, Dr. Shingo Kurosu, Dr. Yamanaka Kenta, Tohoku University Jepang, Dr. M. Ikhlasul Amal, M.Sc Pusat Riset Sistem Nanoteknologi BRIN dan kolaborator Dr. dr. Rahyussalim, SpOT (K), Prof. Dr. dr Ismail Hadisoebroto Dilogo, SpOT (K) RSUPN Dr. Cipto Mangunkusumo, Sarwono PT. Agru Spesial Industri atas sinergi, diskusi, dan kerja sama

yang telah memperkaya wawasan dan memperluas cakrawala keilmuan saya.

Ucapan terima kasih kepada orang tua saya Ibunda Imas Rokayah (almarhumah) dan ayahanda Bapak Iro Karnawijaya (almarhum) dan tante tercinta Ibu Pupu Marpuáh (almarhumah) serta keluarga tercinta, Iwan Kurniawan suami saya, ananda Muhammad Zaydan Kamil, dan seluruh keluarga besar (Tata, Mira, Ilham, Kun, Fiza, Ari, Rika, Irfie) yang senantiasa menjadi sumber semangat, penghiburan, dan keteguhan dalam menjalani perjalanan panjang di dunia riset ini.

Ucapan terima kasih kepada Panitia Pelaksana Pengukuhan, yang telah mempersiapkan acara ini dengan baik, serta kepada seluruh pihak lain yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu.

Semoga segala dukungan dan kebaikan yang telah diberikan kepada saya menjadi amal jariyah yang berlipat ganda pahalanya. Saya berkomitmen untuk terus berkarya, mengembangkan ilmu pengetahuan, dan mengabdikan untuk kemajuan bangsa dan negara.

Terima kasih.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal, S., Curtin, J., Duffy, B., & Jaiswal, S. (2016). Biodegradable magnesium alloys for orthopaedic applications: A review on corrosion, biocompatibility and surface modifications. *Materials Science and Engineering C*, 68, 948–963. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.06.020>
- Amal, M. I., Annur, D., Lestari, F. P., Sutowo, C., & **Kartika, I.** (2016). Processing of porous Mg-Zn-Ca alloy via powder metallurgy. *AIP Conference Proceedings*, 1778. <https://doi.org/10.1063/1.4965744>
- Anderson, J., Neary, F., & Pickstone, J. V. (2007). Total Hip Replacement: Introduction, Sources and Outline. *Surgeons, Manufacturers and Patients*, 1–18. https://doi.org/10.1057/9780230596238_1
- Annur, D., Amal, M. I., Sutowo, C., Sukaryo, S. G., & **Kartika, I.** (2015). Sintering of Mg-Ca-Zn Alloy Metallic Foam Based on Mg-Zn-CaH₂ System. *Advanced Materials Research*, 1112, 474–477. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1112.474>
- Annur, D., A., Suhardi, M. I., Amal, M. S., Anwar, **Kartika, I.** (2017). Preface: 2nd International Symposium on Frontier of Applied Physics (ISFAP 2016). *Journal of Physics: Conference Series*, 817(1), 012062. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/755/1/011001>
- Annur, D., Erryani, A., Lestari, F. P., Putrayasa, I. N., Gede, P. A., & **Kartika, I.** (2017). Microstructure and corrosion study of porous Mg-Zn-Ca alloy in simulated body fluid. *Materials Research Express*, 4(3). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa65fd>
- Annur, D., Lestari, F. P., Erryani, A., Sijabat, F. A., Astawa, I. N. G. P., & **Kartika, I.** (2018). Preparation and characterization of porous Mg-Zn-Ca alloy by space holder technique. *AIP Conference Proceedings*, 1945. <https://doi.org/10.1063/1.5030237>

- Annur, D., **Kartika, I.**, Supriadi, S., & Suharno, B. (2021). Titanium and titanium based alloy prepared by spark plasma sintering method for biomedical implant applications - A review. *Materials Research Express*, 8(1). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abd969>
- Annur, D., Triwardono, J., Rokhmanto, F., **Kartika, I.**, Dimiyati, A., Supriadi, S., & Suharno, B. (2021). Effect of the carbamide content on the preparation of porous Ti6Al4V using arc plasma sintering method. *AIP Conference Proceedings*, 2382, 1–8. <https://doi.org/10.1063/5.0060861>
- Aprianto, D. R., Parenrengi, M. A., Utomo, B., Asra Al Fauzi, E. A. S., & Suryawan, A. (2022). Comparison of autograft and implant cranioplasty in pediatrics: A meta-analysis. *Surgical Neurology International*, 13(206).
- Aprilia Erryani, Novantoro, Franciska Pramuji Lestari, Made Subekti Dwijaya, **Kartika I.** (2019). Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Paduan Magnesium Berpori Dengan Variasi Komposisi Senyawa pengembang Dan Temperatur Sinter Untuk Aplikasi Implan Mampu Luruh. *Metalurgi*, 34(2), 61. <https://doi.org/10.14203/metalurgi.v34i2.469>
- Asmaria, T., Mayasari, D. A., Febrananda, A. D. G., Nurul, N., Rahyussalim, A. J., & **Kartika, I.** (2022). Computed tomography image analysis for Indonesian total hip arthroplasty designs. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(6), 6123–6131. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i6.pp6123-6131>
- Asmaria, T., Rahmi, R., Utomo, M. S., Annur, D., Malau, D. P., Amal, M. I., & **Kartika, I.** (2020). Deteksi Tepi Untuk Validasi Model Tiga Dimensi Tulang Panggul Pada Perencanaan Desain Dan Fabrikasi Implan. *Widyariset*, 6(1), 51. <https://doi.org/10.14203/widyariset.6.1.2020.51-61>

- Badan Pusat Statistik. (2025a). *Jumlah Kecelakaan, Korban Mati, Luka Berat, Luka Ringan, dan Kerugian Materi*. <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/NTEzIzl%3D/jumlah-kecelakaan-korban-mati-luka-berat-luka-ringan-dan-kerugian-materi.html>
- Badan Pusat Statistik. (2025b). *Jumlah penduduk Indonesia 2025*. <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/3/V1ZSbFRUY3ITb-FpEYTNsVWNGcDZjek53YkhsNFFUMDkjMw==/penduduk-laju-pertumbuhan-penduduk-distribusi-persentase-penduduk-kepadatan-penduduk-rasio-jenis-kelamin-penduduk-menurut-provinsi.html?year=2025>
- Bauer, S., Schmuki, P., von der Mark, K., & Park, J. (2013). Engineering biocompatible implant surfaces: Part I: Materials and surfaces. *Progress in Materials Science*, 58(3), 261–326. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.09.001>
- BPS. (2023). Kajian Tematik: Hubungan Faktor Sosial dan Demografi dengan Pekerja Lansia di Indonesia. In *Indikator Kesejahteraan Rakyat 2023* (p. 5)
- Erryani, A., Al-Aziz, I., Lestari, F. P., & **Kartika, I.** (2019). Fabrication, microstructure and corrosion study of porous Mg-Ca-Zn using CaCO₃ pre-treatment with sodium trisilicate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 541(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/541/1/012033>
- Erryani, A., Greenita, C., Lestari, F. P., Utomo, M. S., **Kartika, I.**, & Nugraha, T. (2021). Casting technique of NaCl space-holder using 3D printed PLA template for manufacture porous Mg alloy. *AIP Conference Proceedings*, 2382, 1–7. <https://doi.org/10.1063/5.0060617>
- Erryani, A., Lestari, F. P., Annur, D., & Amal, M. I., **Kartika, I.** (2018). Laju dan Morfologi Korosi Paduan Logam Berpori Mg-Ca-Zn dengan Foaming Agent CaCO₃ Corrothion Rate and Morphology of Porous Metal Alloy. *Widyariset*, 4(1).

- Erryani, A., Pramuji, F., Annur, D., Amal, M. I., & **Kartika, I.** (2017). Microstructures and Mechanical Study of Mg Alloy Foam Based on Mg-Zn-Ca-CaCO₃ System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 202(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/202/1/012028>
- Fendy, R., Bambang, S., & **Kartika, I.** (2016). Pengaruh penambahan Karbon dan Nitrogen terhadap mikrostruktur, kekuatan tarik dan mampu bentuk paduan Co-28Cr-6Mo-0,8Si-0,8Mn-0,4Fe-0,2Ni. *Metalurgi*. 3(3), 138–149.
- Fernández Vázquez, J. M., & Camacho Galindo, J. (2007). Martin Kirschner (1879-1942). *Acta Ortopédica Mexicana*, 21(1), 45–46.
- Lestari, F. P., Erryani, A., Annur, D., and **Kartika, I.** (2017). Corrosion Behavior of Magnesium Based Foam Structure in Hank's Solution. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 202, 011002. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/202/1/011002>
- Lestari, F.P., Annur, D., Astawa, I. N. G. P., Erryani, A., & **Kartika, I.** (2017). Proses Sinter Logam Berpori Paduan Magnesium Dengan Kalsium Hidrida Sebagai Senyawa pengembang. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi*, November, 1–5.
- Lestari, F.P., Erryani, A., Annur, D., & **Kartika, I.** (2017). Corrosion Behavior of Magnesium Based Foam Structure in Hank's Solution. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 202(1), 0–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/202/1/012035>
- Lestari, F.P., Erryani, A., Annur, D., & **Kartika, I.** (2018). The effect of thermal pre-treatment of titanium hydride (TiH₂) powder in argon condition. *AIP Conference Proceedings*, 1945. <https://doi.org/10.1063/1.5030293>
- Gorejová, R., Haverová, L., Oriňaková, R., Oriňak, A., & Oriňak, M. (2019). Recent advancements in Fe-based biodegradable materials for bone repair. *Journal of Materials Science*, 54(3), 1913–1947. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-3011-z>

- Grant, G. A., Jolley, M., Ellenbogen, R. G., Roberts, T. S., Gruss, J. R., & Loeser, J. D. (2004). Failure of autologous bone-assisted cranioplasty following decompressive craniectomy in children and adolescents. *Journal of Neurosurgery*, 100(2 SUPPL.), 163–168. <https://doi.org/10.3171/ped.2004.100.2.0163>
- Gurappa, I. (2002). Characterization of different materials for corrosion resistance under simulated body fluid conditions. *Materials Characterization*, 49(1), 73–79. [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(02\)00320-0](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(02)00320-0)
- Harris, B. (1979). Corrosion of stainless steel surgical implants. *Journal of Medical Engineering and Technology*, 3(3), 117–122. <https://doi.org/10.3109/03091907909162089>
- Hersh, D. S., Anderson, H. J., Woodworth, G. F., Martin, J. E., & Khan, Y. M. (2021). Bone Flap Resorption in Pediatric Patients following Autologous Cranioplasty. *Operative Neurosurgery*, 20(5), 436–443. <https://doi.org/10.1093/ons/opaa452>
- Astawa, I. N. G. P., Purawiardi, I., Rokhmanto, F., **Kartika, I.** (2018). *Sintesis Fasa γ -Co pada Paduan Co26Cr6Mo0.18N DENGAN. pdf* (pp. 60–69). <https://doi.org/http://jurnal.umj.ac.id/index.php/sintek>
- Indonesia Orthopedic Artificial Joints Market Outlook to 2030e.* (2024). Ken Research. <https://www.kenresearch.com/industry-reports/indonesia-orthopedic-artificial-joints-market>
- Kamrani, S., & Fleck, C. (2019). Biodegradable magnesium alloys as temporary orthopaedic implants: a review. *BioMetals*, 32(2), 185–193. <https://doi.org/10.1007/s10534-019-00170-y>
- Kartika, I.**, Amal, M. I., Sutowo, C., Sukarso, S. G., & Sriyono, B. (2018). Pengaruh Variasi Berat Foaming Agent CaH_2 terhadap Karakteristik Paduan Mg-Ca-Zn Metal Selular Berbasis Sistem Mg-Zn- CaH_2 . *Metalurgi*, 29(2), 145. <https://doi.org/10.14203/metalurgi.v29i2.286>

- Kartika, I.,** Ashari, A. M., Trenggono, A., Lestari, F. P., & Erryani, A. (2019). Analisis Struktur Pori dan Sifat Mekanik Paduan Mg-0,5Ca-4Zn Hasil Proses Metalurgi Serbuk dengan Variasi Komposisi Foaming Agent CaCO_3 dan Temperatur Sintering. *Teknik*, 40(3), 142. <https://doi.org/10.14710/teknik.v40i3.25327>
- Kartika, I.,** Lestari, F. P., & Erryani, A. (n.d.). *Pengembangan Metal Foaming Mg-Ca-Zn_Tematik_2017*.
- Kartika, I.,** Matsumoto, H., & Chiba, A. (2009). Deformation and microstructure evolution in Co-Ni-Cr-Mo superalloy during hot working. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 40(6), 1457–1468. <https://doi.org/10.1007/s11661-009-9829-x>
- Kartika, I.,** Risanti, D. D., Laksana, H. R. P., Lestari, F. P., Rokhmanto, F., & Erryani, A. (2021). Fabrication of Porous Mg–Ca–Zn Alloy by High Energy Milling for Bone Implants. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 746 LNEE(5), 711–722. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6926-9_62
- Kartika, I.,** Rokhmanto, F., Thaha, Y. N., Purawiardi, I., Astawa, I. N. G. P., Erryani, A., & Asmaria, T. (2021). Influence of Thermo-Mechanical Processing on Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Ti-6Al-6Mo Implant Alloy. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 746 LNEE, 397–405. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6926-9_34
- Kartika, I.,** Sriyono, B., Annur, D., & Amal, M. I. (2014). *Pembuatan Master Alloy Mg-Ca sebagai Bahan Baku Paduan Metal Selular Mg-Ca-Zn*. 199–203.
- Kartika, I.,** Thaha, Y. N., Lestari, F. P., & Sriyono, B. (2014). Characteristics of Mg-Ca-Zn alloy metallic foam based on Mg-Zn- CaH_2 system. *Advanced Materials Research*, 896, 267–271. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.896.267>

- Kartika, I.**, Werdaningsih, R., Alfrano, Rokhmanto, F., & Thaha, Y. N. (2019). An investigation of α and α' phases intensity and hardness of Ti-6Al-6Mo implant alloy influenced by temperature of solution treatment and quenching media. *AIP Conference Proceedings*, 2120, 1–6. <https://doi.org/10.1063/1.5115685>
- Kennedy, A. (2012). Porous Metals and Metal Foams Made from Powders. *Powder Metallurgy*. <https://doi.org/10.5772/33060>
- Lee, S. H., Yoo, C. J., Lee, U., Park, C. W., Lee, S. G., & Kim, W. K. (2014). Resorption of Autogenous Bone Graft in Cranioplasty: Resorption and Reintegration Failure. *Korean Journal of Neurotrauma*, 10(1), 10. <https://doi.org/10.13004/kjnt.2014.10.1.10>
- Lestari, F. P., Hidayat, F., Erryani, A., Utomo, M. S., Thaha, Y. N., & **Kartika, I.** (2019). Fabrikasi Paduan Magnesium Berpori dengan Partikel Garam NaCl sebagai Space Holder. *Metallurgi*, V(E-ISSN 2443-3926), 125–134.
- Lestari, F. P., Julhida, F., Erryani, A., & **Kartika, I.** (2018). *Microstructure and Mechanical Properties by Addition of Zn AND TiH₂ in Quarternary Mg Alloy Foam*. 41(1), 8–15.
- Lestari, F. P., **Kartika, I.**, Juwono, A. L., & Anawati, A. (2022). Kajian Komposit Berbasis Paduan Logam Magnesium Berpenguat Keramik untuk Aplikasi Ortopedi. *Teknik*, 43(3), 236–253. <https://doi.org/10.14710/teknik.v43i3.46575>
- Lestari, F. P., Saputra, B. A., Erryani, A., Mulyati, I., Dwijaya, M. S., & **Kartika, I.** (2021). Analisis Variasi Temperatur Sintering dan Ukuran Senyawa pengembang Dolomit terhadap Fabrikasi Paduan Logam Mg-Ca-Zn Berpori Tertutup dengan Proses Metalurgi Serbuk. *Teknik*, 42(2), 128–136. <https://doi.org/10.14710/teknik.v42i2.36978>

- Li, Z., Gu, X., Lou, S., & Zheng, Y. (2008). The development of binary Mg-Ca alloys for use as biodegradable materials within bone. *Biomaterials*, 29(10), 1329–1344. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.12.021>
- Liang-yu, C., Cui, Y., & Lai-chang, Z. (2020). Recent Development in Beta Titanium Alloys for. *Metals*.
- Lita, Y. A., Azhari, A., Firman, R. N., Epsilawati, L., & Pramanik, F. (2019). Aspek radiografis dan biologis tulang dalam penilaian kualitas tulang pada osteoporosis. *Jurnal Radiologi Dentomaksilofasial Indonesia (JRDI)*, 3(2), 47. <https://doi.org/10.32793/jrdi.v3i2.490>
- Long, M., & Rack, H. J. (1998). Titanium alloys in total joint replacement—a materials science perspective. *Biomaterials*, 19(18), 1621–1639. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(97\)00146-4](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(97)00146-4)
- Malachevsky, M. T., & D'Ovidio, C. A. (2009). Thermal evolution of titanium hydride optimized for aluminium foam fabrication. *Scripta Materialia*, 61(1), 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.12.023>
- Markatos, K., Tsoucalas, G., & Sgantzios, M. (2016). Hallmarks in the history of orthopaedic implants for trauma and joint replacement. *Acta Medico-Historica Adriatica : AMHA*, 14(1), 161–176.
- Niinomi, M., Hattori, T., Morikawa, K., Kasuga, T., Suzuki, A. Fukui, H., and Niwa, S. (2002). *Development of Low Rigidity Beta-type Titanium Alloy for Biomedical Application* (pp. 2970–2977). <https://doi.org/https://doi.org/10.2320/matertrans.43.2970>
- Niinomi, M., Nakai, M., & Hieda, J. (2012). Development of new metallic alloys for biomedical applications. *Acta Biomaterialia*, 8(11), 3888–3903. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2012.06.037>
- Orthopedic, I., Market, I., Size, R., & Analysis, P. (2025). *Indonesia Orthopedic Implants Market Size , Production , Sales , Average Product Price , Market Share*. 8–10.

- Patel, P., Bhingole, P. P., & Makwana, D. (2018). Manufacturing, characterization, and applications of lightweight metallic foams for structural applications: Review. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 20391–20402. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.414>
- Pramono, A. W., Nuraini, L., Iskandar, Rohman, R. F., **Kartika, I.**, Lestari, F. P., Erryani, A., & Zander, D. (2021). Biodegradable Mg-Ca-Zn alloys synthesized by powder metallurgy. *AIP Conference Proceedings*, 2382, 1–16. <https://doi.org/10.1063/5.0060715>
- Rizaty, M. A. (2024). *Data Persentase Penduduk Lanjut Usia di Indonesia pada 2023*.
- Rokhmanto, F., Panghihutan, M. D., Putri, A. P., Prayoga, B. T., **Kartika, I.**, Erryani, A., Dwijaya, M. S., Senopati, G., Setyawan, A. D. H., & Sutowo, C. (2023). Pengaruh Variasi Temperatur Solution Treatment pada Kekerasan dan Presipitat Paduan Co-30Cr-5Mo-0,32C-0,23N. *Teknik*, 44(1), 1–6. <https://doi.org/10.14710/teknik.v44i1.49496>
- Rokhmanto, F., Senopati, G., Sutowo, C., Astawa, I. N. G. P., Darsono, N., & **Kartika, I.** (2017). Perlakuan Termomekanikal Ingot Paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N. *Prosiding Semnastek, November 2017*, 1–2.
- Rokhmanto, F., Sutowo, C., & **Kartika, I.** (2018). Pengaruh Penambahan Karbon dan Nitrogen terhadap Ketahanan Korosi Paduan Co-28Cr-6Mo-0,8Si-0,8Mn-0,4Fe- 0,2Ni. *Widyariset*, 4(1).
- Senopati, G., Rashid, R. A. R., **Kartika, I.**, & Palanisamy, S. (2023). Recent Development of Low-Cost β -Ti Alloys for Biomedical Applications: A Review. *Metals*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/met13020194>
- Senopati, G., Rashid, R. A. R., Juliadmi, D., Prastya, M. E., Mori, M., Yamanaka, K., **Kartika, I.**, & Palanisamy, S. (2024). Design and characterization of novel Ti-8Mo-xFe-yCu alloys as implant materials: Evaluation of biocompatibility, mechanical properties, and antibacterial potential. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*. <https://doi.org/10.1177/02670836241276288>

- Senopati, G., Sutowo, C., **Kartika, I.**, & Suharno, B. (2019). The effect of solution treatment on microstructure and mechanical properties of Ti-6Mo-6Nb-8Sn alloy. *Materials Today: Proceedings*, 13, 224–228. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.03.218>
- Senopati, G., Sutowo, C., Rokhmanto, F., **Kartika, I.**, & Suharno, B. (2020). Microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of Ti-6Mo-6Nb-xSn alloys for biomedical application. *Materials Science Forum*, 988 MSF(April), 175–181. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.988.175>
- Seyedraoufi, Z. S., & Mirdamadi, S. (2013). Synthesis, microstructure and mechanical properties of porous Mg-Zn scaffolds. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 21, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.01.023>
- Todros, S., Todesco, M., & Bagno, A. (2021). Biomaterials and their biomedical applications: From replacement to regeneration. *Processes*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/pr9111949>
- Utomo, E. P., **Kartika, I.**, & Anawati, A. (2018). Effect of Sn on mechanical hardness of as-cast Ti-Nb-Sn alloys. *AIP Conference Proceedings*, 1964. <https://doi.org/10.1063/1.5038328>
- Utomo, M. S., Asmaria, T., Malau, D. P., Triwardono, J., **Kartika, I.**, Dilogu, I. H., & Rahyussalim, A. J. (2021). Design criteria for cementless total hip arthroplasty: A retrospective study from cadaver implantation. *AIP Conference Proceedings*, 2344, 1–6. <https://doi.org/10.1063/5.0047288>
- Utomo, M. S., Whulanza, Y., Lestari, F. P., Erryani, A., & **Kartika, I.** (2020). Computational mechanics of porous magnesium alloy as Herbert compression screw for hallux valgus osteotomy. *AIP Conference Proceedings*, 2232, 1–6. <https://doi.org/10.1063/5.0001957>

- Witte, F., Hort, N., Feyerabend, F., & Vogt, C. (2011). Magnesium (Mg) corrosion: A challenging concept for degradable implants. *Corrosion of Magnesium Alloys*, 403–425. <https://doi.org/10.1533/9780857091413.3.403>
- Witte, F., Hort, N., Vogt, C., Cohen, S., Kainer, K. U., Willumeit, R., & Feyerabend, F. (2008). Degradable biomaterials based on magnesium corrosion. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 12(5–6), 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2009.04.001>
- Yamanaka, K., Mori, M., **Kartika, I.**, Anwar, M. S., Kuramoto, K., Sato, S., & Chiba, A. (2019). Effect of multipass thermomechanical processing on the corrosion behaviour of biomedical Co–Cr–Mo alloys. *Corrosion Science*, 148(November 2018), 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.12.009>
- Yang, D. H., Hur, B. Y., & Yang, S. R. (2008). Study on fabrication and foaming mechanism of Mg foam using CaCO₃ as blowing agent. *Journal of Alloys and Compounds*, 461(1–2), 221–227. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.07.098>
- Zhao, C. Y. (2012). Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(13–14), 3618–3632. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.017>

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

Bagian dari Buku Internasional

1. I. Kartika, D. D. Risanti, H. R. P. Laksana, F. P. Lestari, F. Rokhmanto, dan A. Erryani, Fabrication of porous Mg-Ca-Zn alloy by high energy milling for bone implants, *Biomedical Engineering, and Health Informatics (Springer)*, pp. 711-722, 2021, DOI: 10.1007/978-981-33-6926-9_62.
2. A. Erryani, F. P. Lestari, T. Asmaria, A. Rahmah, dan I. Kartika, Microstructure and corrosion behavior of bioabsorbable polymer polylactic acid-polycaprolactone reinforced by Magnesium-Zinc alloy for biomedical applications, *Biomedical Engineering, and Health Informatics (Springer)*, pp. 377-386, 2021, DOI: 10.1007/978-981-33-6926-9_32.
3. I. Kartika, F. Rokhmanto, Y. N. Thaha, I. Purawiardi, I. N. G. P. Astawa, A. Erryani, and T. Asmaria, Influence of thermo-mechanical processing on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Ti-6Al-6Mo implant alloy, *Book Series Lecture Notes in Electrical Engineering (Springer)* 746, pp. 397-406, 2021, DOI:10.1007/978-981-33-6926-9_34.

Jurnal Internasional

4. I. Kartika, H. Matsumoto, and A. Chiba, Deformation and microstructure evolution in Co-Ni-Cr-Mo superalloy during hot working, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 40A, 2009, DOI: 10.1007/s11661-009-9829-x.
5. D. Annur, A. Erryani, F. P. Lestari, I. N. G. P. Astawa, dan I. Kartika, Microstructure and corrosion study of porous Mg-Zn-Ca Alloy in simulated body fluid, *Materials Research Express*, vol. 4, no. 3, p. 034006, 2017, DOI: 10.1088/2053-1591/aa65fd.

6. K. Yamanaka, M. Mori, I. Kartika, M. S. Anwar, K. Kuramoto, S. Sato, A. Chiba, Effect of multipass thermomechanical processing on the corrosion behaviour of biomedical Co-Cr-Mo alloys, *Corrosion Science* 148, pp. 178-187, 2019, DOI:10.1016/j.corsci.2018.12.009.
7. G. Senopati, C. Sutowo, F. Rokhmanto, I. Kartika, B. Suharno, Microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of Ti-6Mo-6Nb-xSn alloys for biomedical application, *Materials Science Forum*, vol. 988, pp. 175-181, 2020, ISSN 1662-9752.
8. N. Darsono, Y. N. Thaha, M. S. Utomo, D. Sajuti, dan I. Kartika, The effect of malonic acid and succinic acid on the corrosion behavior of Mg-5Zn IN (NH₄)₃PO₄ AND NaF, *International Journal of Technology*, vo. 10, no. 8, pp. 1576-1584, 2019, DOI:10.14716/ijtech.v10i8.3447.
9. F. P. Lestari, Y. R. Sari, F. Rokhmanto, T. Asmaria, A. W. Pramono, T. Nugraha, A. Erryani, Y. N. Thaha dan I. Kartika, Surface modification of Ti-6Al-4V alloy by anodization technique at low potential to produce oxide layer, *Journal of Electronics, Electromedical, and Medical Informatics*, vol. 2, no. 3, pp. 93-102, 2020, DOI: 10.35882/jeeemi.v2i3.2.
10. F. P. Lestari, S. Marta, I. Mulyati, A. Erryani, dan I. Kartika, In vitro corrosion of quaternary Magnesium alloy foam by addition of Zinc, *Journal of Electronics, Electromedical, and Medical Informatics*, vol. 2, no. 3, pp. 86-92, 2020, DOI: 10.35882/jeeemi.v2i3.1.
11. D. Annur, I. Kartika, S. Supriadi, dan B. Suharno, Titanium and titanium-based alloy prepared by spark plasma sintering method for biomedical implant applications: A review, *Materials Research Express*, vol. 8, issue 1, p. 012001, 2021, DOI:10.1088/2053-1591/abd969.
12. Y. N. Thaha, I. Kartika, F. P. Lestari, A. N. Syahid, T. Asmaria, A. M. Ashari, E. A. Basuki, Corrosion behavior of Mg-Zn-Fe-Cu-Co alloys in the presence of coumarin, *Materials Today Communications*, vol. 29, p. 102922, 2021, DOI:10.1016/j.mtcomm.2021.102922.

13. M. A. Sabrina, S. A. Hartati, T. Asmaria, P. Widiyanti, M. S. Utomo, F. Rokhmanto and I. Kartika, Simulated analysis Ti-6Al-4V plate and screw as transverse diaphyseal fracture implant for ulna bone, *International Journal of Technology*, vol.12, no. 6, ppl. 1312-1322, 2021, DOI: 10.14716/ijtech.v12i6.5193.
14. D. Annur, I. Kartika, T. Sudiro, S. Supriadi, B. Suharno, Microstructure, mechanical properties, and in vitro studies of porous Titanium obtained by spark plasma sintering, *Trans Indian Inst Met*, 2022, DOI:10.1007/s-12666-022-02680-9.
15. G. Senopati, R. A. R. Rashid, I. Kartika and S. Palanisamy, Recent development of low-cost β -Ti alloys for biomedical applications: A review, *Metals*, vol. 13, no. 194, 2023, DOI:10.3390/met13020194.
16. T. Asmaria, D. A. Mayasari, A. D. G. Febrananda, N. Nurul, A. J. Rahyussalim, I. Kartika, Computed tomography image analysis for Indonesian total hip arthroplasty designs, *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 12, no. 6, pp. 6123-6131, 2022, DOI: 10.11591/ijece.v12i6.pp6123-6131.
17. B. Siswayanti, B. R. Elvira, F. P. Lestari, A. Erryani, Firdaus J. Mu'arif, M. A. Rohmatulloh, M. D. Rozeno, F. Rokhmanto, Y. N. Thaha, B. R. Putra, A. D. H. Setyawan, I. Kartika, Corrosion inhibition induced by captopril in Hanks' solution on bioresorbable Mg-Zn-(Y, Nd) alloys fabricated by powder metallurgical technology, *Materials Chemistry and Physics*, vol. 313, p. 128705, 2024, DOI:10.1016/j.matchemphys.2023.128705.
18. M. S. Dwijaya, I. Kartika, D. Annur, A. Erryani, C. Sutowo, F. Rokhmanto, B. Siswayanti, G. Senopati and A. D. H. Setyawan, Optimizing biomimetic hydroxyapatite coating on Ti-6Al-6Mo alloy: influence of immersion time, *Phys. Scr.*, vol. 99, p. 1059e7, 2024, DOI:10.1088/1402-4896/ad7cdd.

Jurnal Nasional

19. I. Kartika, Y. N. Thaha, F. P. Lestari, B. Sriyono, Pengaruh variasi berat foaming agent CaH_2 terhadap karakteristik paduan Mg-Ca-Zn metal selular berbasis sistem MgZn-CaH_2 , *Metalurgi*, vol. 5, ppl. 145-152, 2014, ISSN 0126-3188. F. P. Lestari, A. Tri, D. Annur, I. N. G. P. Astawa, M. S. Anwar, dan I. Kartika, Studi penambahan elemen Ca pada paduan biner Mg-Ca terhadap pembentukan fasa dan korosi In-vitro untuk aplikasi implan mampu luruh, *Metalurgi*, vol 30, no 2, 2015, E-ISSN 2443- 3926.
20. F. Rokhmanto, B. Soegijono dan I. Kartika, Pengaruh penambahan Karbon dan Nitrogen terhadap mikrostruktur, kekuatan tarik dan mampu bentuk paduan Co-28Cr-6Mo-0,8Si-0,8Mn-0,4Fe-0,2Ni, *Metalurgi*, vol. 31, no. 3, pp. 138-149, 2016, DOI: 10.14203/metalurgi.v31i3.174.
21. D. Annur, F. P. Lestari, A. Erryani, M. I. Amal, L. S. Sitorus, M. I. Amal, Strukturmikro, sifat mekanik dan ketahanan korosi paduan Mg, Zn, Ca yang dihasilkan melalui proses metalurgi serbuk, *Metalurgi*, vol. 1, no. 3, pp. 130-137, 2016, ISSN 0126-3188.
22. F. P. Lestari, F. Hidayat, A. Erryani, M. S. Utomo, Y. N. Thaha dan I. Kartika, Fabrikasi paduan magnesium berpori dengan partikel garam NaCl sebagai space holder, *Metalurgi*, vol. 33, no. 3, pp. 125-34, 2018, DOI: 10.14203/metalurgi.v33i3.455.
23. A. Erryani, F. P. Lestari, D. Annur, M. I. Amal, dan I. Kartika, Laju dan morfologi korosi paduan logam berpori Mg-Ca-Zn dengan foaming agent CaCO_3 , *Widyariset*, vol. 4, no. 1, pp. 9-20, 2018, DOI:10.14203/widyariset.4.1.2018.9-20.
24. F. Rokhmanto, C. Sutowo, dan I. Kartika, Pengaruh penambahan Karbon dan Nitrogen terhadap ketahanan korosi paduan Co-28Cr-6Mo-0,8Si-0,8Mn-0,4Fe-0,2Ni, *Widyariset*, vol. 4, no. 1, pp. 1-8, 2018, DOI:10.14203/widyariset.4.1.2018.1-8.

25. F. P. Lestari, F. Julhida, A. Erryani, I. Kartika, Microstructure and mechanical properties by addition of Zn and TiH₂ in quaternary Mg alloy foam, *Teknologi Indonesia*, vol. 41, no. 1, pp. 8-15, 2018, DOI: 10.14203/jti.v41i1.532.
26. F. P. Lestari, A. Tri, D. Annur, I. N. G. P. Astawa, M. S. Anwar, dan I. Kartika, Studi penambahan elemen Ca pada paduan biner Mg-Ca terhadap pembentukan fasa dan korosi in-vitro untuk aplikasi implan mampu luruh, *Metalurgi*, vol 30, no 2, 2015, E-ISSN 2443- 3926.
27. I. Purawiardi, I. N. G. P. Astawa, F. Rokhmanto, dan I. Kartika, Sintesis fasa γ -Co pada paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N dengan kombinasi metode homogenisasi 1200 °C dan hot rolling serta transformasi struktur kristalnya, *Mesin dan Teknologi*, vol. 12, no.2, pp. 60-66, 2018.
28. I. N. G. Putrayasa, I. Kartika, F. Rokhmanto, I. Purawiardi, J. Natalia, A. Alhamidi, Karakteristik sifat mekanik dan struktur mikro total knee joint dari paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N hasil pengerjaan panas, *Metalurgi*, vol.1, no. 1, pp. 1-8, 2019.
29. F. P. Lestari, F. Hidayat, A. Erryani, M. S. Utomo, Y. N. Thaha dan I. Kartika, Fabrikasi paduan Magnesium berpori dengan partikel garam NaCl sebagai space holder, *Metalurgi*, vol. 33, no. 3, pp. 125-134, 2018, DOI: 10.14203/metalurgi.v33i3.455.
30. A. Erryani, Novantoro, F. P. Lestari, M. S. Dwijaya dan I. Kartika, Sifat mekanik dan struktur mikro paduan magnesium berpori dengan variasi komposisi senyawa pengembang dan temperatur sinter untuk aplikasi implan luruh, *Metalurgi*, vol. 34, no.2, 2019, DOI: 10.14203/metalurgi.v34i2.469.
31. I. Kartika, A. M. Ashari, A. Trenggono, F. Pramuji Lestari, A. Erryani, Analisis struktur pori dan sifat mekanik paduan Mg-0,5Ca-4Zn hasil proses metalurgi serbuk dengan variasi komposisi foaming agent CaCO₃ dan temperatur sintering, *Teknik*, vol. 40, no.3, pp. 142-148, 2019, DOI:10.14710/teknik.v40n3.25327.

32. T. Asmaria, R. Rahmi, M. S. Utomo, D. Annur, D. P. Malau, M. I. Amal, dan I. Kartika, Deteksi tepi untuk validasi model tiga dimensi tulang panggul pada perencanaan desain implan, *Widyariset*, vol. 6, no. 1, pp. 51-56, 2020, DOI: 10.14203/widyariset.6.1.2020.51-61.
33. T. Asmaria, R. Rahmi, M. S. Utomo, F. P. Lestari, A. Erryani, P. Fathoni, T. Nugraha, I. Kartika, The 3D printing in material research and medical physics education and its accuracy study, *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pendidikan Fisika*, vol. 6, Issue 2, 2020, DOI: 10.21009/1.06209.
34. A. M. Ashari, F. P. Lestari, R. N. Hakim, I. Mulyati, Y. N. Thaha, I. kartika and E. Basuki, Study to microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Fe-CuCo as high entropy alloys for uretal implant application, *Metalurgi*, vol. 36, no 1, pp. 25-32, 2021, DOI: 10.14203/metalurgi.v36i1.584.
35. T. Asmaria, D. A. Mayasari, S. Ramdhani, M. S. Utomo, D. P. Malau, D. Annur, M. I. Amal, and I. Kartika, Finite element analysis of patient-specific bone plate with Ti6Al4V material selection, *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya*, vol. 11, Issue 01, 2021, DOI:10.26740/jpfa.v11n1.p83-93.
36. F. Rokhmanto, D. P. Malau, P. P. Ariani, B. T. Prayoga, I. Kartika, A. Erryani, M. S. Dwijaya, G. Senopati, A. D. H. Setyawan, C. Sutowo, Analisis nilai kekerasan dan morfologi presipitat pada paduan Co-30Cr-5Mo-0,32C-0,23N hasil proses solution treatment dengan variasi temperatur, *Teknik*, vol. 44, no. 1, pp.1-6, 2023, DOI: 10.14710/teknik.v44i1.49496.

Prosiding Internasional

37. I. Kartika, Y. N. Thaha, F. P. Lestari, B. Sriyono, Characteristics of Mg-Ca-Zn Alloy metallic foam based on Mg-Zn-CaH₂ system, *Advanced Materials Research*, vol. 896, pp. 267-271, 2014, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.896.267.

38. D. Annur, M. I. Amal, C. Sutowo, S. G. Sukaryo, and I. Kartika, Sintering of Mg-Ca-Zn alloy metallic foam based on Mg-Zn-CaH₂ system, *Advanced Materials Research*, vol. 1112, pp. 474-477, 2015, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1112.474.
39. D. Annur, F. P. Lestari, A. Erryani, M. I. Amal, L. S. Sitorus, dan I. Kartika, The synthesis and characterization of Mg-Zn-Ca alloy by powder metallurgy process, *AIP Conference Proceeding*, vol. 1725, p. 020032-1–020032-6, 2015, DOI: 10.1063/1.4945486.
40. M. I. Amal, D. Annur, F. P. Lestari, C. Sutowo dan I. Kartika, Processing of porous Mg-Zn-Ca alloy via powder metallurgy, *AIP Conference Proceedings*, vol. 1778 (1), p. 030010, 2016, DOI:10.1063/1.4965744.
41. A. Erryani, F. P. Lestari, D. Annur, M. I. Amal and I. Kartika, Microstructures and mechanical study of Mg alloy foam based on Mg-Zn-Ca-CaCO₃ system, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 202, p. 012028, 2017, DOI: 10.1088/1757-899X/202/1/012028.
42. D. Annur, A. Suhardi, M. I. Amal, M. S. Anwar, I. Kartika, Powder metallurgy preparation of Mg-Ca alloy for biodegradable implant application, *Journal of Physics: Conference Series* 817, 2017, DOI:10.1088/1742-6596/817/1/012062.
43. F. P. Lestari, A. Erryani, D. Annur and I. Kartika, Corrosion behavior of Magnesium based foam structure in Hank's solution, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 202, p. 012035, 2017, DOI:10.1088/1757-899X/202/1/012035.
44. F. P. Lestari, A. Erryani, D. Annur, and I. Kartika, The effect of thermal pre-treatment of Titanium hydride (TiH₂) powder in argon condition, *AIP Conference Proceedings* 1945, p. 010001, 2018, DOI: 10.1063/1.5030293.
45. A. Erryani, F. P. Lestari, D. Annur and I. Kartika, Preparation and characterization of coating sodium trisilicate (Na₂O.nSiO₂) at calcium carbonate (CaCO₃) for blowing agent in Mg alloy foam, *AIP Conference Proceedings* 1964, p. 020002, 2018, DOI: 10.1063/1.5038284.

46. D. Annur, F. P. Lestari, A. Erryani, F. A. Sijabat, I. N. G. P. Astawa, and I. Kartika, Preparation and characterization of Porous Mg-Zn-Ca alloy by space holder technique, *AIP Conference Proceedings* 1945, p. 020015, 2018, DOI: 10.1063/1.5030237.
47. E. P. Utomo, I. Kartika, Anawati, Effect of Sn on mechanical hardness of as-cast Ti-Nb-Sn alloy, *AIP Conference Proceedings* 1964, p. 020046, 2018, DOI: 10.1063/1.5038328.
48. G. Senopati, C. Sutowo, I. Kartika, B. Suharno, The effect of solution treatment on microstructure and mechanical properties of Ti-6Mo-6Nb-8Sn alloy, *Materials Today: Proceedings* 13, pp. 224-228, 2019.
49. I. Kartika, R. Werdaningsih, Alfrano, F. Rokhmanto, and Y. N. Thaha, An investigation of α and α' phases intensity and hardness of Ti-6Al-6Mo implant alloy influenced by temperature of solution treatment and quenching media, *AIP Conference Proceedings* 2120, p. 050009, 2019, DOI: 10.1063/1.5115685.
50. M. S. Utomo, Y. Whulanza, F. P. Lestari, A. Erryani, I. Kartika, and N. A. Alief, Determination of compressive strength of 3D polymeric lattice structure as template in powder metallurgy, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 541, p.012042, 2019, DOI:10.1088/1757-899X/541/1/012042.
51. A. Erryani, I. Al-aziz, F. P. Lestari, I. Kartika, Fabrication, microstructure and corrosion study of porous Mg-Ca-Zn using CaCO_3 pre-treatment with sodium trisilicate, *Materials Science and Engineering IOP Publishing* 541, p. 12033, 2019, DOI : 10.1088/1757-899X/541/1/012033.
52. M. S.i Dwijaya, A. Erryani, F. P. Lestari, M. S. Utomo, R. N. Hakim, I. Kartika, Characterization of MgZn with manual grinding treatment in polylactic acid, *AIP Conference Proceedings* 2344, p. 020002, 2021, DOI: 10.1063/5.0048527.

53. N. A. Alief, M. S. Utomo, I. Kartika, and Y. Whulanza, Geometrical and mechanical performance of multi-material fused deposition modelling, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 557, p. 012022, 2019, DOI:10.1088/1757-899X/557/1/012022.
54. M. S. Utomo, Y. Whulanza, F. P. Lestari, A. Erryani, and I. Kartika, Computational mechanics of porous magnesium alloy as Herbert compression screw for hallux valgus osteotomy, *AIP Conference Proceedings* 2232, p. 070004, 2020, DOI:10.1063/5.0001957.
55. I. Purawiardi, I. N. G. P. Astawa, F. Rokhmanto, and Ika Kartika, Growth of γ -Co phase on as-cast Co-Cr-Mo alloy via 1200 °C solution treatment: A crystal structure investigation, *AIP Conference Proceedings* 2232, p. 070002, 2020, DOI:10.1063/5.0001930.
56. S. Aurellia, T. Asmaria, A. K. Sari, A. B. N. Aslam, M. S. Utomo, D. M. Panghuhutan, D. Annur, M. I. Amal, and I. Kartika, Image analysis on clavicle bone for Indonesian clavicle implant design, *Journal of Physics: Conference Series* 1805, p. 012016, 2021, DOI:10.1088/1742-6596/1805/1/012016.
57. M. S. Utomo, T. Asmaria, D. P. Malau, J. Triwardono, I. Kartika, I. H. Dilogio and A. J. Rahyussalim, Design criteria for cementless total hip arthroplasty: A retrospective study from cadaver implantation, *AIP Conference Proceedings* 2344, p. 020002, 2021, DOI: 10.1063/5.0047288.
58. Y. M. Zuchruf, T. Asmaria, R. Rulaningtyas, A. Rahmatillah, I. Kartika, and N. T. Rochman, Simulation of knee joint angle estimation from EMG signal for post ACL reconstruction surgical rehabilitation, *Journal of Physics: Conference Series* 1805, p. 012019, 2021, DOI:10.1088/1742-6596/1805/1/012019.
59. D. Annur, J. Triwardono, F. Rokhmanto, I. Kartika, A. Dimiyati, S. Supriadi, dan B. Suharno, Effect of the carbamide content on the preparation of porous Ti6Al4V using arc plasma sintering method, *AIP Conf. Proc.* 2382, pp. 030007-1–030007-8, 2020, DOI: 10.1063/5.0060861.

60. A. W. Pramono, L. Nuraini, R. Iskandar, F. Rohman, I. Kartika, F. P. Lestari, A. Erryani, dan D. Zander, Biodegradable Mg-Ca-Zn alloys synthesized by powder metallurgy, *AIP Conference Proceedings* 2382, 2021, ISBN: 978-0-7354-4115-6.
61. D. D. Risanti, I. Kartika, W. Andnindyara, H. R. P. Laksana, F. P. Lestari, and J. Triwardono, Electrochemical behavior in simulated body fluid of Mg-Ca-Zn-TiH₂ Alloy pre-treatment prepared by mechanical milling, *AIP Conf. Proc.* 2382, pp. 030002-1-030002-8, 2021, DOI: 10.1063/5.0060659.
62. J. Triwardono, H. Purnama, W. Sulisty, Fendy Rokhmanto, R. Roberto, I. Kartika, and S. Supriadi, Evaluation varus stress in total knee arthroplasty designed for deep knee flexion using knee kinematic motion simulator, *AIP Conf. Proc.* 3003, p. 020111, 2024, DOI:10.1063/5.0186315.
63. B. Siswayanti, G. Senopati, A. Erryani, F. Pramuji Lestari, I. Kartika, L. Suhaimi, and G. D. Lestari, The influence of sintering temperatures and sizes of dolomite foaming agent on porosity of Mg-6Zn alloy, *AIP Conf. Proc.* 3003, pp. 020092-1–020092-8, 2024, DOI:10.1063/5.0186589.
64. F. Rokhmanto, J. Triwardono, C. M. Maulana, L. Suhaimi, I. Kartika, Y. N. Thaha, D. P. Malau, and C. Sutowo, The hardness and microstructure analysis of Co-30Cr5Mo-0.3C on variation of hot roll pre-heat holding time as an option of cardiovascular sent material, *AIP Conf. Proc.* 3003, pp. 020105-1–020105-8, 2024, DOI:10.1063/5.0186239.

Prosiding Nasional

65. C. Sutowo, I. Kartika, Pengaruh proses perlakuan panas annealing temperatur 950°C pada baja 155 tahan karat feritik, *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengolahan dan Biomassa (SINTESA)*, pp. 155-162, 2014.

66. C. Sutowo, M. Ikhsan, I. Kartika, Karakteristik material biokompatibel aplikasi implan medis jenis bone plate, *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2014*, ISSN : 2407-1846.
67. I. Kartika, B. Sriyono, D. Annur, M. I. Amal, Pembuatan master Alloy Mg-Ca sebagai bahan baku metal selular Mg-Ca-Zn, *Prosiding Seminar Material Metalurgi*, pp. 199-203, 2014, ISSN.2085-0492.
68. C. Sutowo, I. Kartika, B. Sriyono, Gass absorption process pada baja tahan karat feritik Fe-Cr-Mo untuk aplikasi implan, *Prosiding Seminar Material Metalurgi*, pp. 199-203, 2014, ISSN.2085-0492.
69. I. N. G. P. Astawa, C. Sutowo, I. Kartika, N. Darsono, F. Rokhmanto, G. Senopati, S. G. Sukaryo, I. Sumirat, D. H. Permana, Sintesis paduan Co-26Cr-6Mo dengan penambahan 0,18N sebagai bahan dasar pembuatan total knee replacement (TKR), *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, 2016, e-ISSN : 2460 -8416.
70. F. Rokhmanto, G. Senopati, C. Sutowo, I. N. G. P. Astawa, N. Darsono, I. Kartika, Perlakuan termomekanikal ingot paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N, *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, 2017, e-ISSN : 2460-8416.
71. F. P. Lestari, D. Annur, I. N. G. P. Astawa, A. Erryani, I. Kartika, Proses sinter logam berpori paduan Magnesium dengan Kalsium hidrida sebagai senyawa pengembang, *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, 2017, e-ISSN : 2460-8416.

Kekayaan Intelektual

Paten Nasional

- Paten Terdaftar

72. Metoda pembuatan cetakan garam mineral untuk pembuatan logam struktur berongga, Paten Reguler Terdaftar P00201911707, Inventor : I. Kartika, F.a P. Lestari, A. Erryani, M. S. Utomo, F. Rokhmanto, M. S. Dwijaya, I. Mulyati, J. Triwardono, 2019.
73. Femoral implan sendi panggul, P00202108162, Inventor : M. S. Utomo; M. I. Amal; D. P. Malau; A. W. Pramono; I. Kartika; Y. N. Thaha; G. Senopati; F. Rokhmanto; A. Erryani; T. Asmaria; M. S. Dwijaya, 2021.
74. Alat pembesar lubang acetabulum tulang panggul, S00202305869, Inventor : T. Asmaria, M. S. Utomo, I. Kartika, Y. N. Thaha, F. Rokhmanto, J. Triwardono, G. Senopati, M. S. Dwijaya, D. A. Mayasari, M. D. Kurniatie, N. S. Ayati, N. R. Amitasari, 2023.
75. Alat pembentuk rongga tulang pada pemasangan implan sendi panggul (*femoral broach*), S00202306994, Inventor : T. Asmaria; M. S. Utomo, I. Kartika, Y. N. Thaha, F. Rokhmanto, J. Triwardono, G. Senopati, M. S. Dwijaya, A. Erryani, D. A. Mayasari, M. D. Kurniatie, N. S. Ayati; N. R. Amitasari, 2023.
76. Bantalan prostetik pengganti sendi lutut, P00202308309, Inventor : J. Triwardono; I. Kartika; Y. N. Thaha, M. S. Utomo, T. Asmaria; A. D. H. Setyawan, A. Y. Akbar; B. Siswayanti; B. R. Putra, F. P. Lestari; H. Purnama; R. Roberto, 2023.
77. Implan patela pengganti sendi lutut fleksi tinggi, P00202309749, Inventor : J. Triwardono; Y. N. Thaha, I. Kartika, T. Asmaria, M. S. Utomo, N. I. Ciptasari, R. N. Hakim, V. Puspasari, A. R. Rhamdani, H. Purnama, F. A. Hasanah, E. Yulianti, 2023.

78. Implan femoralis pengganti sendi lutut berfleksi tinggi , P00202311452, Inventor : J. Triwardono, I. Kartika, Y. N. Thaha, T. Asmaria, M. S. Utomo, F. Rokhmanto, A. Erryani, D. P. Malau, G. Senopati, 2023.
79. Komponen tibial prostetik fleksi tinggi sebagai pengganti sendi lutut, S00202311549, Inventor : J. Triwardono, Y. N. Thaha, I. Kartika, T. Asmaria, M. S. Utomo, M. S. Dwijaya, A. N. Syahid, D. Annur, L. Nuraini, F. A. Hasanah, E. Yulianti, 2023.
80. Implan tempurung lutut pengganti sendi lutut dengan dua pasak pengunci, S00202408708, Inventor : J. Triwardono; Y. N. Thaha; I. Kartika; C. Sutowo; H. Purnama; E. P. Utomo; F. A. Hasanah; E. Yulianti, 2024.
81. Simulator gerak sendi lutut dengan tujuh derajat kebebasan, P00202412352, J. Triwardono; Y. N. Thaha; I. Kartika; T. Asmaria; F. Rokhmanto; R. Roberto; H. Purnama, 2024.

Tersertifikasi

82. Klip aneurisma berpenetrasi batang V, S00202208994, Inventor: T. Asmaria; F. Rokhmanto; M. S. Dwijaya; I. Kartika; A. W. Pramono; E. J. Wahjoepramono; W. T. Anandisa, 2022.
83. Implan klavikula dengan permukaan luar torus, S00202304787, Inventor : T. Asmaria, M. S. Utomo, F. Rokhmanto; J. Triwardono; Y. N. Thaha; I. Kartika; Dita Ayu Mayasari; M. D. Kurniatie; I. Hawari; N. R. Noviyadi; D. S. Andryani, 2023.

Kerjasama

- Transaksi Lisensi
84. Alat ukur gaya tarik pada klip aneurisma berbasis mikro pengendali, P00202107080, Mitra PT. Agru Spesial Industri, 2024.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR PUBLIKASI LAINNYA

1. C. Sutowo, I. Kartika dan B. Priyono, Analisa keretakan pada komponen camshaft, *Prosiding Seminar Material Metalurgi*, pp. 181-186, 2015.
2. C. Sutowo, G. Senopati, I. Kartika, B. Priyono, Analisa kegagalan retak material besi cor kelabu untuk aplikasi silinder blok, *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, pp. A.50-A.57, 2016, ISSN : 2407-1846.
3. C. Sutowo, I. Kartika dan B. Priyono, Analisa kegagalan komponen front axle pada kendaraan bermotor roda empat, *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, 2016, ISSN : 2407-1846, e-ISSN : 2460- 8416.
4. N. Idayanti, T. Kristiantoro, A. Septiani, and I. Kartika, Magnetic properties of barium ferrite after milling by high-energy milling (hem), *MATEC Web of Conferences*, p. 01011, 2017, DOI: 10.1051/mateconf/201710101011.
5. T.Asmaria, Y.M.Zuchruf, J.Triwardono, F.Rokhmanto, A. Erryani, F. P. Lestari, M. S. Dwijaya, I. Kartika, E. J. Wahjoepramono, and A. W. Pramono, Biomechanical simulation of sugita aneurysm clip: Reverse engineering approach using metal 3D-printing, *Journal of Physics: Conference Series IOP Publishing* 1805, p. 012044, 2021, DOI:10.1088/1742-6596/1805/1/012044.
6. I. Kartika, Y. Li, H. Matsumoto and A. Chiba, Constructing processing maps for hot working of Co-Ni-Cr-Mo superalloy, *Materials Transactions*, vol. 50, no. 9 pp. 2277-2284, 2009, DOI: 10.2320/matertrans.M2009103.
7. I. Kartika, B. Priyono, C. Sutowo, E. P. Utomo dan T. Arini, Analisa kerusakan lapisan kobal pada piringan katup buang mesin diesel, *Metalurgi*, vol. 25, no. 3, 2010, ISSN 0126-3188.

8. I. Kartika, K. Kurnia, G. Senopati, J. Triwardono, F. Rokhmanto, B. Hermanto, M. S. Dwijaya dan Alfirano, The effect of cold rolling and high temperature gas nitriding on austenite phase transformation in AISI 430, *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4, no. 12 (112), 2021, DOI:10.15587/1729-4061.2021.234174.
9. U. Herlina, M. Yusuf, I. Kartika, Y. Z. Arif, dan I. Sukmana, Pengaruh variasi temperatur sinter terhadap kualitas produksi Magnesium AZ31 dengan tube furnace, *Jurnal Material dan Proses Manufaktur*, vol.5, no. 2, pp.147-155, 2021, DOI:10.18196/jmpm.v5i2.12461.
10. J. Triwardono, S. Supriadi, Y. Whulanza, A. S. Saragih, D. A. Novalianita, M. S. Utomo, I. Kartika, Evaluation of the contact area in total knee arthroplasty designed for deep knee flexion, *International Journal of Technology* vol. 12, no. 6, pp. 1312-1322, 2021, DOI: 10.14716/ijtech.v12i6.5193.
11. M. Handayani, Y. Mulyaningsih, M. A. Anggoro, A. Abbas, I. Setiawan, F. Triawan, N. Darsono, Y. N. Thaha, I. Kartika, G. K. Sunnardianto, I. Anshori, G. Lisak, One-pot synthesis of reduced graphene oxide/chitosan/zinc oxide ternary nanocomposites for supercapacitor electrodes with enhanced electrochemical properties, *Materials Letters*, vol. 314, p. 131846, 2022, DOI: 10.1016/j.matlet.2022.131846.
12. M. A. A. Dani, B. Dilasari, Y. N. Thaha, I. Kartika, dan F. Rokhmanto, Hardness and corrosion behavior of Ti-20Cu-20Ni-20Mn-20Zn as high entropy alloy and Ti-13Cu-9Ni-5Mn-5Zn for marine structure application, *Metalurgi*, vol. 37 no. 2, 2022, DOI: 10.14203/metalurgi.v37i2.636.
13. J. Triwardono, F. Rokhmanto, R. Roberto, I. Kartika, A. S. Saragih, Y. Whulanza, S. Shuib, S. Supriadi, Evaluation of the malalignment varus-valgus in total knee arthroplasty designed for deep knee flexion used knee kinematic motion simulator, *Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering*, vol. 59, pp 119-130, 2023, DOI:10.4028/pl6p55i.

14. J. Triwardono, I. Kartika, C. Sutowo, N. I. Ciptasari, B. R. Elvira, F. Rokhmanto, T. Asmaria, H. Purnama, Rahyussalim, Evaluation tibia rotation in total knee arthroplasty designed for deep knee flexion using knee kinematics motion simulator, *Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering*, vol. 67, pp 95-107, 2025, DOI:10.4028/p-SrL1Hn.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. DATA PRIBADI

Nama	: Dr. Ika Kartika, M.T.
Tempat, Tanggal Lahir	: Bandung, 25 Januari 1972
Anak ke	: Dua dari Enam Bersaudara
Jenis Kelamin	: Perempuan
Nama Ayah Kandung	: Iro Karnawijaya
Nama Ibu Kandung	: Imas Rokayah
Nama Suami	: Iwan Kurniawan, S.KM
Jumlah Anak	: Satu
Nama Anak	: Muhammad Zaydan Kamil
Nama Instansi	: Pusat Riset Metalurgi
Ilmu	: Teknik
Bidang	: Metalurgi dan Material
Kepakaran	: Logam dan Paduan
Judul Orasi	: Pengembangan Material Implan Tulang Permanen dan Sementara untuk Mendukung Kemandirian Kesehatan Nasional: Sinergi Antara Riset Material dan Tantangan Demografi Indonesia
No. SK Pangkat Terakhir	: Keputusan Presiden RI Nomor 11/K, tanggal 30 Mei 2023
No. SK Peneliti Ahli Utama	: Keputusan Presiden RI Nomor 3/M, tanggal 19 Januari 2022

B. Pendidikan Formal

No.	Jenjang	Nama Sekolah/ PT/ Universitas	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
1.	SDN	Halimun III	Bandung/Indonesia	1984
2.	SMPN	XIII	Bandung/Indonesia	1987
3.	SMAN	XII	Bandung/Indonesia	1990
4.	S-1	Universitas Jenderal Achmad Yani	Bandung/Indonesia	1996
5.	S-2	Institut Teknologi Bandung	Bandung/Indonesia	2006
6.	S-3	Tohoku University	Sendai/Jepang	2009

C. Pendidikan Nonformal

No.	Nama Pelatihan/Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
1.	Leadership Development Program	Belanda	2014
2.	Diklatpim III	Cibinong/ Indonesia	2017

D. Jabatan Struktural

No.	Jabatan/Pekerjaan	Nama Instansi	Tahun
1.	Kepala Sub Bidang Rekayasa Metalurgi	Pusat Penelitian Metalurgi-LIPI	2010–2012
2.	Kepala Bidang Metalurgi Ekstraksi	Pusat Penelitian Metalurgi-LIPI	2012–2014

No.	Jabatan/Pekerjaan	Nama Instansi	Tahun
3.	Kepala Bidang Pengelolaan dan Diseminasi Hasil Penelitian	Pusat Penelitian Metalurgi dan Material-LIPI	2014–2019
4.	Kepala Pusat Riset	Pusat Riset Metalurgi-BRIN	2022– sekarang (2025)

E. Jabatan Fungsional

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1.	Asisten Peneliti Muda	1 Oktober 2000
2.	Asisten Peneliti Madya	1 Agustus 2003
3.	Peneliti Muda	1 Oktober 2004
4.	Peneliti Madya	1 April 2015
5.	Peneliti Utama	30 November 2020

F. Keikutsertaan dalam Kegiatan Ilmiah

No.	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
1.	JIMM Conference	Oral Presentasi	Kyoto, Jepang	2008
2.	JIMM Conference	Oral Presentasi	Tokyo, Jepang	2009
3.	The 3 rd International Conference on Materials and Metallurgical Engineering and Technology (ICOMMET)	Oral Presentasi	Surabaya, Indonesia	2017

No.	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
4.	International Conference on Biology and Applied Science (ICOBAS)	Oral Presentasi	Malang, Indonesia	2019
5.	The 3 rd Annual Technology, Applied Science and Engineering Conference (ATASEC 2021)	Keynote Speaker	Politeknik Negeri Malang	2021
6.	International Conference On Electronics, Biomedical Engineering, and Health Informatics (ICEBEHI)	Presenter	Surabaya, Indonesia	2020
7.	International Seminar on Metallurgy and Materials	Presenter	Serpong, Indonesia	2020

G. Keterlibatan dalam Pengelolaan Jurnal Ilmiah

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/Tugas	Tahun
1.	Metalurgi	Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI	Chief Editor	2017–2020
2.	Metalurgi	BRIN	Chief Editor	2021–2025

H. Karya Tulis Ilmiah

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Bersama Penulis Lainnya	85
	Total	85

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Indonesia	29
2.	Bahasa Inggris	56
	Total	85

**I. Pembinaan Kader Ilmiah
Pejabat Fungsional Peneliti**

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Pembinaan CPNS 2018	LIPI	Mentor	2018
2.	Pembinaan CPNS 2019	LIPI	Coacher	2019
3.	Pelatihan Penulisan Makalah Ilmiah	BPPOM	Pengajar	2024
4.	Pelatihan Penulisan Makalah Ilmiah	BMKG	Pengajar	2024

Mahasiswa

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Siska Prifiharni	Universitas Sultan Ageng Tirtayasa	Pembimbing S-1	2013
2.	Ardi Tri Laksono	Universitas Sultan Ageng Tirtayasa	Pembimbing S-1	2015
3.	Ahmad Suhardi Kusuma	Universitas Sultan Ageng Tirtayasa	Pembimbing S1	2015

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
4.	Andi Mulya Ashari	Universitas Sultan Ageng Tirtayasa	Pembimbing S-1	2017
5.	Muhammad Fajar Zulfida	Universitas Sultan Ageng Tirtayasa	Pembimbing S-1	2017
6.	Hardhian Restu P. Laksana	Institut Teknologi Sepuluh November	Pembimbing S-1	2017
7.	Fernando Alexander	Universitas Sultan Ageng Tirtayasa	Pembimbing S-1	2018
8.	Nuyzi Kresno Aji	Universitas Sultan Ageng Tirtayasa	Pembimbing S-1	2018
9.	Gustini Dian Lestari	Universitas Teknologi Sumbawa	Pembimbing S-1	2020
10.	Kevin Kurnia	Universitas Sultan Ageng Tirtayasa	Pembimbing S-1	2020
11.	Fajar Achmad Fadillah	Universitas Sultan Ageng Tirtayasa	Pembimbing S-1	2021
12.	Meini Aninda	UIN Syarif Hidayatulloh Jakarta	Pembimbing S-1	2022
13.	Joko Triwardono	Universitas Indonesia	Pembimbing S-2	2022
14.	Franciska Pramuji Lestari	Universitas Indonesia	Pembimbing S-3	2020

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
15.	Muhammad Ali Rohmatulloh	Universitas Pertamina	Pembimbing S-1	2021
16.	Muhammad Deo Rozeno	Universitas Pertamina	Pembimbing S-1	2021
17.	Galih Senopati	Swinburne University of Technology, Australia	Pembimbing S-3	2021

J. Organisasi Profesi Ilmiah

No.	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1.	Anggota	The Japan Institute of Metals and Materials (JIMM)	2007–2009
2.	Anggota	Masyarakat Biomaterial Indonesia	2011–2013
3.	Anggota	HIMPENINDO	2018–2020
4.	Anggota	PPI	2021–sekarang

K. Tanda Penghargaan

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1.	SATYALENCANA X	Presiden Republik Indonesia	2011
2.	SATYALENCANA XX	Presiden Republik Indonesia	2018
3.	Paper Gold Award, General Engineering Materials Category	International Conference on Electronics, Biomedical Engineering and Health Informatics ICEBEHI)	2020

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Orasi ini menyajikan *state of the art* mengenai kebutuhan implan tulang di Indonesia yang erat kaitannya dengan dinamika demografi dan tantangan kesehatan masyarakat. Di satu sisi, peningkatan jumlah penduduk lanjut usia, tingginya angka kecelakaan, serta prevalensi penyakit degeneratif mendorong urgensi pengembangan implan tulang permanen dalam negeri. Di sisi lain, dalam kasus pediatrik seperti kerusakan tulang tengkorak maupun patah tulang yang terjadi di dekat daerah pertumbuhan tulang, menuntut hadirnya implan sementara yang terdegradasi yang dapat menyatu dengan tulang alami seiring pertumbuhan pasien. Melalui pendekatan multidisiplin, riset implan tulang ini bukan sekadar menjawab kebutuhan medis, melainkan juga memperkuat posisi Indonesia dalam rantai nilai global, mendukung pembangunan berkelanjutan, dan mewujudkan visi bangsa yang sehat, mandiri, serta berdaya saing.

BRIN Publishing
The Legacy of Knowledge

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Gedung BJ, Habibie Lt. 8,
Jln. M.H. Thamrin No. 8,
Kota Jakarta Pusat 10340
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.2326



ISSN 3090-8485



9 773090 848005

Buku ini tidak diperjualbelikan.