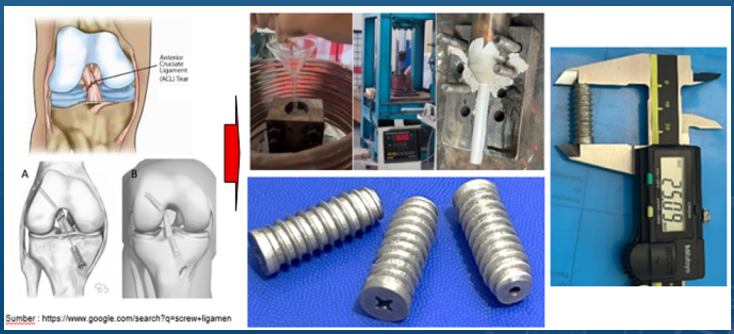
ISSN 3090-8485

ORASI ILMIAH: RISET DAN INOVASI

INOVASI MATERIAL KOMPOSIT *BIODEGRADABLE* BERBASIS LOGAM MAGNESIUM UNTUK IMPLAN TULANG TRAUMATIK

ORASI ILMIAH PROFESOR RISET
ILMU TEKNIK
BIDANG MATERIAL
KEPAKARAN LOGAM *BIODEGRABLE*



OLEH:

IWAN SETYADI

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

ISSN 3090-8485

INOVASI MATERIAL KOMPOSIT *BIODEGRADABLE* BERBASIS LOGAM MAGNESIUM UNTUK IMPLAN TULANG TRAUMATIK

Diterbitkan pertama pada 2026 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/

ISSN 3090-8485

ORASI ILMIAH: RISET DAN INOVASI

INOVASI MATERIAL KOMPOSIT BIODEGRADABLE BERBASIS LOGAM MAGNESIUM UNTUK IMPLAN TULANG TRAUMATIK

ORASI ILMIAH PROFESOR RISET
ILMU TEKNIK
BIDANG MATERIAL
KEPAKARAN LOGAM *BIODEGRADABLE*

OLEH:
IWAN SETYADI

Penerbit BRIN

© 2026 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Organisasi Riset Nanoteknologi dan Material, Pusat Riset Komposit dan Biomaterial

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Inovasi Material Komposit Biodegradable Berbasis Logam Magnesium Untuk Implan Tulang Traumatik/Iwan Setyadi. Jakarta - Penerbit BRIN, 2026

xii + 82 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISSN 3090-8485

1.Sosial Ekonomi Perikanan
2. Bioekonomi
3.Tata Kelola Berkeadilan
4. Marine Tenure Right (Hak Ulayat Adat)
5. Konservasi

617.47

Copy editor : Hilda Yunita
Proofreader : Hilda Yunita
Penata Isi : Hilda Yunita
Desainer Sampul : Hilda Yunita

Edisi pertama : Oktober 2026

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

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR vii
DAFTAR TABEL ix
DAFTAR LAMPIRAN xi
BIODATA RINGKAS 1
PRAKATA PENGUKUHAN 3
BAB I PENDAHULUAN 5
BAB II. SEJARAH PERKEMBANGAN MATERIAL KOMPOSIT *BIODEGRADABLE* BERBASIS LOGAM MAGNESIUM UNTUK IMPLAN TULANG TRAUMATIK 11
A. Evolusi Konsep Implan *Biodegradable*: dari Polimer ke Logam Magnesium 11
B. Tantangan Fundamental Magnesium sebagai Material Implan 12
C. Berbagai Pendekatan Pengembangan Magnesium 13
D. *State of the Art* Magnesium *Biodegradable* Untuk Implan Tulang 15
BAB III. STRATEGI INOVATIF MATERIAL KOMPOSIT *BIODEGRADABLE* BERBASIS LOGAM MAGNESIUM UNTUK IMPLAN TULANG TRAUMATIK 19
A. Formulasi dan Karakterisasi Komposit Mg-xCAp 20
B. Pemadatan dan Penguatan Struktur Komposit Mg–CAp 22
C. Rekayasa Permukaan dan Pengendalian Degradasi 26
D. Uji Biokompatibilitas 28
E. Desain, Simulasi Komputasi dan Prototipe Implan *Screw Ligament* 30
F. Positioning Capaian, Keterbatasan, dan *Roadmap* Pengembangan Mg–CAp 32

BAB IV. IMPLIKASI STRATEGIS PENGEMBANGAN IMPLAN TULANG TRAUMATIK TERHADAP KEUNGGULAN INSTITUSI RISET 35
A. Kontribusi Ilmiah 35
B. Sintesis Kontribusi Ilmiah 36
C. Kontribusi Personal dan Karya Landmark 37
D. Implikasi Strategis terhadap Institusi Riset 37
BAB V. PELUANG DAN STRATEGI PENGEMBANGAN IMPLAN TULANG TRAUMATIK NASIONAL 39
A. Kontribusi dan Implikasi 39
B. Strategi Pengembangan 40
BAB VI. KESIMPULAN 43
BAB VII. PENUTUP 45
UCAPAN TERIMA KASIH 47
DAFTAR PUSTAKA 49
LAMPIRAN 57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Periodik Penyembuhan Tulang dan Konsep Implan *Biodegradable* (Zheng et al., 2014). 19

Gambar 3.1 *Roadmap* Pengembangan Komposit *Biodegradable* Berbasis Logam Magnesium Untuk Implan Tulang Traumatik 19

Gambar 3.2 *Rod* Mg-CAp Hasil Pemadatan Awal Melalui Kompaksi Hangat (WC) (Setyadi et al., 2020) 21

Gambar 3.3 Bentuk *rod* Mg-xCA hasil pemadatan dengan proses: (a) *sinter* konvensional, (b) SPS dan (c) ekstrusi. (Setyadi et al., 2022; Setyadi et al., 2024) 23

Gambar 3.4 Perbandingan Strukturmikro *Rod* Mg-5CAp Hasil Kompaksi Hangat, *Sinter* dan Ekstrusi (Setyadi et al., 2024) 24

Gambar 3.5 Kekuatan Tekan Mg-CAp Hasil Kompaksi Hangat (WC), *Sinter* (CS) dan Ekstrusi (R1,44) (Setyadi, Jujur, et al., 2024) 25

Gambar 3.6 Kekuatan Tarik Maksimum (UTS) *Rod* Hasil Ekstrusi Dengan Rasio Ekstrusi 1,44; 4; 9 dan 12 untuk Mg-5CAp. 25

Gambar 3.7 Perbandingan Laju Korosi (Degradasi) *Rod* Mg-5CAp dan Mg murni Hasil Kompakasi Hangat (WC), *Sintering* (Sint) dan Ekstrusi (Extr) R 1,44 (Setyadi et al., 2024). 26

Gambar 3.8 Proses *Anodizing & Sealing* Mg-CAp 27

Gambar 3.9 Grafik Laju Degradasi *Rod* Mg-5CAp Hasil *Sinter*, Ekstrusi (Ekstr NA), Ekstrusi+*Anodizing* (Ekstr+A) dan Ekstrusi+*Anodizing*+*Sealing* 60' (Ekstr+A+S (60')) 28

Gambar 3.10 Hasil Uji *In-Vitro* Mg-CAp 29

Gambar 3.11 Pengujian *In-Vivo* Mg-CAp Pada Mencit *Sprague Dawley* (Kamal et al., 2025) 29
Gambar 3.12 Model dan Simulasi *Finite Element Analysis* Mg-CAp untuk *Interference Screw (IFS)* Ligamen (Setyadi et al., 2025) 31
Gambar 3.13 Hasil Pemesinan Prototipe Awal *Interference Screw* (IFS) Ligamen berbahan Mg-5CAp 31
Gambar 3.14. Ilustrasi *Positioning* Perkembangan Riset Mg-CAp Terhadap Riset Mg *Biodegradable* Nasional dan Internasional untuk Implan Tulang 34

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Rangkuman Temuan Pengembangan Komposit Mg–CAp untuk Aplikasi Implan Tulang Traumatik *Biodegradable* 33
Tabel 4.1 Rangkuman Semua Hasil Penelitian Pengembangan Mg-CAp Berdasarkan Tingkat Kontribusi Dan Posisi Penlitiannya. 36

DAFTAR LAMPIRAN

Tabel 1 Rangkuman Beberapa Penelitian Terkait Mg *Biodegradable* Yang Telah Dilakukan Periset dan Tingkat Kematangan Teknologinya Di Indonesia Maupun Internasional.....57

BIODATA RINGKAS



Dr. Ir. Iwan Setyadi, M.T., lahir di Bukittinggi, pada tanggal 28 Oktober 1969 adalah anak pertama dari Bapak Ir. H. Nurmawan dan Ibu Hj. Erniwati. Menikah dengan Leni Devera Asrar, S.T., M.T. dan dikaruniai dua orang anak, yaitu drg. Nada Rania, dan drg. Sulthan Farhan Athallah.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 44/M Tahun 2024 tanggal 13 Juni 2024 yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama di Badan Riset dan Inovasi Nasional terhitung mulai tanggal 25 Juni 2024.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional Nomor 211/I/HK/2026 tanggal 14 September 2026 yang bersangkutan dapat melakukan orasi pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Adabiah, Padang, tahun 1982, Sekolah Menengah Pertama Adabiah, Padang, tahun 1985, dan Sekolah Menengah Atas Negeri 3 Padang, tahun 1988. Memperoleh gelar Sarjana Teknik dari Teknik Mesin, ITS tahun 1993, gelar Magister Teknik dari Departemen Teknik Metalurgi, Universitas Indonesia tahun 2001, dan gelar Doktor bidang Teknik dari Departemen Teknik Metalurgi & Material Universitas Indonesia tahun 2021.

Mengikuti beberapa pelatihan yang terkait dengan bidang kompetensinya, antara lain: *Advanced Biomaterials for Medical Devices* di Adelaide, Australia (2016) dan *Good Clinical Practice* di Jakarta (2021).

Pernah menduduki jabatan struktural sebagai Kepala Bidang Teknologi Industri Logam, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) (tahun 2012–2016). Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Ajun Peneliti Madya golongan III/c, tahun 2004, Peneliti Muda golongan III/d, tahun 2005, Peneliti Ahli Madya golongan IV/a, tahun 2008, dan memperoleh jabatan Peneliti Ahli Utama golongan IV/c bidang *Biodegradable* Metal tahun 2024.

Menghasilkan 52 karya tulis ilmiah (KTI), baik yang ditulis sendiri maupun bersama penulis lain dalam bentuk buku, jurnal, dan prosiding. Sebanyak 20 KTI ditulis dalam bahasa Inggris. Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing jabatan fungsional peneliti pada Pusat Riset Komposit dan Biomaterial, pembimbing skripsi (S-1) mahasiswa Universitas Airlangga, UPI Bandung, Universitas Udayana-Denpasar, Untirta-Banten, UIN Banten, ITBU dan pembimbing tesis (S-2) mahasiswa Universitas Indonesia.

Beberapa pendanaan Riset juga diperoleh dalam menunjang pelaksanaan riset, diantaranya Penelitian Disertasi Doktor (PDD)-BIMA Kemendikti & Saintek, Rumah Program-BRIN dan Riset Inovasi untuk Indonesia Maju (RIIM)-LPDP. Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, yaitu sebagai anggota Himpunan Peneliti Indonesia (2019-2022), Perhimpunan Periset Indonesia (2022-sekarang), dan Persatuan Insinyur Indonesia (2022–sekarang). Menerima tanda penghargaan Satyalancana Karya Satya 10 Tahun (tahun 2004), 20 Tahun (tahun 2014) dan 30 Tahun (tahun 2024) dari Presiden RI.

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillaahirrahmaanirrahiim.

Assalaamu'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional yang mulia dan hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama marilah kita panjatkan puji dan syukur kehadirat 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:

"INOVASI MATERIAL KOMPOSIT BIODEGRADABLE BERBASIS LOGAM MAGNESIUM UNTUK IMPLAN TULANG TRAUMATIK"

BAB I. PENDAHULUAN

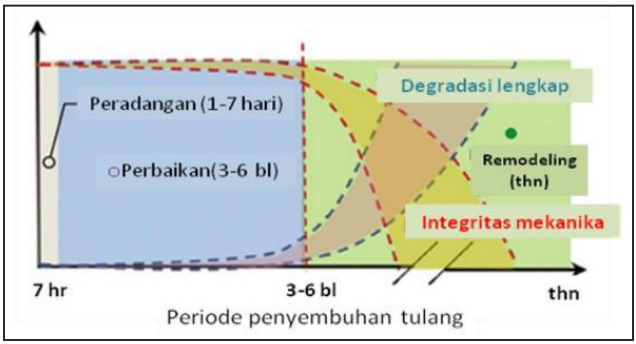
Implan tulang merupakan salah satu alat kesehatan penting dalam penanganan kerusakan tulang akibat trauma, kecelakaan, penyakit degeneratif, maupun kebutuhan rekonstruksi pada bidang kedokteran gigi (Mukarati et al., 2026; Mustika et al., 2026; Z. Wang et al., 2022). Kebutuhan terhadap implan terus meningkat seiring tingginya kasus cedera dan kerusakan tulang serta perkembangan pelayanan kesehatan. Dalam konteks nasional, kebutuhan tersebut menjadi tantangan strategis karena ketergantungan terhadap produk implan impor masih tinggi mencapai 94% (Zaenal, 2026), dimana pasar implan medis nilainya diperkirakan meningkat dari sekitar US$20 juta pada tahun 2021 menjadi US$36,67 juta pada tahun 2026 dengan tingkat pertumbuhan tahunan majemuk (CAGR) 15,2% (Setiawan et al., 2023). Besarnya kebutuhan dan pertumbuhan tersebut menunjukkan pentingnya pengembangan implan dalam negeri bagi pelayanan kesehatan serta penguatan teknologi dan industri alat kesehatan nasional.

Pada kasus trauma, implan diperlukan untuk mempertahankan stabilitas mekanik, menjaga posisi fragmen tulang, dan menopang proses penyembuhan (Mukarati et al., 2026; Z. Wang et al., 2022). Karena itu, material implan harus mampu memberikan dukungan mekanik yang memadai sekaligus sesuai dengan lingkungan biologis tubuh.

Hingga kini, sebagian besar implan tulang konvensional menggunakan logam permanen yang bersifat *bioinert*, seperti *stainless steel* 316L (SS316L), titanium dan paduannya, serta paduan kobalt-kromium (Co–Cr) (Adhitya et al., 2024; Damisih et al., 2023; Jujur et al., 2018; Jujur et al., 2024; Saudi et al., 2021, 2022, 2025; J. L. Wang et al., 2020; Z. Wang et al., 2022). Material tersebut memiliki kekuatan

mekanik dan ketahanan korosi yang tinggi sehingga mampu menopang beban dalam jangka panjang. Namun, pada kasus traumatik tertentu, sifat permanen tersebut menjadi keterbatasan. Setelah tulang sembuh dan tidak lagi memerlukan dukungan mekanik, implan perlu diangkat melalui operasi lanjutan. Tindakan tersebut dapat meningkatkan risiko komplikasi, menambah trauma jaringan, memperpanjang pemulihan, dan meningkatkan biaya perawatan (Luo et al., 2022; Mukarati et al., 2026).

Keterbatasan tersebut mendorong konsep *temporary implant*, yaitu implan yang mendukung fase kritis penyembuhan. Konsep ini kemudian berkembang menjadi implan *biodegradable*, yang menopang beban pada fase awal penyembuhan, lalu terdegradasi dan terserap jaringan tubuh sehingga diharapkan tidak memerlukan operasi pelepasan (Mukarati et al., 2026; Zheng et al., 2014), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Periodik Penyembuhan Tulang dan Konsep Implan *Biodegradable* (Zheng et al., 2014).

Implan *biodegradable* ideal tidak cukup hanya mampu terdegradasi. Material harus memiliki kekuatan mekanik yang memadai selama penyembuhan, laju degradasi yang terkendali dan

selaras dengan regenerasi tulang, biokompatibilitas yang baik, produk degradasi yang aman, serta kemampuan mendukung integrasi dengan jaringan tulang (Mukarati et al., 2026; Z. Wang et al., 2022). Oleh karena itu, tantangan utamanya adalah bagaimana memperoleh keseimbangan antara fungsi mekanik, pengendalian degradasi, dan respons biologis.

Berbagai material telah dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan tersebut, antara lain polimer, besi (Fe), seng (Zn), dan magnesium (Mg). Polimer memiliki keunggulan dalam densitas dan biodegradasi, tetapi kekuatan dan kekakuannya terbatas untuk aplikasi tertentu yang memerlukan penyangga beban. Fe memiliki kekuatan tinggi, tetapi degradasinya relatif lambat. Zn memiliki karakteristik degradasi yang lebih sesuai, tetapi kekuatan mekanik dan perilaku degradasinya masih menjadi tantangan. Magnesium menawarkan kombinasi yang menarik berupa densitas rendah, modulus elastisitas yang lebih mendekati tulang, rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, serta kemampuan terdegradasi di dalam tubuh (Mohd Salaha et al., 2025; Mukarati et al., 2026; Zhang et al., 2026)

Selain karakteristik mekaniknya yang mendukung, magnesium merupakan unsur esensial dalam tubuh dan berperan dalam berbagai proses biologis. Hal tersebut menjadikan Mg kandidat potensial untuk implan *biodegradable*. Akan tetapi, magnesium memiliki kelemahan mendasar berupa laju degradasi yang relatif cepat dalam lingkungan fisiologis dan sifat mekanik yang masih perlu ditingkatkan. Degradasi yang terlalu cepat dapat menyebabkan kehilangan kekuatan sebelum tulang mencapai kestabilan, disertai kemungkinan evolusi hidrogen dan perubahan kondisi lingkungan lokal. Dengan demikian, persoalan utama pada implan magnesium adalah bagaimana mengendalikan degradasinya tanpa mengorbankan kekuatan mekanik yang diperlukan selama penyembuhan (Mukarati et al., 2026; Negahban et al., 2024).

Berbagai strategi telah dikembangkan untuk mengatasi persoalan tersebut, antara lain pembentukan paduan baru, pembentukan struktur baru seperti komposit dan modifikasi permukaan (Mukarati et al., 2026; Negahban et al., 2024; Z. Wang et al., 2022; Zheng et al., 2014). Diantara pendekatan tersebut, komposit magnesium dengan biokeramik menjadi menarik karena memungkinkan peningkatan sifat mekanik sekaligus modifikasi karakteristik permukaan dan degradasi (Rahyussalim et al., 2021). Dengan mengatur jenis dan jumlah fase penguat, dapat direkayasa hubungan antara komposisi, mikrostruktur, kekuatan, degradasi, dan respons biologis.

Biokeramik berbasis kalsium-fosfat, khususnya *hydroxyapatite* (HA) dan *carbonate apatite* (CAp), memiliki kemiripan dengan fase mineral tulang dan dikenal bersifat bioaktif serta osteokonduktif (Rahyussalim et al., 2021; Susilowati et al., 2025; Yotsova & Peev, 2024). CAp menjadi menarik karena karbonat merupakan salah satu komponen alami mineral tulang. Integrasinya dengan magnesium diharapkan tidak hanya berfungsi sebagai fase penguat, tetapi juga memengaruhi interaksi permukaan dengan lingkungan fisiologis dan mendukung pembentukan jaringan tulang. Oleh karena itu, komposit Mg–CAp berpotensi menghasilkan keseimbangan sifat mekanik, degradasi, dan respons biologis yang lebih baik dibandingkan magnesium murni.

Namun, perkembangan penelitian magnesium dan komposit magnesium-biokeramik masih menyisakan kesenjangan ilmiah. Tantangannya bukan hanya memperoleh material yang kuat atau mudah terdegradasi, tetapi menghasilkan satu sistem material yang secara simultan mampu mempertahankan kekuatan selama fase penyembuhan, memiliki degradasi yang terkendali, dan memberikan respons biologis yang mendukung regenerasi tulang (Mukarati et al., 2026; Negahban et al., 2024; Z. Wang et al., 2022).

Permasalahan tersebut tidak dapat diselesaikan hanya melalui pemilihan komposisi material. Karakteristik akhir komposit juga sangat dipengaruhi oleh teknologi fabrikasi, pemadatan, mikrostruktur, interaksi antarmuka Mg–CAp, serta kondisi permukaan material (Kamal et al., 2025; Rahyussalim et al., 2021; Z. Wang et al., 2022). Proses berbasis serbuk seperti proses pencampuran, kompaksi hangat, *sintering*, dan ekstrusi perlu dikendalikan untuk menghasilkan material yang cukup padat dan memiliki integritas mekanik yang memadai (del Campo et al., 2014; Harahap et al., 2025; Hermanto et al., 2025).

Selanjutnya, karena degradasi Mg terutama berlangsung melalui interaksi permukaan dengan lingkungan fisiologis, diperlukan pula rekayasa permukaan, antara lain melalui proses *anodizing* dan *sealing*, untuk membentuk lapisan pelindung dan mengendalikan degradasi pada fase awal implantasi (Negahban et al., 2024; Z. Wang et al., 2022).

Berdasarkan kesenjangan tersebut, masalah ilmiah utama penelitian ini adalah bagaimana merekayasa komposit berbasis Mg agar diperoleh keseimbangan antara kekuatan mekanik yang diperlukan untuk menopang fungsi implan, laju degradasi yang terkendali sesuai dengan proses penyembuhan tulang, serta respons biologis yang mendukung regenerasi jaringan tulang (Mukarati et al., 2026; Negahban et al., 2024).

Atas dasar permasalahan tersebut, penelitian ini diarahkan pada pengembangan komposit Mg–CAp *biodegradable* sebagai kandidat material implan tulang traumatik, dimana CAp yang digunakan berbasis sumber daya lokal. Permasalahan tersebut selanjutnya dijawab melalui pendekatan terpadu yang menghubungkan formulasi material, teknologi fabrikasi dan penguatan, rekayasa permukaan, karakterisasi dan pengujian biologis, serta rekayasa desain implan.

Uraian diawali dengan tinjauan perkembangan material *biodegradable* untuk implan tulang, kemudian dilanjutkan dengan pemaparan hasil riset pengembangan komposit Mg–CAp dan teknologi yang menyertainya. Selanjutnya dibahas kontribusi strategis riset terhadap pengembangan implan tulang nasional, sebelum diakhiri dengan kesimpulan dan pandangan ke depan mengenai peluang pengembangan teknologi implan *biodegradable* di Indonesia.

BAB II. SEJARAH PERKEMBANGAN MATERIAL KOMPOSIT BIODEGRADABLE BERBASIS LOGAM MAGNESIUM UNTUK IMPLAN TULANG TRAUMATIK

Riset pengembangan implan tulang *biodegradable* berbasis magnesium (Mg) berkembang pesat dalam dua dekade terakhir. Perkembangan ini didorong oleh kebutuhan implan sementara (*temporary implant*) yang mampu menopang beban selama proses penyembuhan tulang, kemudian terdegradasi secara aman tanpa memerlukan operasi pelepasan (Mukarati et al., 2026; Zheng et al., 2014). Pada tahap awal, penelitian didominasi pendekatan metalurgi dan teknik material yang berfokus pada peningkatan sifat mekanik.

Seiring waktu, pendekatan ini berkembang menjadi lebih multidisipliner dengan melibatkan ilmu biomaterial, biologi sel, dan ilmu klinis untuk memahami interaksi material dengan jaringan tubuh serta mekanisme degradasinya. Perkembangan tersebut juga menandai pergeseran paradigma dari material penopang beban menjadi material biofungsional yang mendukung proses penyembuhan tulang. Untuk memahami posisi riset komposit magnesium–*carbonate apatite* (Mg–CAp), bagian berikut menguraikan evolusi konsep implan *biodegradable*, tantangan material magnesium, berbagai pendekatan pengembangannya dan *state of the art* Mg *biodegradable.*

A. Evolusi Konsep Implan *Biodegradable*: dari Polimer ke Logam Magnesium

Konsep implan *biodegradable* pertama kali berkembang melalui penggunaan polimer seperti *polylactic acid* (PLA) dan *polyglycolic acid* (PGA) yang mulai diterapkan secara klinis pada periode 1970–1990-an. Material ini memperkenalkan paradigma baru dalam ortopedi

karena dapat terdegradasi secara alami sehingga tidak memerlukan operasi pelepasan implan.

Namun demikian, polimer *biodegradable* memiliki keterbatasan penting, terutama kekuatan mekanik dan kekakuan yang relatif rendah, sehingga penggunaannya lebih sesuai untuk aplikasi tertentu yang tidak memerlukan penopang beban tinggi (Mukarati et al., 2026).

Keterbatasan tersebut mendorong pencarian alternatif material *biodegradable* berbasis logam. Perkembangan berikutnya mengarah pada tiga kandidat utama, yaitu magnesium (Mg), besi (Fe), dan seng (Zn) (Mohd Salaha et al., 2025; Mukarati et al., 2026; Zhang et al., 2026). Di antara ketiganya, magnesium berkembang paling pesat karena memiliki kombinasi sifat yang menarik, yaitu densitas rendah, modulus elastisitas yang relatif mendekati tulang kortikal, serta peran biologisnya sebagai unsur esensial dalam metabolisme tubuh (Rahyussalim et al., 2021; Z. Wang et al., 2022).

Karakteristik tersebut menjadikan magnesium sebagai kandidat yang menjanjikan untuk pengembangan implan logam sementara (*temporary metallic implant*). Dalam perkembangannya, riset mengenai magnesium *biodegradable* meningkat pesat dan menjadi salah satu fokus utama dalam pengembangan implan ortopedi (Mukarati et al., 2026).

B. Tantangan Fundamental Magnesium sebagai Material Implan

Meskipun memiliki potensi besar, magnesium murni masih menghadapi beberapa kendala mendasar. Tantangan utama adalah laju degradasi yang terlalu cepat di lingkungan fisiologis serta pembentukan gas hidrogen selama proses degradasi (Mukarati et al., 2026; Z. Wang et al., 2022). Degradasi yang terlalu cepat dapat menyebabkan penurunan kekuatan implan sebelum tulang sepenuhnya

pulih (Mukarati et al., 2026), sekaligus mengganggu interaksi awal antara implan dan jaringan tulang

Selain itu, kekuatan dan keuletan magnesium murni masih terbatas untuk penopang beban, terutama ketika degradasi terjadi secara tidak merata. Padahal pada kasus traumatik tulang, implan perlu mempertahankan kekuatan mekanik selama fase kritis penyembuhan, sehingga laju degradasinya harus disesuaikan dengan proses regenerasi tulang (Mukarati et al., 2026).

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa magnesium memerlukan rekayasa material lanjutan agar laju degradasinya dapat dikendalikan tanpa mengorbankan kekuatan mekaniknya. Tantangan inilah yang kemudian mendorong berbagai pendekatan inovatif dalam pengembangan material magnesium *biodegradable*.

C. Berbagai Pendekatan Pengembangan Magnesium

1. Perkembangan Komposit Magnesium Berpenguat Biokeramik

Salah satu pendekatan yang berkembang untuk mengatasi keterbatasan magnesium adalah pembentukan material komposit dengan partikel penguat, di samping pembentukan paduan baru dan rekayasa permukaan (Mukarati et al., 2026; Negahban et al., 2024)**.** Pada tahap awal, penelitian komposit Mg banyak menggunakan partikel *inert* seperti Al_2O_3, SiC, dan ZrO_2 untuk meningkatkan kekuatan serta stabilitas mikrostruktur (Chen & Yao, 2014). Namun pendekatan ini belum memberikan kontribusi langsung terhadap respons biologis jaringan tulang.

Perkembangan berikutnya mengarah pada penggunaan biokeramik kalsium fosfat, seperti hydroxyapatite dan tricalcium phosphate. Material berbasis kalsium-fosfat memiliki kemiripan dengan fase mineral tulang dan dapat memberikan fungsi biologis

selain kontribusi terhadap sifat mekanik (Rahyussalim et al., 2021; Yotsova & Peev, 2024).

Melalui mekanisme penguatan mikrostruktur, transfer beban, serta stabilisasi lapisan degradasi, komposit magnesium–biokeramik berkembang menjadi material yang tidak hanya bersifat struktural, tetapi juga bioaktif, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi implan tulang traumatik.

2. *Carbonate Apatite* sebagai Penguat Fungsional

Di antara berbagai biokeramik kalsium fosfat, *carbonate apatite* (CAp) memiliki karakteristik yang menarik karena komposisinya menyerupai mineral tulang alami. Keberadaan karbonat dalam struktur apatite berkaitan dengan karakteristik biologis CAp yang mendukung biokompatibilitas, bioaktivitas, resorpsi, dan osteokonduktivitas (Rahyussalim et al., 2021; Yotsova & Peev, 2024)

Sifat biologis tersebut memungkinkan CAp tidak hanya berperan sebagai fase penguat, tetapi juga berpotensi memberikan fungsi bioaktif yang mendukung interaksi material dengan jaringan tulang (Rahyussalim et al., 2021; Yotsova & Peev, 2024). Dengan demikian, integrasi magnesium dengan CAp berpotensi menghasilkan material komposit yang memiliki keseimbangan lebih baik antara kekuatan mekanik, stabilitas degradasi, dan respons biologis (Kamal et al., 2025; Mukarati et al., 2026; Rahyussalim et al., 2021)

Selain aspek fungsional, pengembangan CAp berbasis sumber daya lokal memberikan peluang strategis bagi pengembangan bahan baku implan dalam negeri. Pendekatan ini sejalan dengan arah penelitian Mg–CAp yang dikembangkan dalam penelitian ini. Magnesium juga berpotensi mandiri melalui pemanfaatan dolomit, magnesit, dan air laut yang kaya Mg. Sinergi ini membuka peluang ketersediaan bahan baku nasional untuk pengembangan implan Mg–CAp.

3. Strategi Pengendalian Degradasi

Selain rekayasa komposisi material, pengendalian degradasi magnesium juga dilakukan melalui pengaturan mikrostruktur dan rekayasa permukaan (Mukarati et al., 2026; Negahban et al., 2024; Z. Wang et al., 2022). Berbagai pendekatan dikembangkan, antara lain optimasi komposisi paduan, pengaturan fraksi dan distribusi biokeramik melalui proses metalurgi serbuk, serta pembentukan material melalui proses deformasi plastis atau ekstrusi untuk memperbaiki struktur mikro (Kamal et al., 2025; Mukarati et al., 2026; Z. Wang et al., 2022)

Di samping itu, teknik rekayasa permukaan seperti *anodizing, micro-arc oxidation*, dan berbagai jenis pelapisan pelindung dikembangkan untuk membentuk lapisan yang dapat meningkatkan ketahanan korosi pada tahap awal implantasi (Negahban et al., 2024; Z. Wang et al., 2022).

Dengan kombinasi pendekatan tersebut, degradasi magnesium diharapkan dapat berlangsung secara bertahap dan sejalan dengan dinamika penyembuhan tulang, sehingga implan tetap mampu menjalankan fungsi mekaniknya sebelum akhirnya terdegradasi secara aman di dalam tubuh.

D. *State of the Art* Magnesium *Biodegradable* Untuk Implan Tulang

1. Perkembangan Nasional

Perkembangan implan *biodegradable* berbasis magnesium secara nasional dan internasional menunjukkan tingkat kematangan yang berbeda. Di Indonesia, penelitian telah berkembang dari pengembangan paduan Mg–Zn–Ca, Mg berpori, Mg-Zn-Nd (RE) di Pusat Ristet Metalurgi-BRIN , hingga komposit Mg–biokeramik di Pusat Komposit dan Biomaterial-BRIN melalui pendekatan

metalurgi serbuk dan berbagai proses pembentukan (Annur et al., 2016; Darmayanti et al., 2024; Erryani et al., 2019; Subagyo et al., 2023). Kelompok Universitas Indonesia juga mengembangkan *microforming* magnesium untuk *miniplate* implan, yang memperkuat aspek teknologi manufaktur dan pembentukan komponen implan (Dwiyati et al., 2025) , sedang ITS mengembangkan pelapisan Mg dengan *Plasma Electrolitic Oxidation* (PEO). Perkembangan tersebut menunjukkan bahwa riset nasional telah mencakup pengembangan material hingga pengembangan proses dan kandidat prototipe, namun validasi biologis, biomekanik, praklinis dan translasi klinis masih memerlukan penguatan.

Dalam ekosistem tersebut, penelitian pengembangan komposit magnesium–*carbonate apatite* (Mg–CAp) yang dilakukan melalui metalurgi serbuk, *sintering*, dan ekstrusi telah berkembang secara bertahap, mulai dari formulasi material dan pengembangan proses, evaluasi karakteristik degradasi hingga pengujian *in-vivo*. Hasil yang diperoleh kemudian menjadi dasar dalam merancang kandidat implan, menghasilkan purwarupa awal, serta melakukan validasi biomekanik untuk memastikan kesesuaiannya dengan kebutuhan aplikasi implan tulang traumatik. Riset ini juga diperkuat melalui kolaborasi BRIN dengan berbagai mitra, antara lain Fakultas Kedokteran (FK) dan Fakultas Teknik (FT) Universitas Indonesia, FK Universitas Udayana, FT Universitas Diponegoro, dokter ortopedi, serta mitra industri, yaitu PT Pudak *Scientific*. Hasil penelitian tersebut secara lebih khusus dibahas pada Bab III.

2. Perkembangan Internasional

Pada tingkat internasional, pengembangan Mg *biodegradable* telah mencapai tingkat kematangan yang lebih tinggi. Perkembangannya tidak lagi terbatas pada pengembangan material dan pembuktian melalui pengujian *in-vitro* dan *in-vivo*, tetapi telah berlanjut ke tahap pra klinis

dan klinis. Beberapa produk bahkan telah memperoleh persetujuan regulatori dan memasuki tahap komersialisasi. Perkembangan tersebut menunjukkan bahwa teknologi Mg *biodegradable* secara internasional telah bergerak dari tahap penelitian material menuju penerapan klinis dan produk implan yang siap digunakan.

Di Eropa dan Asia, beberapa produk memperoleh sertifikasi atau persetujuan regulasi, seperti MAGNEZIX® di Jerman, K-MET di Korea, serta beberapa sistem berbasis Mg di China. Perkembangan ini menunjukkan bahwa teknologi Mg *biodegradable* telah bergerak dari tahap penelitian menuju penerapan klinis dan komersial (Aikin et al., 2025; J. L. Wang et al., 2020).

3. Kondisi Saat Ini, Keterbatasan, dan Posisi Penelitian

Perkembangan saat ini menunjukkan bahwa Mg merupakan salah satu kandidat logam *biodegradable* dengan kemajuan translasi yang paling menjanjikan. Di Indonesia, riset Mg telah mencapai validasi biologis dan biomekanik, namun masih memerlukan validasi praklinis yang komprehensif serta tahapan regulatori dan klinis.

Celah riset yang masih terbuka adalah bagaimana mengintegrasikan pengendalian degradasi, integritas mekanik, respons biologis, dan desain implan dalam satu kesatuan yang saling mendukung. Dalam penelitian ini, Mg–CAp ditempatkan sebagai kandidat implan fungsional melalui pendekatan terpadu yang mencakup pengembangan material dan proses, rekayasa permukaan, evaluasi biologis, hingga perancangan implan. Pendekatan tersebut didukung oleh serangkaian validasi melalui pengujian *in-vitro*, *in-vivo*, biomekanik, dan pengembangan prototipe. Dengan pendekatan ini, penelitian berupaya menjembatani pengembangan material maju menuju kandidat implan yang lebih siap untuk tahap praklinis, sekaligus memberikan landasan bagi pengembangan menuju validasi klinis.

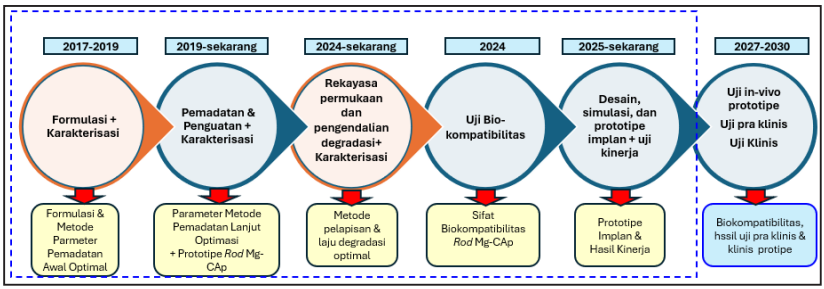
Ringkasan tolok ukur penelitian Mg *biodegradable* di tingkat nasional dan internasional serta tingkat kematangan teknologinya disajikan pada Tabel 1 Lampiran 1. Berangkat dari posisi tersebut, bagian berikutnya menguraikan pendekatan pengembangan komposit Mg–CAp, meliputi rekayasa material, proses manufaktur, dan karakterisasi sebagai dasar pengembangan purwarupa implan.

BAB III. STRATEGI INOVATIF MATERIAL KOMPOSIT *BIODEGRADABLE* BERBASIS LOGAM MAGNESIUM UNTUK IMPLAN TULANG TRAUMATIK

Riset pengembangan komposit *biodegradable* berbasis magnesium untuk implan tulang traumatik telah berlangsung sejak 2017, dengan fokus pada komposit magnesium–*carbonate apatite* (Mg–CAp) berbasis serbuk. CAp dipilih disamping sebagai penguat akan tetapi juga memiliki kemiripan dengan mineral tulang dan berpotensi memberikan fungsi bioaktif serta mendukung integrasi biologis implan (Rahyussalim et al., 2021; Yotsova & Peev, 2024). CAp yang digunakan juga bersumber dari produk lokal.

Dibandingkan dengan pengembangan komposit Mg yang menggunakan penguat keramik seperti *hydroxyapatite* atau β-*tricalcium phosphate*, penelitian berbasis *carbonate apatite* (CAp) masih relatif terbatas (Darmayanti et al., 2024; Rahyussalim et al., 2021; Subagyo et al., 2023; Yotsova & Peev, 2024).

Secara umum, riset ini dilakukan melalui pendekatan bertahap yang meliputi formulasi dan karakterisasi material, proses pemadatan



Gambar 3.1 *Roadmap* Pengembangan Komposit *Biodegradable* Berbasis Logam Magnesium Untuk Implan Tulang Traumatik

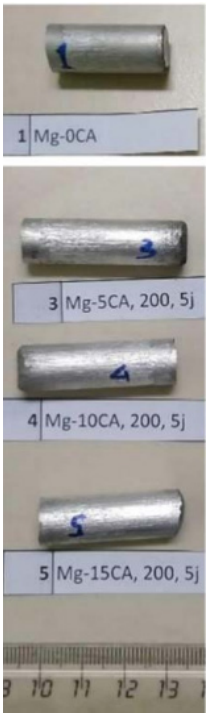
dan penguatan struktur, rekayasa permukaan untuk pengendalian degradasi, pengujian biokompatibilitas, serta pengembangan desain dan prototipe implan. Seluruh tahapan tersebut dirangkum dalam *roadmap* penelitian sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.1.

A. Formulasi dan Karakterisasi Komposit Mg-xCAp

Tahap awal riset berangkat dari permasalahan bagaimana memperoleh komposisi dan struktur awal Mg–CAp yang memiliki keseimbangan antara kekuatan mekanik dan karakteristik degradasi dan biologis. Pendekatan yang dilakukan dengan cara bahan baku serbuk Mg dan CAp diformulasikan dengan beberapa variasi komposisi, kemudian dicampur melalui *milling* dan dipadatkan menggunakan kompaksi hangat pada sekitar 330°C (Setyadi, Marsetio, et al., 2020). Ketiga parameter tersebut berperan penting dalam menentukan kualitas struktur awal komposit yang dihasilkan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses *milling* selama sekitar 2 jam pada kecepatan 250 rpm diikuti kompaksi hangat pada temperatur sekitar 330°C mampu menghasilkan batang komposit Mg–CAp dengan panjang sekitar 25 mm (Gambar 3.2). Proses ini menghasilkan pemadatan (densifikasi) awal yang cukup baik sehingga material dapat digunakan sebagai tahap dasar untuk proses penguatan lanjutan.

Dari beberapa variasi komposisi yang dikaji, komposit dengan penambahan 5% berat *carbonate apatite* (Mg–5CAp) menunjukkan performa paling baik dibandingkan komposisi dengan kandungan 10% dan 15% berat CAp. Komposisi ini menghasilkan kekerasan mikro pada kisaran 35–40 HV serta menunjukkan kestabilan struktur yang lebih baik (Setyadi et al., 2020). Temuan ini menunjukkan bahwa penambahan CAp pada kadar tertentu dapat memberikan keseimbangan awal antara sifat mekanik dan karakteristik komposit



Gambar 3.2 *Rod* Mg-CAp Hasil Pemadatan Awal Melalui Kompaksi Hangat (WC) (Setyadi et al., 2020)

Namun demikian, hasil penguatan awal dengan kompaksi hangat masih menunjukkan keterbatasan berupa ikatan antarpartikel yang belum optimal dan seragam serta laju degradasi yang relatif tinggi. Uji biokompatibilitas awal menunjukkan bahwa komposit Mg–CAp memiliki respons biologis yang cukup baik, meskipun stabilitas mekanik material masih perlu ditingkatkan melalui proses densifikasi lebih lanjut (Rahyussalim et al., 2021). Oleh karena itu tahap berikutnya pemadatan dan penguatan diarahkan pada proses *sintering* dan ekstrusi untuk meningkatkan densitas serta integritas mekanik material. Kondisi ini penting diperhatikan karena degradasi Mg

yang terlalu cepat dapat menyebabkan hilangnya integritas mekanik sebelum proses penyembuhan tulang selesai (Mukarati et al., 2026; Negahban et al., 2024).

Hasil riset ini telah menemukan bahwa komposisi Mg–5CAp menunjukkan keseimbangan optimal antara kekerasan dan stabilitas struktur, sehingga menjadi dasar pengembangan selanjutnya.

B. Pemadatan dan Penguatan Struktur Komposit Mg–CAp

Berangkat dari permasalahan bagaimana menghasilkan kepadatan dan kekuatan yang memadai dan upaya memperlambat laju degradasi komposit Mg–CAp, maka dilakukan proses pemadatan dan penguatan lanjut yang meliputi proses *sintering* (Setyadi et al., 2022; Setyadi, Pribadi, et al., 2020) dan penguatan deformasi melalui ekstrusi (Setyadi, Jujur, et al., 2024).

1. Pemadatan dan Penguatan Melalui Proses *Sintering*

Proses *sintering* dilakukan menggunakan dua pendekatan, yaitu metode konvensional dengan *vacuum tube furnace* serta metode *non*-konvensional menggunakan *spark plasma sintering* (SPS).

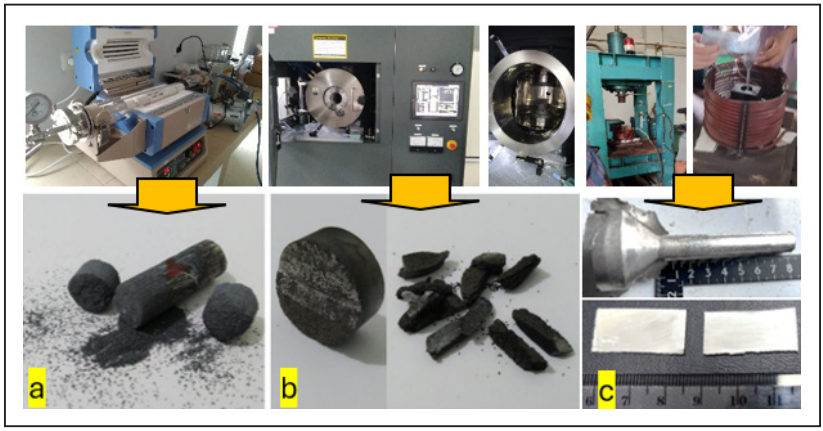
Hasil penelitian menunjukkan bahwa *sintering* mampu meningkatkan densitas material dibandingkan hanya dengan kompaksi hangat. Namun pada *sintering* konvensional masih ditemukan porositas sisa yang berdampak pada penurunan sifat mekanik. Hal ini diduga berkaitan dengan ketidakstabilan karbonat pada temperatur tinggi yang memicu pembentukan gas CO_2 dan mengganggu proses pemadatan material.

Metode SPS menunjukkan kinerja yang lebih baik karena waktu pemanasan yang lebih singkat, dalam kondisi *vacuum*, dialiri gas *inert* dan kontrol temperatur yang lebih baik serta secara bersamaan

ada proses tekan, sehingga densitas dan kekerasan material meningkat serta laju degradasi sedikit menurun (Setyadi et al., 2022). Meskipun demikian, tantangan terkait stabilitas karbonat pada temperatur tinggi masih menjadi keterbatasan dalam proses *sintering*.

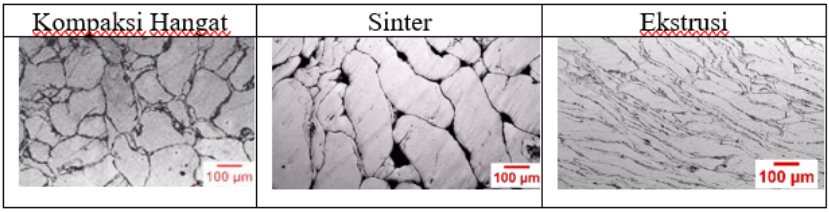
2. Pemadatan dan Penguatan Melalui Proses Ekstrusi

Untuk mengatasi keterbatasan proses *sintering*, pendekatan yang dilakukan adalah melalui penguatan deformasi plastis menggunakan proses ekstrusi untuk memperbaiki kepadatan (densifikasi), ikatan antarpartikel, keseragaman struktur dan orientasi mikrostruktur (Setyadi, Jujur, et al., 2024; Setyadi, Suryadi, et al., 2024) dan didukung dengan cetakan terintegrasi untuk membuat batang komposit yang sudah terdaftar patennya (Suryadi, et al., 2026). Metode ini terbukti memberikan peningkatan kepadatan dan kekuatan mekanik yang signifikan.



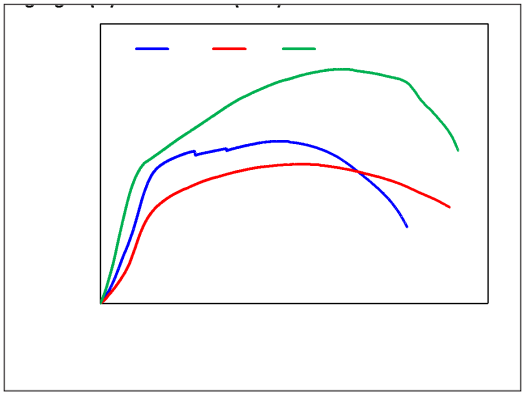
Gambar 3.3 Bentuk *rod* Mg-xCA hasil pemadatan dengan proses: (a) *sinter* konvensional, (b) SPS dan (c) ekstrusi. (Setyadi et al., 2022; Setyadi et al., 2024)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa bentuk fisik prototipe batang (*rod*) Mg–CAp hasil ekstrusi lebih panjang dengan struktur yang padat dan seragam hingga ke bagian inti, sehingga dapat dipotong atau diiris tanpa mengalami kerusakan. Sebaliknya, batang hasil *sinter* belum menunjukkan kepadatan internal yang sebanding, sebagaimana terlihat pada Gambar 3.3 (Setyadi et al., 2022; Setyadi, Jujur, et al., 2024). Hal ini diperkuat dari gambar struktur mikronya, batang hasil ekstrusi memiliki struktumikro lebih kecil dan memanjang mengikuti arah deformasi (Gambar 3.4), sehingga ikatan antar partikel dan kekuatan meningkat secara signifikan (Gambar 3.5). Berbeda dengan hasil kompaksi hangat dan *sinter* yang ukuran butirnya besar mendekati ukuran serbuk Mg awal. Pada hasil sinter juga terlihat muncul pori (warna hitam).

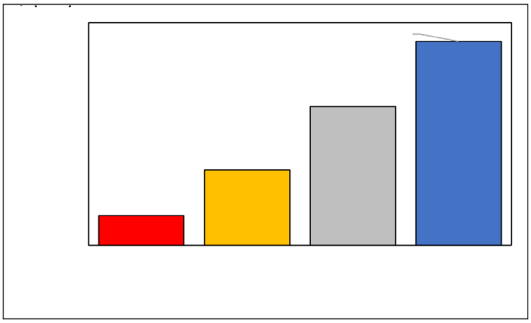


Gambar 3.4 Perbandingan Strukturmikro *Rod* Mg-5CAp Hasil Kompaksi Hangat, *Sinter* dan Ekstrusi (Setyadi et al., 2024)

Peningkatan rasio ekstrusi hingga R = 12 menghasilkan peningkatan kekuatan tarik maksimum hingga mencapai 165 MPa (Gambar 3.6).

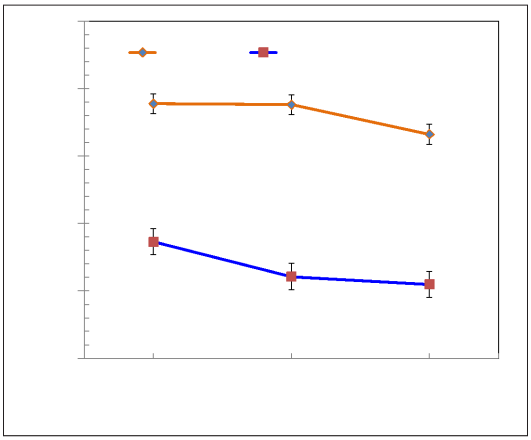


Gambar 3.5 Kekuatan Tekan Mg-CAp Hasil Kompaksi Hangat (WC), *Sinter* (CS) dan Ekstrusi (R1,44) (Setyadi, Jujur, et al., 2024) .



Gambar 3.6 Kekuatan Tarik Maksimum (UTS) *Rod* Hasil Ekstrusi Dengan Rasio Ekstrusi 1,44; 4; 9 dan 12 untuk Mg-5CAp.

Temuan ini menunjukkan bahwa proses ekstrusi merupakan strategi yang efektif untuk meningkatkan kekuatan mekanik komposit Mg–CAp tanpa menghilangkan karakter bioaktif CAp. Oleh karena itu, metode ekstrusi dipilih sebagai jalur utama penguatan material dalam penelitian ini.



Gambar 3.7 Perbandingan Laju Korosi (Degradasi) *Rod* Mg-5CAp dan Mg murni Hasil Kompakasi Hangat (WC), *Sintering* (Sint) dan Ekstrusi (Extr) R 1,44 (Setyadi et al., 2024).

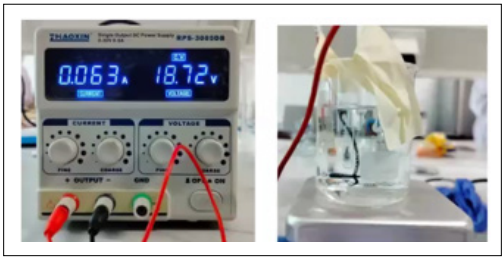
Proses ekstrusi juga dapat menekan laju degradasi. Pada rasio ekstrusi (Extr) R = 1,44, laju degradasi komposit Mg–5CAp dapat diturunkan hingga sekitar 4,4 mm per tahun, lebih rendah dibandingkan kondisi kompaksi hangat (WC) maupun *sintering* (Sint) (Gambar 3.7). Akan tetapi, meskipun proses ekstrusi terjadi peningkatan kekuatan dan penurunan degradasi, laju degradasi sekitar 4,4 mm/tahun tersebut masih jauh di atas kisaran 0,2–0,5 mm/tahun yang telah dilaporkan sebagai rentang degradasi yang diharapkan untuk mempertahankan fungsi mekanik selama proses penyembuhan (Gao et al., 2021; Z. Wang et al., 2022). Oleh karena itu tahap berikutnya diarahkan pada rekayasa permukaan untuk mengendalikan degradasi lebih lanjut.

C. Rekayasa Permukaan dan Pengendalian Degradasi

Meskipun proses ekstrusi mampu meningkatkan kekuatan mekanik komposit Mg–CAp secara signifikan dan menurunkan laju degradasi,

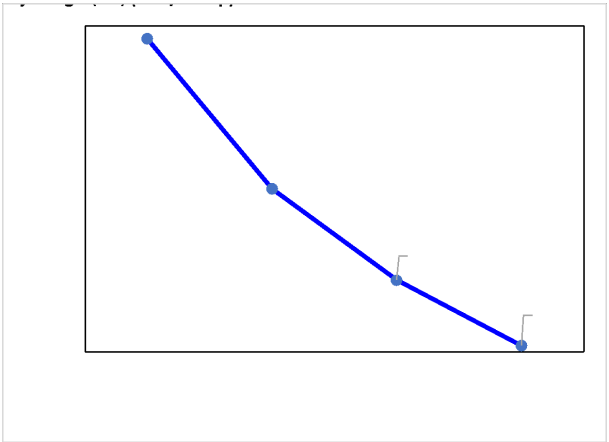
akan tetapi laju degradasinya masih belum sepenuhnya ideal untuk implan tulang *biodegradable*. Oleh karena itu, dilakukan pengembangan rekayasa permukaan untuk mengendalikan proses degradasi material.

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah proses *anodizing* yang dikombinasikan dengan *sealing* (Gambar 3.8) untuk membentuk lapisan oksida protektif pada permukaan material. Lapisan ini berfungsi sebagai penghalang awal terhadap reaksi korosi magnesium dalam lingkungan fisiologis dan merupakan salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk meningkatkan *corrosion resistance* dan mempertahankan integritas mekanik Mg (Negahban et al., 2024).



Gambar 3.8 Proses *Anodizing & Sealing* Mg-CAp

Hasil penelitian menunjukkan (Gambar 3.9) bahwa perlakuan *anodizing* pada kondisi 10 V selama 15 menit mampu menurunkan laju degradasi komposit Mg–5CAp hingga mendekati 1 mm per tahun (Bano et al., 2026; Setyadi, Bano, et al., 2025). Dari hasil penelitian yang sedang berjalan dan tahap publikasi, Ketika *anodizing* dikombinasikan dengan proses *sealing*, laju degradasi dapat diturunkan hingga di bawah 0,2 mm/tahun, dimana nilainya mendekati atau bahkan lebih rendah daripada kisaran 0,2–0,5 mm/tahun untuk proses penyembuhan tulang.



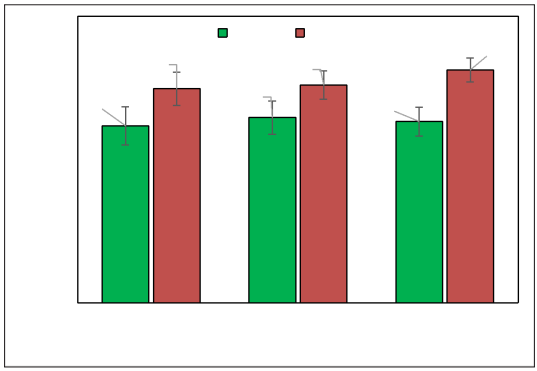
Gambar 3.9 Grafik Laju Degradasi *Rod* Mg-5CAp Hasil *Sinter*, Ekstrusi (Ekstr NA), Ekstrusi+*Anodizing* (Ekstr+A) dan Ekstrusi+*Anodizing*+*Sealing* 60' (Ekstr+A+S (60'))

Untuk meningkatkan stabilitas lapisan pelindung sekaligus memperbaiki interaksi biologis permukaan material, ke depan pengembangan rekayasa permukaan direncanakan melalui optimasi *anodizing* dan *sealing*, serta menggunakan metode lain yang sesuai seperti *plasma electrolytic oxidation* (PEO).

D. Uji Biokompatibilitas

Pengendalian degradasi harus diikuti dengan pembuktian bahwa material dan produk degradasinya dapat diterima oleh jaringan biologis. Pendekatan yang dilakukan melalui pengujian biokompatibilitas untuk memastikan keamanan material sebelum dikembangkan lebih lanjut sebagai implan medis. Pengujian dilakukan secara *in-vitro* melalui evaluasi viabilitas sel dan secara *in-vivo* menggunakan model *Sprague Dawley*.

Uji *in-vitro* komposit Mg–CAp menunjukkan tingkat viabilitas sel yang baik dengan nilai di atas 75% yang mengindikasikan respons sel yang baik dan tidak menunjukkan indikasi sitotoksisitas yang bermakna pada kondisi pengujian (Gambar 3.10). Hasil ini mengindikasikan bahwa keberadaan CAp dalam komposit tidak hanya berperan sebagai penguat mekanik tetapi juga mendukung respons biologis material.



Gambar 3.10 Hasil Uji *In-Vitro* Mg-CAp



Gambar 3.11 Pengujian *In-Vivo* Mg-CAp Pada Mencit *Sprague Dawley* (Kamal et al., 2025)

Selain itu, uji *in-vivo* awal telah dilakukan menggunakan hewan model mencit *Sprague Dawley* bekerja sama dengan Fakultas Kedokteran Universitas Indonesia (Gambar 3.11). Hasil pengujian menunjukkan bahwa komposit Mg–CAp memberikan respons biologis yang baik tanpa menunjukkan tanda reaksi inflamasi yang signifikan (Kamal et al., 2025).

Temuan ini memperkuat potensi komposit Mg–CAp sebagai material implan *biodegradable*. Namun demikian, validasi biologis masih terbatas pada model hewan kecil dan periode pengamatan tertentu. Hubungan antara laju degradasi, evolusi hidrogen, perubahan sifat mekanik dan proses penyembuhan tulang jangka panjang juga masih perlu dibuktikan. Untuk itu tahap berikutnya perlu validasi menggunakan model hewan yang lebih besar dan lebih mendekati kondisi klinis.

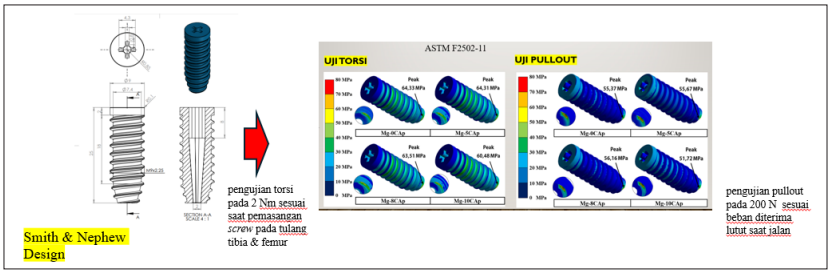
E. Desain, Simulasi Komputasi dan Prototipe Implan *Screw Ligament*

Keberhasilan material belum cukup tanpa pembuktian bahwa material dapat diwujudkan menjadi implan yang memenuhi kebutuhan klinis. Berdasarkan masukan dokter ortopedi mitra dari FK-UNUD, Mg–CAp dikembangkan menjadi *interference screw* (IFS) untuk rekonstruksi *anterior cruciate ligament* (ACL) lutut. IFS berfungsi menambatkan ligamen cangkok pada tulang untuk mengembalikan kestabilan lutut akibat cedera atau putusnya ACL, yang dapat terjadi pada atlet maupun masyarakat umum.

Untuk memastikan ketahanan desain *interference screw*, dilakukan analisis elemen hingga (FEA) terhadap kondisi torsi pemasangan dan gaya *pull-out* (Gambar 3.12). Hasil simulasi menunjukkan bahwa komposit Mg–5 dan Mg–8% berat CAp hasil ekstrusi mampu memenuhi torsi pemasangan 2 Nm dan gaya *pull-out*

hingga 200 N, dengan faktor keamanan yang memadai (Setyadi, Subagyo, et al., 2025).

Berdasarkan hasil simulasi tersebut, telah dilakukan pemesinan prototipe awal *interference screw* menggunakan batang Mg–5CAp hasil ekstrusi (Gambar 3.13) bersama mitra industri PT. Pudak *Scientific*. Hasil pemesinan menunjukkan bahwa material memiliki kemampuan pemesinan (machinability) yang baik.



Gambar 3.12 Model dan Simulasi *Finite Element Analysis* Mg-CAp untuk *Interference Screw (IFS)* Ligamen (Setyadi et al., 2025)



Gambar 3.13 Hasil Pemesinan Prototipe Awal *Interference Screw (IFS)* Ligamen berbahan Mg-5CAp

Hasil FEA masih merupakan validasi komputasi dan belum sepenuhnya menggantikan pengujian mekanik eksperimental pada tulang tiruan maupun tulang biologis. Tahap selanjutnya akan dilakukan uji kinerja pembebanan (torsi dan *pull-out*) pada tulang tiruan guna melihat kesesuaiannya dengan hasil simulasi. Kemudian dilanjutkan

validasi praklinis untuk mengevaluasi degradasi, respons jaringan dan integritas mekanik selama penyembuhan.

F. *Positioning* Capaian, Keterbatasan, dan *Roadmap* Pengembangan Mg–CAp

Rangkaian penelitian menunjukkan bahwa pengembangan Mg–CAp telah berkembang dari formulasi material menuju kandidat implan fungsional. Capaian utama meliputi optimasi komposisi, peningkatan kepadatan dan kekuatan melalui ekstrusi, pengendalian degradasi melalui *anodizing–sealing*, pembuktian biokompatibilitas *in-vitro* dan *in-vivo*, validasi biomekanik melalui FEA, serta pembuatan prototipe *interference screw* seperti yang ditunjukkan Gambar 3.14.

Secara internasional, teknologi magnesium *biodegradable* telah mencapai tahap praklinis, klinis, hingga komersial seperti produk MAGNEZIX dan K-MAT (Aikin et al., 2025; J. L. Wang et al., 2020). Dalam posisi tersebut, Mg–CAp telah melampaui tahap pengembangan material dasar, tetapi masih menuju kesiapan praklinis. Kesenjangan utama terletak pada validasi mekanik eksperimental, pengendalian degradasi dan evolusi hidrogen, validasi jangka panjang, pengujian pada hewan yang lebih besar, serta konsistensi proses dan pemenuhan persyaratan regulatori.

Karena itu, *roadmap* pengembangan disusun secara bertahap, dimulai dari optimasi material dan proses, dilanjutkan dengan pengendalian degradasi dan validasi prototipe, kemudian menuju uji praklinis dan uji klinis. Tahapan selanjutnya mencakup pemenuhan persyaratan regulatori, penguatan proses manufaktur, hingga pada akhirnya menuju komersialisasi. Dalam waktu terdekat, fokus pengembangan diarahkan pada validasi kemampuan *interference screw* dalam menahan torsi dan beban *pull-out*, serta optimasi proses *anodizing–sealing* dan pengembangan pelapisan lain yang sesuai. Tahap ini selanjutnya akan diperkuat melalui uji praklinis untuk

memperoleh pemahaman yang lebih utuh mengenai hubungan antara laju degradasi, kekuatan mekanik, respons biologis, dan proses penyembuhan tulang.

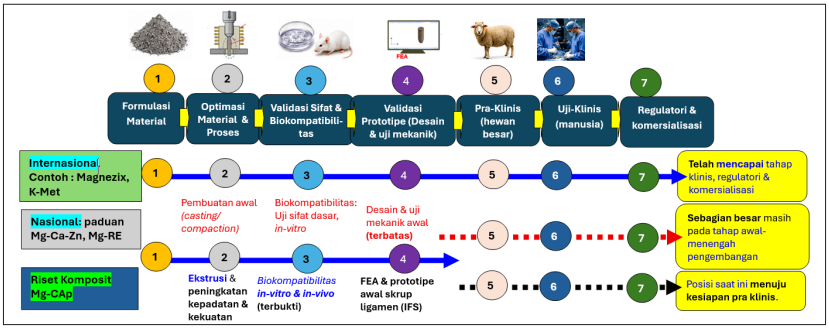
Dengan demikian, pengembangan Mg–CAp tidak lagi hanya berfokus pada material, tetapi pada integrasi material, proses, permukaan, biologi, dan desain implan untuk membawa hasil penelitian menuju kandidat implan yang siap divalidasi secara praklinis dan selanjutnya dikembangkan menuju aplikasi klinis.

Rangkuman temuan pengembangan komposit Mg–CAp dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Rangkuman Temuan Pengembangan Komposit Mg–CAp untuk Aplikasi Implan Tulang Traumatik *Biodegradable*

Tahap Penelitian	Pendekatan	Temuan Utama	Implikasi
Formulasi komposit	*Milling* + *Warm compaction*	Komposisi Mg–5CAp menunjukkan keseimbangan terbaik antara kekerasan dan stabilitas struktur	Menjadi komposisi dasar pengembangan selanjutnya
Sintering	*Furnace* dan SPS	Densitas meningkat tetapi masih terdapat porositas dan ketidakstabilan karbonat	Membutuhkan metode penguatan lain
Ekstrusi (R1,44)	*Deformation strengthening*	Struktur lebih padat, kekuatan meningkat signifikan, degradasi menurun	Menjadi metode pemadatan utama

Tahap Penelitian	Pendekatan	Temuan Utama	Implikasi
Ekstrusi rasio tinggi	R = 9 – 12	Kekuatan tarik mencapai ±165 MPa	Mendekati kebutuhan mekanik implan
Rekayasa permukaan	*Anodizing* + *sealing*	Laju degradasi turun menjadi <0.2 mm/th	Masuk rentang standar
Uji bio-kompatibilitas	*In vitro* & *in vivo*	Viabilitas sel >75% dan respons biologis baik	Menunjukkan keamanan biologis
Desain implan	FEA *simulation*	Memenuhi torsi pemasangan 2 Nm dan pull-out 200 N	Layak dikembangkan sebagai prototipe
Prototipe	*Machining rod* Mg–5CAp	Prototipe *interference screw* berhasil dibuat	Siap menuju uji kinerja



Gambar 3.14. Ilustrasi *Positioning* Perkembangan Riset Mg-CAp Terhadap Riset Mg *Biodegradable* Nasional dan Internasional untuk Implan Tulang

BAB IV. IMPLIKASI STRATEGIS PENGEMBANGAN IMPLAN TULANG TRAUMATIK TERHADAP KEUNGGULAN INSTITUSI RISET

A. Kontribusi Ilmiah

State of the art menunjukkan bahwa penelitian magnesium *biodegradable* telah berkembang dari pengembangan material menuju validasi biologis dan aplikasi klinis. Di Indonesia, penelitian masih dominan pada pengembangan material dan sifat mekanik, sedangkan integrasi material, pengendalian degradasi, validasi biologis, dan desain implan masih terbatas.

Pengembangan komposit Mg–CAp *biodegradable* untuk implan tulang traumatik telah mengisi kesenjangan tersebut, dimana kontribusi utamanya adalah:

1. Mg–5CAp sebagai temuan baru, berupa formulasi komposit Mg–CAp yang dioptimalkan untuk kandidat implan *biodegradable*.
2. Proses ekstrusi sebagai peningkatan teknologi, dengan meningkatkan kepadatan dan sifat mekanik komposit.
3. Modifikasi permukaan dengan anodisasi dan *sealing* sebagai peningkatan pengendalian degradasi, untuk memperlambat laju degradasi Mg–CAp.
4. Validasi biologis, melalui pengujian *in-vitro* dan *in-vivo* yang menunjukkan potensi biokompatibilitas dan biodegradabilitas.
5. Perekayasaan *interference screw* (IFS), melalui integrasi Mg–5CAp dengan desain, FEA, dan pembuatan prototipe.

Dengan demikian, kebaruan penelitian bukan pada penggunaan Mg, CAp, ekstrusi, atau anodisasi secara individual, melainkan pada pengembangan dan integrasi sistem Mg–CAp melalui rekayasa komposisi, proses, permukaan, validasi biologis, dan penerapannya sebagai kandidat IFS.

B. Sintesis Kontribusi Ilmiah

Pada Tabel 4.1 berikut dapat dilihat rangkuman semua hasil penelitian pengembangan Mg-CAp berdasarkan tingkat kontribusi dan posisi penelitiannya.

Tabel 4.1 Rangkuman Semua Hasil Penelitian Pengembangan Mg-CAp Berdasarkan Tingkat Kontribusi Dan Posisi Penlitiannya.

Komponen penelitian	Bentuk kontribusi	Makna
Mg–5CAp	New finding	Identifikasi komposisi Mg–CAp yang memberikan keseimbangan sifat untuk pengembangan implan
Ekstrusi Mg–CAp	Improvement	Meningkatkan densifikasi, integritas struktur dan kekuatan material
Anodizing–sealing	Improvement	Meningkatkan pengendalian degradasi Mg–CAp
Biokompatibilitas *in-vitro/in-vivo*	Scientific validation	Membuktikan respons biologis material sebagai dasar pengembangan implan
FEA Mg–CAp–IFS	Engineering development	Mentransformasikan karakteristik material menjadi desain implan dengan persyaratan mekanik tertentu
Prototipe Mg–5CAp IFS	Application development	Membuktikan kemampuan material untuk diwujudkan menjadi kandidat implan fungsional

C. Kontribusi Personal dan Karya Landmark

Dalam keseluruhan rangkaian penelitian tersebut, kontribusi penulis terletak pada penggagasan, pengembangan, dan pengintegrasian pendekatan material, proses, permukaan, biologi, dan desain dalam membangun sistem implan Mg–CAp. Kontribusi ini mencakup formulasi material, optimasi proses manufaktur, rekayasa permukaan untuk mengendalikan degradasi, koordinasi pengujian biologis, serta perancangan *interference screw* (IFS) dan pengembangan purwarupa menuju aplikasi implan tulang traumatik.

Dua publikasi pada tahun 2025 menjadi karya *landmark* yang menandai perkembangan penelitian dari pengembangan material menuju kandidat implan. Publikasi di *Scientific Reports* memberikan bukti mengenai biodegradabilitas dan biokompatibilitas Mg–CAp melalui pengujian *in-vivo*. Sementara itu, publikasi di *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures* memperkuat aspek biomekanik dan desain implan melalui pendekatan *Finite Element Analysis* (FEA). Kedua karya tersebut menunjukkan kesinambungan penelitian, mulai dari pengembangan material, pembuktian respons biologis, validasi biomekanik, hingga pengembangan prototipe sebagai langkah menuju aplikasi implan.

D. Implikasi Strategis terhadap Institusi Riset

Capaian riset Mg–CAp memberikan dampak strategis dalam memperkuat keunggulan institusi riset pada bidang biomaterial dan implan *biodegradable*. Integrasi riset material, proses manufaktur, rekayasa permukaan, hingga desain implan menunjukkan kapasitas institusi dalam menghasilkan inovasi dari hulu ke hilir.

Kontribusi ilmiah yang dihasilkan berupa publikasi internasional bereputasi, prosiding terindeks, serta jejaring kolaborasi multidisiplin memperkuat visibilitas dan posisi institusi pada tingkat global. Di sisi

lain, capaian teknologi berupa material unggul, metode ekstrusi, rekayasa *anodizing–sealing*, serta prototipe implan menjadi basis penting untuk hilirisasi dan pengembangan produk implan nasional.

BAB V. PELUANG DAN STRATEGI PENGEMBANGAN IMPLAN TULANG TRAUMATIK NASIONAL

Pengembangan implan *biodegradable* berbasis komposit magnesium–*carbonate apatite* (Mg–CAp) tidak hanya menghasilkan kandidat material untuk implan tulang traumatik, tetapi juga membangun kapabilitas teknologi dalam pengembangan material, proses, dan manufaktur alat kesehatan. Rangkaian penelitian yang mencakup formulasi material, *powder processing*, pemadatan (densifikasi), ekstrusi, rekayasa permukaan, karakterisasi, desain, simulasi, hingga pembuatan prototipe menunjukkan terbentuknya rantai penguasaan teknologi yang dapat dikembangkan untuk berbagai perangkat medis berbasis logam *biodegradable*.

A. Kontribusi dan Implikasi

Kontribusi utama penelitian ini adalah terbentuknya pengetahuan dan teknologi yang mengintegrasikan komposisi material, proses pengolahan, struktur, sifat mekanik, degradasi, respons biologis, hingga desain dan pengembangan purwarupa implan. Pengembangan komposit Mg–CAp, optimasi proses ekstrusi, serta rekayasa permukaan melalui *anodizing* dan *sealing* menjadi bagian penting dalam membangun pemahaman mengenai hubungan antara proses, struktur, dan kinerja material. Pengetahuan tersebut menjadi dasar untuk mengendalikan karakteristik dan kinerja Mg–CAp agar dapat disesuaikan dengan kebutuhan implan tulang traumatik.

Penguasaan rantai teknologi tersebut membentuk platform teknologi yang tidak terbatas pada *interference screw*, tetapi berpotensi dikembangkan menjadi sekrup, *plate*, *pin*, *staple*, dan perangkat fiksasi tulang *biodegradable* lainnya. Dalam perspektif nasional, penguasaan

teknologi ini menjadi fondasi bagi penguatan kemampuan manufaktur alat kesehatan. Substitusi impor, peningkatan TKDN, dan kemandirian produk merupakan dampak lanjutan dari penguasaan teknologi.

Dari sisi layanan kesehatan, implan *biodegradable* berpotensi mengurangi kebutuhan operasi lanjutan untuk pengambilan implan permanen dan dengan demikian dapat meningkatkan efisiensi pelayanan serta pembiayaan kesehatan. Dalam konteks Jaminan Kesehatan Nasional (JKN), potensi tersebut dapat berkontribusi pada efisiensi pembiayaan pelayanan apabila manfaat klinis dan keekonomiannya telah dibuktikan melalui uji klinis dan evaluasi teknologi kesehatan. Dengan demikian, manfaat bagi JKN merupakan implikasi hilir dari keberhasilan pengembangan dan validasi teknologi, bukan klaim yang mendahului pembuktian klinis.

B. Strategi Pengembangan

Pengembangan selanjutnya diarahkan dari kapabilitas riset menuju teknologi yang siap ditranslasikan. Tahap awal difokuskan pada penyempurnaan komposisi material, proses ekstrusi, desain implan, dan rekayasa permukaan untuk memperoleh keseimbangan antara kekuatan mekanik, laju degradasi, dan respons biologis.

Tahap berikutnya mencakup validasi praklinis yang lebih komprehensif, meliputi ketahanan mekanik selama degradasi, biokompatibilitas, respons jaringan, serta uji pada hewan besar. Evaluasi biokompatibilitas perlu mengacu pada ISO 10993 dan standar terkait agar keamanan material dapat dinilai secara sistematis.

Secara paralel, kemampuan manufaktur perlu ditingkatkan melalui *scale-up*, pengendalian mutu bahan baku, standardisasi proses, sterilisasi, serta penerapan *Good Manufacturing Practice* (GMP). Integrasi *additive manufacturing* juga perlu dikembangkan untuk menghasilkan implan dengan geometri yang lebih presisi dan dapat disesuaikan dengan anatomi pasien.

Tahap translasi selanjutnya mencakup penyusunan dokumentasi teknis, pemenuhan persyaratan mutu dan keselamatan, evaluasi BPOM sesuai ketentuan yang berlaku, perizinan alat kesehatan nasional, serta penggunaan SNI atau standar/rujukan internasional yang relevan. Setelah memenuhi persyaratan praklinis dan regulasi, pengembangan dilanjutkan menuju uji klinis dan evaluasi teknologi kesehatan, termasuk aspek keamanan, efektivitas, dan keekonomian dalam konteks JKN.

Seluruh tahapan memerlukan kolaborasi antara periset, perguruan tinggi, klinisi, rumah sakit, industri, dan pemerintah. Dengan demikian, Mg–CAp diharapkan berkembang dari hasil riset menjadi platform teknologi implan *biodegradable* dengan basis ilmiah, kemampuan manufaktur, dan jalur translasi yang jelas. Pada akhirnya, penguasaan teknologi tersebut dapat mendukung penguatan industri alat kesehatan, peningkatan TKDN, substitusi impor, efisiensi pelayanan kesehatan, dan ketahanan teknologi kesehatan nasional.

BAB VI. KESIMPULAN

Rangkaian penelitian komposit Mg–CAp *biodegradable* berangkat dari tantangan bagaimana menghasilkan implan tulang traumatik yang cukup kuat untuk menjalankan fungsinya, tetapi dapat terdegradasi secara terkendali setelah tulang sembuh. Penelitian ini menunjukkan bahwa tantangan tersebut tidak dapat diselesaikan hanya dengan memilih material yang tepat, tetapi memerlukan keterpaduan antara komposisi material, proses, sifat mekanik, degradasi, respons biologis, dan desain implan.

Pengembangan Mg–CAp menunjukkan bahwa penambahan *carbonate apatite* lokal, pengendalian proses melalui ekstrusi, serta rekayasa permukaan dengan *anodizing* dan *sealing* dapat digunakan untuk mengatur sifat material. Pendekatan ini memungkinkan kekuatan, stabilitas, laju degradasi, dan bioaktivitas disesuaikan dengan kebutuhan implan. Dengan demikian, kinerja magnesium *biodegradable* tidak hanya diterima sebagai sifat bawaan material, tetapi dapat direkayasa dan dikendalikan.

Pemahaman tersebut kemudian diperkuat melalui pengujian biologis dan simulasi, serta diterapkan pada pengembangan *interference screw*. Tahapan ini menunjukkan bahwa pengetahuan yang diperoleh dari tingkat material dapat diterjemahkan menjadi rancangan implan yang mempertimbangkan kebutuhan mekanik dan biologis.

Kontribusi ilmiah utama penelitian ini terhadap bidang logam *biodegradable* adalah pemahaman bahwa keberhasilan implan magnesium ditentukan oleh keterkaitan antara komposisi, proses, struktur, sifat, degradasi, respons biologis, hingga desain implan. Dalam kerangka tersebut, degradasi bukan lagi semata-mata kelemahan magnesium, tetapi menjadi karakteristik yang perlu dikendalikan agar sejalan dengan fungsi mekanik dan proses penyembuhan tulang.

Sebanyak 13 publikasi dan 1 paten terdaftar yang dihasilkan menjadi bagian dari kesinambungan pengetahuan tersebut dan menjadi fondasi untuk tahapan berikutnya menuju validasi praklinis, manufaktur, regulasi, uji klinis, dan hilirisasi. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya meninggalkan kandidat material Mg–CAp, tetapi juga kerangka keilmuan dan rekayasa untuk mengembangkan logam *biodegradable* yang mampu menjalankan fungsinya dan terdegradasi secara terkendali sesuai kebutuhan tubuh.

BAB VII. PENUTUP

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

Rangkaian penelitian komposit magnesium–*carbonate apatite* (Mg–CAp) telah menunjukkan terbangunnya fondasi ilmiah dan teknologi sebagai kandidat implan tulang *biodegradable*. Tahap yang telah dicapai meliputi pengembangan material, proses ekstrusi, rekayasa permukaan, pengujian mekanik dan biologis, serta desain dan simulasi serta prototipe awal *interference screw*. Capaian ini menempatkan teknologi pada tahap prototipe dan validasi awal.

Perjalanan menuju aplikasi klinis masih memerlukan pembuktian ketahanan implan selama degradasi, keamanan dan efektivitas jangka panjang, serta konsistensi manufaktur. Karena itu, tahap yang sedang dilakukan difokuskan pada penyempurnaan material, proses, permukaan, dan desain, serta penguatan validasi mekanik dan biologis.

Tahap berikutnya diarahkan pada uji praklinis hewan model besar dan uji klinis untuk memastikan keamanan dan efektivitas. Sejalan dengan itu, perlu dipenuhi ISO 10993, penerapan *Good Manufacturing Practice* (GMP), serta persyaratan evaluasi dan perizinan alat kesehatan nasional dengan mengacu pada SNI atau standar internasional yang relevan. Ke depan integrasi *additive manufacturing* dikembangkan untuk menghasilkan implan yang lebih presisi dan sesuai anatomi pasien.

Selanjutnya, teknologi diarahkan menuju produksi skala percontohan, transfer teknologi, dan komersialisasi melalui sinergi lembaga riset, perguruan tinggi, klinisi, rumah sakit, industri, dan pemerintah.

Dengan demikian, perjalanan pengembangan Mg–CAp tidak berhenti pada penguasaan ilmu dan material, tetapi terus diarahkan menuju pengembangan prototipe, pengujian praklinis, validasi klinis dan pemenuhan regulasi, hingga kesiapan produksi dan komersialisasi. Pada akhirnya, pengembangan ini diharapkan tidak hanya menghasilkan kandidat implan, tetapi juga membangun kapabilitas teknologi logam *biodegradable* yang mencakup penguasaan material, proses, desain, dan validasinya hingga menjadi produk yang aman, efektif, dan bermanfaat bagi kesehatan masyarakat. Kapabilitas tersebut diharapkan dapat menjadi bagian dari penguatan teknologi kesehatan nasional dan mengurangi ketergantungan pada teknologi serta produk implan dari luar negeri.

UCAPAN TERIMA KASIH

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

Pada kesempatan yang berbahagia ini, perkenankan saya memanjatkan puji dan syukur kehadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas rahmat dan karunia-Nya sehingga orasi ilmiah ini dapat saya sampaikan dengan baik.

Dengan segala kerendahan hati, saya menyampaikan penghargaan dan terima kasih kepada Presiden Republik Indonesia, Bapak Prabowo Subianto dan Presiden ke-7 Republik Indonesia, Bapak Joko Widodo, atas kepercayaan yang diberikan kepada saya sebagai Peneliti Ahli Utama.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Kepala dan Wakil Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional, Prof. Dr. Arif Satria, S.P., M.Si., dan Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian, M.Sc., atas dukungan dan kepercayaan dalam pengembangan karier kepakaran saya sebagai peneliti. Terima kasih juga kepada Ketua dan Sekretaris Majelis Pengukuhan Profesor Riset (MPPR) Prof. Ir. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar MSCE., Ph.D., Prof. Dr. Ir. Zainal Arifin, M.Sc., serta tim penelaah naskah orasi ilmiah, yaitu Prof. Dr. Nurul Taufiqu Rochman, M.Eng., Prof. Dr.Ing. Andika Widya Pramono, M.Sc., Prof. Dr. Jarot Raharjo, S.T., M.Sc., dan Prof. Dr. Wisnu Ari Adi serta Prof. Sugeng Supriadi, S.T., M.S.Eng., Ph.D. atas masukan dan penyempurnaan naskah orasi ini.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Kepala Organisasi Riset Nanoteknologi dan Material Prof. Dr. Ratno Nuryadi, M.Eng., juga kepada Sekretaris Utama Ibu Nur Tri Aries Suestiningtyas, S.IP., M.A., Kepala Biro Organisasi dan Sumber Daya Manusia Ibu Ratih

Retno Wulandari, S.Sos., M.Si., dan Kepala Pusat Riset Komposit dan Biomaterial Bapak Dr. Nendar Herdianto, S.Si., M.Si. atas dukungan administratif, kebijakan, dan fasilitasi yang sangat berarti dalam proses pengukuhan ini.

Penghargaan dan rasa hormat saya sampaikan kepada para pembimbing akademik saya, yaitu Bapak Ir. Wahid Suherman, Prof. Dedi Priadi, Prof. Eddy S. Siradj, Prof. Bambang Suharno, Prof. Sugeng Supriadi, Prof. Achmad Fauzi Kamal, dan Bapak Dr. Rahyussalim, serta seluruh guru dan dosen yang telah mendidik dan membimbing saya sejak pendidikan dasar hingga perguruan tinggi.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada Bapak Dr. Laksana Tri Handoko dan Prof. Dr. I Nyoman Jujur serta seluruh rekan di Pusat Riset Komposit dan Biomaterial, khususnya Kelompok Riset Biomaterial Tulang dan Gigi, atas kebersamaan dan dukungan dalam kegiatan riset dan perekayasaan biomaterial *biodegradable* berbasis magnesium. Terima kasih pula kepada Direktur PT. Pudak Scientific, Stanley Wangsanegara serta CEO PT. Zenith Allmart Precisindo, Allan Changrawinata dan tim atas dukungan dalam pengembangan dan proses menuju hilirisasi implan tulang traumatik berbasis Mg–CAp.

Secara khusus, terima kasih dan penghormatan setinggi-tingginya saya sampaikan kepada kedua orang tua saya, Ir. H. Nurmawan dan Hj. Erniwati, serta mertua saya H. Asrar Arifin dan Hj. Afrida. Kepada istri tercinta, Leni Devera Asrar, MT. serta keluarga besar saya, anak, mantu dan cucu drg. Nada Rania, drg. Sulthan Farhan Athallah, drg. Dion Wahyuwiguna, dan Yislam Arash Wiguna, saya haturkan terima kasih atas doa, dukungan, dan kasih sayang yang menyertai perjalanan saya.

Akhir kata, saya menyadari bahwa orasi ini masih memiliki keterbatasan. Untuk itu, saya memohon maaf atas segala kekurangan dalam penyampaian orasi ini. Semoga Allah Subhanahu Wa Ta'ala senantiasa melimpahkan rahmat dan keberkahan kepada kita semua. Terima kasih.

DAFTAR PUSTAKA

Adhitya, K., Mustika, T., Manawan, M., Ulfah, I. M., Hanafi, R., **Setyadi, I.**, Suryadi, Hidayat, A., Wibisono, M., Sah, J., Alam, G. W., Harahap, M. E., Sulaikan, H. P., Suhendra, N., & Jujur, I. N. (2024). Optimizing surface properties in pure titanium for dental implants: a crystallographic analysis of sandblasting and acid-etching techniques. *Powder Diffraction*, *39*(4), 206–216. https://doi.org/10.1017/S0885715624000320

Aikin, M., Shalomeev, V., Kukhar, V., Kostryzhev, A., Kuziev, I., Kulynych, V., Dykha, O., Dytyniuk, V., Shapoval, O., Zagorskis, A., Burko, V., Khliestova, O., Titov, V., & Hrushko, O. (2025). Recent Advances in Biodegradable Magnesium Alloys for Medical Implants: Evolution, Innovations, and Clinical Translation. *Crystals*, *15*(8). https://doi.org/10.3390/cryst15080671

Annur, D., Lestari, F. P., Erryani, A., Amal, M. I., Sitorus, L. S., & Kartika, I. (2016). Struktur Mikro, Sifat Mekanik, Dan Ketahanan Korosi Paduan Mg-Zn-Ca Yang Dihasilkan Melalui Proses Metalurgi Serbuk [Microstructure, Mechanical And Corrosion Properties of Mg-Zn-Ca Alloy via Powder Metallurgy]. *Jurnal Metalurgi*, *31*(3), 130–137.

Bano, A. K., Rupiasih, N. N., **Setyadi, I.**, & Wibisono, M. (2026). *Analisis Sifat Korosif Komposit Magnesium Biodegradabel Tulang The Corrosive Properties Analysis of Biodegradable for Bone Implant Applications*. *27*(1), 65–70.

Chen, L., & Yao, Y. (2014). Processing, microstructures, and mechanical properties of magnesium matrix composites: A review. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, *27*(5), 762–774. https://doi.org/10.1007/s40195-014-0161-0

Damisih, D., Hanafi, R., Gumelar, M. D., Sah, J., Rahmania, A. W., Gustiono, D., Nurlina, N., Arrifqi, M. H., **Setyadi, I.**, Triwibowo, B., Kozin, M., & Jujur, I. N. (2023). Pullout strength evaluation

of titanium pedicle screw in different grades of polyurethane. *AIP Conference Proceedings*, *2719*(December 2019). https://doi.org/10.1063/5.0133309

Darmayanti, N. T. E., Jujur, I. N., Anggraeni, P., & **Setyadi, I.** (2024). An initial review of magnesium carbonate apatite for biodegradable material bone implant using VOSviewer application. *AIP Conference Proceedings*, *3003*(1). https://doi.org/10.1063/5.0186675

del Campo, R., Savoini, B., Muñoz, A., Monge, M. A., & Garcés, G. (2014). Mechanical properties and corrosion behavior of Mg–HAP composites. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, *39*, 238–246. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2014.07.014

Dwiyati, S. T., Kiswanto, G., & Supriadi, S. (2025). Development of a room-temperature microforming process applied to pure magnesium treated by annealing in bioabsorbable miniplate implant applications. *Results in Engineering*, 107051.

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), 12033.

Gao, J., Su, Y., & Qin, Y. X. (2021). Calcium phosphate coatings enhance biocompatibility and degradation resistance of magnesium alloy: Correlating in vitro and in vivo studies. *Bioactive Materials*, *6*(5), 1223–1229. https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.10.024

Harahap, M. E., Suhendra, N., Masmui, M., Habibie, S., Purwanti, H., Setiawan, H., Lukmana, L., Suryadi, S., & **Setyadi, I.** (2025). The effect of sintering temperature holding time on physical and mechanical behaviours of alumina ceramic prepared for total hip-joint arthroplasty application. *Advances in Materials and Processing Technologies*, *00*(00), 1–13. https://doi.org/10.1080/2374068X.2025.2474320

Hermanto, B., Desiati, R. D., Suhandi, A., **Setyadi, I.**, Putranto, A. M., Nuraini, L., Rohman, F., & Sudiro, T. (2025). High-temperature

oxidation of Fe-Mo-Si alloys prepared by spark plasma sintering technique. *Journal of Alloys and Compounds*, *1010*. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.178214

I Nyoman Jujur, Agus Hadi Wargadipura, Asep Riswoko, Allan Changgrawinata, Agustanhakri, Dwi Budiyanto, Hadi Priatno Sulaikan, Tika Mustika, Joni Sah, Damisih, Amilatin Rohmah; Herri Susanto; Seto Roseno; Wawas Swathatafijriah; Muslim Efendi Harahap, **Iwan Setyadi**, Mirza Wibisono, Suryadi. (2018). *Purification Method for Medical-Grade 316L Stainless Steel by Blowing Argon Gas into an Induction Furnace* (Patent No. IDP 000081235). Director General of Intellectual Property of the Republic of Indonesia.

Jujur, I. N., Sah, J., Agustanhakri, Triwibowo, B., Mustika, T., **Setyadi, I**., Damisih, Marchel, P., & Prajitno, D. H. (2024). The effect of aging temperature on hardness properties and corrosion resistance of casted Ti-6Al-4V ELI. *AIP Conference Proceedings*, *3003*(1). https://doi.org/10.1063/5.0186577

Kamal, A. F., Dionysios, E., Supriadi, S., **Setyadi, I.**, Juniantito, V., & Rahyussalim, A. J. (2025). Biodegradability and biocompatibility test of Magnesium Carbonate apatite composite implants fabricated by extrusion technique on Sprague Dawley Rats. *Scientific Reports*, *15*(1), 9976.

Luo, Y., Wang, J., Ong, M. T. Y., Yung, P. S., Wang, J., Qin, L., & others. (2022). Update on the research and development of magnesium-based biodegradable implants and their clinical translation in orthopaedics. Biomater. Transl. 2021; 2 (3): 188--96. *How to Cite This Article: Situt NV, Situt V. History and Recent Developments in Internal Plate Fixation of Fractures. J Bones Muscles Health*, *1*(1), 29–32.

Mohd Salaha, Z. F., Abdullah, N. N. A. A., Chan, K. F., Gan, H. S., Mohd Yusop, M. Z., & Ramlee, M. H. (2025). Biodegradable orthopaedic implants: A systematic review of in vitro and in vivo evaluations of magnesium, iron, and zinc alloys. *Results in Engineering*, *27*(June). https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105746

Mukarati, T. W., Ngwangwa, H. M., Mbohwa, C., Msomi, V., Sumbwanyambe, M., & Pandelani, T. (2026). Biodegradable magnesium implants: From material development to clinical translation. *Next Materials*, *11*(March). https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2026.101905

Negahban, A., Shamsi, M., & Sedighi, M. (2024). Advances in the modification of magnesium-based biomaterials to address corrosion and corrosion-fatigue: A review of developments and prospects. *Journal of Materials Research and Technology*, *30*(April), 4064–4108. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.038

Nilasari Novita Widianingsih, N. (2024). *Penerapan Terapi Relaksasi Nafas Dalam Untuk Menurunkan Itensitas Nyeri Pada Pasien Post Operasi Fraktur di Bangsal Bougenville RSUD Ibu Fatmawati Surakarta*. Universitas Kusuma Husada Surakarta.

Rahyussalim, A. J., Marsetio, A. F., Kamal, A. F., Supriadi, S., **Setyadi, I.**, Pribadi, P. M., Mubarok, W., & Kurniawati, T. (2021). Synthesis, Structural Characterization, Degradation Rate, and Biocompatibility of Magnesium-Carbonate Apatite (Mg-Co3Ap) Composite and Its Potential as Biodegradable Orthopaedic Implant Base Material. *Journal of Nanomaterials*, *2021*(1), 6615614.

Saudi, A. U., Azahra, S. A., Kozin, M., **Setyadi, I.**, & others. (2021). Kajian Sistematis External Fixation System. *Jurnal Inovasi Dan Teknologi Material*, *2*(2), 15–23.

Saudi, A. U., Wibisono, M., Azahra, S. A., Taqwatomo, G., Rianti, W., Damisih, D., Agustanhakri, A., Kozin, M., Suryadi, S., Jujur, I. N., **Setyadi, I.**, Wibowo B.T, Gumelar, M.D., Sah, J. & Suhendar, N. (2025). Effect of Solution Treatment on Mechanical and Corrosion Properties of Ti-6Al-7Nb Alloy in Biomedical Applications. *Key Engineering Materials*, *1015*, 41–49.

Saudi, A. U., Wibisono, M., Rianti, W., Triwibowo, B., Damisih, **Setyadi, I.**, Gustiono, D., Nurlina, Kozin, M., & Jujur, I. N. (2022). Evaluation of Ti-6Al-7Nb femoral stem fabricated by centrifugal investment casting using fatigue test. *AIP Conference Proceedings*, *2663*(September). https://doi.org/10.1063/5.0108289

Setiawan, S. H., Rahadi, R. A., & Sumirat, E. (2023). *Financial business feasibility of biomedical implant production using additive manufacturing process*. *7*, 2709–2714.

Setyadi, I., Bano, A. K., Rizky, A. S. N., Wibisono, M., Suryadi, Hidayat, A., Adhitya, K., Mustika, T., Harahap, M. E., Alam, G. W., Sah, J., Jujur, I. N., & Rupiasih, N. N. (2025). Study of the Effect of Anodizing Times on the Degradation Rate of Mg-5CAp Biodegradable Composites as Bone Implants. *Journal of Physics: Conference Series*, *2980*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/2980/1/012029

Setyadi, I., Jujur, I. N., Wibisono, M., Manawan, M., Adhitya, K., Hidayat, A., Kamal, A. F., Suharno, B., Supriadi, S., & others. (2024). Composite of Magnesium and Carbonate Apatite for Biodegradable Bone Implants: A Comparative Study on Sintering and Extrusion Techniques. *International Journal on Advanced Science, Engineering \& Information Technology*, *14*(1).

Setyadi, I., Marsetio, A. F., Kamal, A. F., Rahyussalim, A. J., Supriadi, S., & Suharno, B. (2020). Microstructure and microhardness of carbonate apatite particle-reinforced Mg composite consolidated by warm compaction for biodegradable implant application. *Materials Research Express*. https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab7d70

Setyadi, I., Pribadi, P. M., Marsetio, A. F., Kamal, A. F., Rahyussalim, A. J., Suharno, B., & Supriadi, S. (2020). Characteristics Investigation of the Initial Development of Miniplate Made from Composite of Magnesium/Carbonate Apatite Fabricated by Powder Metallurgy Method for Biodegradable Implant Applications. *Key Engineering Materials*, *833*, 194–198. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.833.194

Setyadi, I., Subagyo, Y., Ismail, R., Taqwatomo, G., Suryadi, S., Wibisono, M., Adhitya, K., Hidayat, A., Supriadi, S., & Jujur, I. N. (2025). Finite element analysis (FEA) study on the development of bioabsorbable magnesium-carbonate apatite (Mg-CAp)

composite as a candidate interference screw (IFS) material. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*.

Setyadi, I., Sudiro, T., Hermanto, B., Oktari, P. R., & FAUZI, A. (2022). Fabrication of Magnesium-Carbonate Apatite by Conventional Sintering and Spark Plasma Sintering for Orthopedic Implant Applications. *Sains Malaysiana*, *51*(3), 883–894.

Setyadi, I., Suryadi, S., Jujur, I. N., Harahap, M. E., Tiwibowo, B., Damisih, D., Suharno, B., & Supriadi, S. (2024). Observation of mechanical properties improvement of powder-based magnesium-carbonate apatite (Mg-10CA) through deformation strengthening process. *AIP Conference Proceedings*, *3003*(1).

Subagyo, Y., Priwintoko, B., Ismail, R., Fitriyana, D. F., Jujur, I. N., **Setyadi, I.**, & Taqwatomo, G. (2023). Development of magnesium biocomposites with hydroxyapatite or carbonate apatite reinforcement as implant candidates: A review. *Mechanical Engineering for Society and Industry*, *3*(3), 152–165.

Suryadi, **Iwan Setyadi**, I Nyoman Jujur, Joni Sah, Muslim Efendi Harahap, Tika Mustika, Giri Wahtu Alam, Krisna Adhitya, Arif Hidayat, Galih Taqwatomo, Mirza Wibisono, Achmad Fauzi Kamal, Sugeng Supriadi, & Rifky Ismail. (2026). *Integrated molding in the manufacture of metal rod and compositions thereof* (Patent No. P00202605592).

Susilowati, S. E., Latief, F. H., **Setyadi, I.**, Sumardiyanto, D., Suryadi, S., Jujur, I. N., & Wibisono, M. (2025). Influence of carbonate apatite (CAp) addition on Mg-5Al-3Sn composites for potential biodegradable implant applications: A study of powder metallurgy combined with hot extrusion. *Results in Engineering*, *25*(December 2024), 104502. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104502

Tika Mustika, Nyoman Jujur, Yasya Khalif Perdana Saleh, Giri Wahyu Alam, Arif Hidayat, Mirza Wibisono, Poki Agung Budiantoro, Syarifah Nova Amiza Zam, Rifky Ismail, **Iwan Setyadi**, Suryadi, Muslim Efendi Harahap, Joni Sah, Maykel T, Manawan (2026). *Structure of SS316L Mandibular Implant Produced via Bound*

Metal Deposition (Patent No. P00202604878). Director General of Intellectual Property of the Republic of Indonesia.

Wang, J. L., Xu, J. K., Hopkins, C., Chow, D. H. K., & Qin, L. (2020). Biodegradable Magnesium-Based Implants in Orthopedics—A General Review and Perspectives. *Advanced Science*, *7*(8). https://doi.org/10.1002/advs.201902443

Wang, Z., Liu, B., Yin, B., Zheng, Y., Tian, Y., & Wen, P. (2022). Comprehensive review of additively manufactured biodegradable magnesium implants for repairing bone defects from biomechanical and biodegradable perspectives. *Frontiers in Chemistry*, *10*(November), 1–22. https://doi.org/10.3389/fchem.2022.1066103

Yotsova, R., & Peev, S. (2024). Biological properties and medical applications of carbonate apatite: a systematic review. *Pharmaceutics*, *16*(2), 291.

Zaenal, N. (2026). *Indonesia Bergantung Impor Implan Medis 94 Persen, Pakar Beri Solusi*. Pertemuan Ilmiah Tahunan Indonesian Hip and Knee Society (IHKS) 2026 Di Jogja. https://leisure.harianjogja.com/r-1268370/indonesia-bergantung-impor-implan-medis-94-persen-pakar-beri-solusi

Zhang, Q., Hu, B., Gao, H., Huang, W., Xiao, Z., Jiang, J., Yang, W., Chen, B., Li, D., & Zeng, X. (2026). *Metals Advances*. *42*(November 2025), 66–85.

Zheng, Y. F., Gu, X. N., & Witte, F. (2014). Biodegradable metals. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, *77*(May), 1–34. https://doi.org/10.1016/j.mser.2014.01.001

LAMPIRAN

Tabel 1 Rangkuman Beberapa Penelitian Terkait Mg *Biodegradable* Yang Telah Dilakukan Periset dan Tingkat Kematangan Teknologinya Di Indonesia Maupun Internasional

Lingkup	Institusi / Periset	Material / Teknologi	Capaian Utama	Tingkat Kematangan
Nasional	BRIN – Annur, Erryani dkk.	Mg–Zn–Ca, Mg berpori, metalurgi serbuk	Pengembangan paduan dan Mg berpori; karakterisasi mikrostruktur, mekanik dan korosi sebagai kandidat material implan	Pengembangan material → pembuktian konsep
Nasional	Universitas Indonesia – Supriadi, Kiswanto, Dwiyati dkk.	Mg murni; *microforming* dan *miniplate*	Pengembangan teknologi pembentukan komponen implan Mg, termasuk *formability* dan desain *miniplate*	Pengembangan proses → kandidat prototipe
Nasional	BRIN–UI–mitra klinis – Setyadi dkk.	Mg–CAp; *powder metallurgy*, *warm compaction*, *sintering*	Pengembangan Mg–CAp; karakterisasi mikrostruktur, kekerasan, degradasi dan sifat mekanik sebagai kandidat implan biodegradable	*Advanced material development*

Lingkup	Institusi / Periset	Material / Teknologi	Capaian Utama	Tingkat Kematangan
Nasional	BRIN–UI–mitra – Setyadi dkk. (2024)	Mg–CAp; sintering & ekstrusi	Perbandingan proses *sintering* dan ekstrusi; menunjukkan pengaruh proses terhadap karakteristik Mg–CAp dan pengembangan material kandidat implan	*Advanced material → prototype-oriented*
Nasional	UI-BRIN / mitra – Kamal, Setyadi dkk. (2025)	Mg–CAp hasil ekstrusi	**Validasi in-vivo** pada *Sprague Dawley rats*: biodegradabilitas, biokompatibilitas dan evaluasi histopatologi	*In-vivo validation → preclinical-oriented*
Nasional	BRIN–UI-Udayana-UNDIP/mitra – Setyadi dkk. (2025)	Mg–CAp; IFS	FEA, uji tarik, torsi dan *pull-out*; Mg-5CAp dan Mg-8CAp memenuhi kriteria kandidat *interference screw* dengan *safety factor* 1,25–2	*Biomechanical validation → functional prototype*
Nasional	Susilowati, Latief, Setyadi dkk. (2025)	Mg–5Al–3Sn/CAp; hot extrusion	CAp meningkatkan kekuatan tekan dan kekerasan; material berhasil difabrikasi sebagai kandidat implan biodegradable, tetapi uji korosi dan sitotoksisitas masih diperlukan	*Material development → early validation*

Lingkup	Institusi / Periset	Material / Teknologi	Capaian Utama	Tingkat Kematangan
Internasional	Syntellix AG, Jerman – MAGNEZIX®	MgYREZr/ WE43	Skrup fiksasi tulang; uji klinis pada *hallux valgus*; CE mark 2013 dan telah digunakan secara klinis	*Clinical* → *regulatory* → *commercial*
Internasional	U&I Corporation, Korea – K-MET®	Mg–Zn–Ca	Skrup fiksasi tulang biodegradable; memperoleh persetujuan regulator Korea	*Clinical* → *regulatory* → *commercial*
Internasional	Bioretec, Finlandia – RemeOs™	Mg–Ca	Skrup fiksasi tulang biodegradable; memperoleh FDA De Novo authorization pada 29 Maret 2023	*Clinical* → *regulatory*

DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

Karya Tulis Ilmiah

1.	Buku Internasional	- buah
2.	Buku Nasional	- buah
3.	Bagian dari Buku Internasional	- buah
4.	Bagian dari Buku Nasional	- buah
5.	Jurnal Internasional	14 buah
6.	Jurnal Nasional	32 buah
7.	Prosiding Internasional	6 buah
8.	Prosiding Nasional	- buah

Kekayaan Intelektual

9.	Paten Internasional	
	a. Terdaftar	- buah
	b. Tersertifikasi	- buah
10.	Paten Nasional	
	a. Terdaftar	2 buah
	b. Tersertifikasi	2 buah
11.	Perlindungan Varietas Tanaman (PVT)	- buah
12.	Rumpun atau Galur Hewan/Ikan/Benih Unggul Tanaman Hutan	- buah
13.	Hak Cipta	- buah
14.	Desain Industri	2 buah
15.	Desain dan Tata Letak Sirkuit Terpadu	- buah

Kerjasama

16. Transaksi Lisensi 1 buah

DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

Karya Tulis Ilmiah

Jurnal Internasional

1. **Setyadi, I.**, Subagyo, Y., Ismail, R., Taqwatomo, G., Suryadi, S., Wibisono, M., Adhitya, K., Hidayat, A., Supriadi, S., & Jujur, I. N. (2025). Finite element analysis (FEA) study on the development of bioabsorbable magnesium-carbonate apatite (Mg-CAp) composite as a candidate interference screw (IFS) material. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures.
2. Kamal, A. F., Dionysios, E., Supriadi, S., **Setyadi, I.**, Juniantito, V., & Rahyussalim, A. J. (2025). Biodegradability and biocompatibility test of Magnesium Carbonate apatite composite implants fabricated by extrusion technique on Sprague Dawley Rats. *Scientific reports*, *15*(1), 9976.
3. Susilowati, S. E., Latief, F. H., **Setyadi, I.**, Sumardiyanto, D., Suryadi, S., Jujur, I. N., & Wibisono, M. (2025). Influence of carbonate apatite (CAp) addition on Mg-5Al-3Sn composites for potential biodegradable implant applications: A study of powder metallurgy combined with hot extrusion. *Results in Engineering*, *25*, 104502.
4. Hermanto, B., Desiati, R. D., Suhandi, A., **Setyadi, I.**, Putranto, A. M., Nuraini, L., Rohman, F., & Sudiro, T. (2025). Hightemperature oxidation of Fe-Mo-Si alloys prepared by spark plasma sintering technique. Journal of Alloys and Compounds, 1010. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.178214

5. Harahap, M. E., Suhendra, N., Masmui, M., Habibie, S., Purwanti, H., Setiawan, H., Lukmana, L., Suryadi, S., & **Setyadi, I.** (2025). The effect of sintering temperature holding time on physical and mechanical behaviours of alumina ceramic prepared for total hip-joint arthroplasty application. Advances in Materials and Processing Technologies,00(00),1–13. https://doi.org/10.1080/2374068X.2025.2474320

6. Saudi, A. U., Wibisono, M., Azahra, S. A., Taqwatomo, G., Rianti, W., Damisih, D., Agustanhakri, Kozin, M., Suryadi, S., Jujur, I. N., **Setyadi, I.**, Wibowo B.T, Gumelar, M.D., Sah, J. & Suhendar, N. (2025). Effect of Solution Treatment on Mechanical and Corrosion Properties of Ti-6Al-7Nb Alloy in Biomedical Applications. Key Engineering Materials, 1015, 41–49.

7. Adhitya, K., Mustika, T., Manawan, M., Ulfah, I. M., Hanafi, R., **Setyadi, I.**, Suryadi, Hidayat, A., Wibisono, M., Sah, J., Alam, G. W., Harahap, M. E., Sulaikan, H. P., Suhendra, N., & Jujur, I. N. (2024). Optimizing surface properties in pure titanium for dental implants: a crystallographic analysis of sandblasting and acid-etching techniques. Powder Diffraction, 39(4), 206–216. https://doi.org/10.1017/S0885715624000320

8. **Setyadi, I.**, Jujur, I. N., Wibisono, M., Manawan, M., Adhitya, K., Hidayat, A., Kamal, A. F., Suharno, B., Supriadi, S., Damisih & Rahyusalim. (2024). Composite of Magnesium and Carbonate Apatite for Biodegradable Bone Implants: A Comparative Study on Sintering and Extrusion Techniques. International Journal on Advanced Science, Engineering & Information Technology, 14(1).

9. Subagyo, Y., Priwintoko, B., Ismail, R., Fitriyana, D. F., Jujur, I. N., **Setyadi, I.**, & Taqwatomo, G. (2023). Development of magnesium biocomposites with hydroxyapatite or carbonate apatite reinforcement as implant candidates: A review. Mechanical Engineering for Society and Industry, 3(3), 152-165.

10. **Iwan Setyadi**, Toto Sudiro, Bambang Hermanto, Prima Rizky Oktari, Achmad Fauzi Kamal, Ahmad Jabir Rahyussalim, Bambang Suharno & Sugeng Supriadi. Fabrication of Magnesium-Carbonate Apatite by Conventional Sintering and Spark Plasma Sintering for Orthopedic Implant Applications, publish in Sains Malaysiana, vol. 51 no 3, 2022.
11. Rahyussalim, Ahmad Jabir, Aldo Fransiskus Marsetio, Achmad Fauzi Kamal, Sugeng Supriadi, **Iwan Setyadi**, Pancar Muhammad Pribadi, Wildan Mubarok, and Tri Kurniawati. 2021. "Synthesis, Structural Characterization, Degradation Rate, and Biocompatibility of Magnesium-Carbonate Apatite (Mg-Co3Ap) Composite and Its Potential as Biodegradable Orthopaedic Implant Base Material." ***Journal of Nanomaterials* 2021.** https://doi.org/10.1155/2021/6615614.
12. **I.Setyadi**, A.F. Marsetio, A.F. Kamal, A.J. Rahyussalim, S. Supriadi and B. Suharno, March 2020, Microstructure and microhardness of carbonate apatite particle-reinforced Mg composite consolidated by warm compaction for biodegradable implant application, **Mater. Res. Express (MRX/Q2) 7 vol 5 (2020)** 056526, https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab7d70
13. **I. Setyadi**, P.M. Pribadi, A.F. Marsetio, A.F. Kamal, A.J. Rahyussalim, B. Suharno and S. Supriadi, 2020, Characteristics Investigation of the Initial Development of Miniplate Made from Composite of Magnesium/Carbonate Apatite Fabricated by Powder Metallurgy Method for Biodegradable Implant Applications, **Key Engineering Materials vol 833**, Trans Tech Publications (ICMMT 2019 Proceeding), p 194.
14. Wibisono, M., Harap, M. E., Jujur, I. N., & **Setyadi, I**. (2019). Effect of Hot Rolling and Cold Rolling on Mechanical Properties and Electrical Conductivity of Composites of AlZrCe Alloy and Al2O3 Particle. *Journal Homepage: http://esrjournal. com*, *7*(4).

Jurnal Nasional

1. Bano, A., Rupiasih, N. N., **Setyadi, I**., Wibisono, M., Suryadi, S., & Jujur, I. N. (2026). The Corrosive Properties Analysis of Biodegradable Magnesium Composites Mg-xCAp (x= 0, 5%, 10%, and 15%) for Bone Implant Applications. *BULETIN FISIKA*, *27*(1), 65-70.
2. Wibisono, M., Jujur, N., **Setyadi, I**., Suryadi, S., Muslim, E. H., Nandang, S., Joni, S., P.S. Hadi, W.A. Giri, Tika, M., Krisna A.c& Hidayat, A. (2023). Understanding the Impact of Mold Position on Brass Casting Microstructure and Hardness: An Observational Study by Production Operators. *Metal Indonesia*, *45*(2), 60-65.
3. Saudi, A. U., Azahra, S. A., Kozin, M., & **Setyadi, I.** (2021). Kajian Sistematis External Fixation System. *Jurnal Inovasi dan Teknologi Material*, *2*(2), 15-23.
4. Suryadi, Mirza Wibisono, Amilatin Rohmah, Hernadi, Kirman, **Iwan Setyadi** (2018)**,** Pengaruh Proses Perlakuan Panas pada Sifat Mekanik dan Daya Hantar Listrik Paduan AlZrCe setelah Hot rolling dan Cold Rolling, Jurnal: Majalah Pengkajian Industri volume 12, No. 1.
5. **Setyadi, I.**, Suryadi, S., Kirman, K., & Wibisono, M. (2016). Pengaruh Proses Hot Rolling dan Kandungan Cerium Pada Daya Hantar Listrik Paduan AlZrCe Sebagai Matrik Komposit Berpenguat Al2O3. *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*, *10*(3), 189-194.
6. **Iwan Setyadi**, Pengembangan Pengecoran Berbahan Baku Paduan *Manganese Bronze* Untuk *Propeller* Kapal Yang Berbasis Bahan *Scrap,* Majalah Ilmiah Pengkajian Industri vol 9 no 3 : Desember 2015, ISSN 1410-3680.

7. **Iwan Setyadi**, M. Syawal, Optimasi Proses *Anneal* Pada Proses *Fine Drawing* Untuk Memperbaiki Sifat Mekanis Produk Kawat Tembaga, Jurnal Sains Materi Indonesia, vol 16, no 4, Juli 2015, ISSN 1411-1098
8. **Iwan Setyadi**, Arie Hendarto, Penelitian Pengembangan Paduan Aluminium-Nikel Bronze Untuk Aplikasi Model Baling-Baling Kapal Penumpang Berdaun Lima Pada IKM Pengecoran Logam Di Kabupaten Tegal, Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia, vol. 15, no. 2, Agustus 2013. ISSN 1410-9409.
9. **Iwan Setyadi**, Analisis Pengaruh Teknologi Proses Produksi Terhadap Karakteristik Material Piston, Jurnal Sains Materi Indonesia, vol 14, no.1 , Oktober 2012, ISSN 1411-1098.
10. **Iwan Setyadi,** Rancangan Pengembangan Peralatan *Continuous Casting* Untuk Pembuatan Slab Kuningan Skala IKM, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri vol 6 no 1 : April 2012, ISSN 1410-3680.
11. Marlin Wijaya, Amin Suhadi, **Iwan Setyadi**, Mirza Wibisono, Aplikasi Teknologi Semi Solid Casting Dalam Pembuatan Komponen Otomotif, Prosiding Seminar Nasional Material dan Metalurgi (SENAMM V), 5-6 September 2012, ITS.
12. **Iwan Setyadi**, Subandrio, Pengaruh Temperatur Temper Pada Proses Perlakuan Panas Hardening Tempering Baja D2 (penulis pertama, telah dipublikasikan), 2011.
13. **Iwan Setyadi**, Pengaruh Temperatur Pouring Terhadap Kualitas Slab Kuningan, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri Vol 5, no. 1, April 2011, ISSN 1410-3680.
14. **Iwan Setyadi**, Mirza Wibisono, Pengaruh Proses Annealing Terhadap Sifat Mekanis Pelat Kuningan, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri Vol 4, no. 3, Desember 2010, ISSN 1410-3680.

15. **Iwan Setyadi**, Pengaruh Penambahan Al Terhadap Aktualisasi Hasil Rancangan Produk Cor Yellow Brass, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, vol.3 no. 3, Desember 2009, ISSN 1410-3680

16. **Iwan Setyadi**, Analisis Penambahan Grain Refiner Terhadap Kualitas Produk Cor Alumunium, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, vol.2 no. 3, Desember 2008, ISSN 1410-3680

17. Suryadi, **Iwan Setyadi**, Modifikasi Kemampuan Permesinan Produk Cor Baja Cetakan Setara SKD 61 Dengan Rekayasa Proses Laku Panas Annealing, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, vol.2 no. 1, Desember 2008, ISSN 1410-3680

18. **Iwan Setyadi**, Pengaruh Prosentase Reduksi Pada Proses Pengerolan Panas Yellow Alpha Brass, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, vol.2 no. 1, Desember 2008, ISSN 1410-3680

19. **Iwan Setyadi**, Optimalisasi Pencapaian Target Komposisi Pada Pembuatan Baja SKD 61 Melalui Penggunaan Scrap Besi Cor, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, vol.1 no. 3, Desember 2007, ISSN 1410-3680

20. **Iwan Setyadi**, Rekayasa Permukaan Produk Roda Gigi (Sprocket) Dengan Proses Flame Hardening, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, vol.1 no. 2, Agustus 2007, ISSN 1410-3680

21. **Iwan Setyadi**, Mirza Wibisono, Suryadi, , Marlin Wijaya, Karakterisasi Produk Baja Cetakan Untuk IKM Pengecoran Logam, Prosiding STUN Vol. 2 , 25-27 Mei 2004.

22. **Iwan Setyadi**, Perumusan Tegangan Alir Baja S48C Melalui Uji Ekperimental Tarik Panas Guna Mengestimasi Beban Tempa, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, edisi no 20, Agustus 2003, ISSN 1410-3680

23. Iwan Setyadi, Pengaruh Proses Hardening dan Tempering Pada Produk Baja Cetakan Hasil Pengecoran, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, edisi no 21, Desember 2003, ISSN 1410-3680

24. Iwan Setyadi, Suryadi, Arie Hendarto, Perancangan Material Balance dan Pembuatan Baja Cetakan SKD 61 Untuk IKM Pengecoran Logam di Ceper Klaten, Prosiding STUN Vol. 1 , 2003

25. Iwan Setyadi, Pengaruh Temperatur Tempa & Dimensi Awal Bahan Baku Terhadap Mampu Tempa (Forgeability) Baja S48C Dalam Pembuatan Komponen Gear, Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia edisi khusus 2003, vol. 5 No. 5/ Agustus 2003, ISSN 1410-9409.

26. Iwan Setyadi, Pengaruh Temperatur Tempa & Dimensi Awal Bahan Baku Terhadap Struktur Mikro Baja S48C Dalam Pembuatan Komponen Gear, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, edisi no 16, April 2002, ISSN 1410-3680

27. Iwan Setyadi, Arie Hendarto, Peningkatan Mutu Tempa Pengrajin Pandai Besi Melalui Pemilihan Bahan dan Proses Laku Panas, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, edisi no 15, Desember 2001, ISSN 1410-3680

28. Arie Hendarto, **Iwan Setyadi**, Suryadi, Cacat Cor Yang Terjadi Pada Plunger Tip dan Kemungkinan Pencegahannya, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, edisi no 16, April 2002, ISSN 1410-3680

29. Suryansah, **Iwan Setyadi**, Pengaruh Penambahan Ni Terhadap Ketahanan Aus Besi Cor Kelabu FC 10, Jurnal Teknoka UHAMKA, vol 5, no. 2, Agustus 2002

30. **Iwan Setyadi,** Suryadi, E.S. Siradj, Karakterisasi Pelat Lembaran Kuningan (Brass) Yang Ada Di Pasaran Lokal, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, edisi no 18, Desember 2002, ISSN 1410-3680
31. **Iwan Setyadi**, Rekayasa Permukaan Produk Roda Gigi (Sprocket) Dengan Proses Flame Hardening, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, edisi no 14, Agustus 2001, ISSN 1410-3680
32. **Iwan Setyadi**, Karakterisasi Mampu Tempa Baja S48C Melalui Pengujian Tarik Panas, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, edisi no 14, Agustus 2001, ISSN 1410-3680

Prosiding Internasional

1. **Setyadi, I.**, Bano, A. K., Rizky, A. S. N., Wibisono, M., Suryadi, Hidayat, A., Adhitya, K., Mustika, T., Harahap, M. E., Alam, G. W., Sah, J., Jujur, I. N., & Rupiasih,N. N. (2025). Study of the Effect of Anodizing Times on the Degradation Rate of Mg-5CAp Biodegradable Composites as Bone Implants. Journal of Physics: Conference Series, 2980(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/2980/1/012029
2. **Setyadi, I.**, Suryadi, S., Jujur, I. N., Harahap, M. E., Tiwibowo, B., Damisih, D., Suharno, B., & Supriadi, S. (2024). Observation of mechanical properties improvement of powder-based magnesium-carbonate appatite (Mg-10CA) through deformation strengthening process. AIP Conference Proceedings, 3003(1).
3. Darmayanti, N. T. E., Jujur, I. N., Anggraeni, P., & **Setyadi, I.** (2024, February). An initial review of magnesium carbonate appatite for biodegradable material bone implant using VOSviewer application. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3003, No. 1). AIP Publishing.

4. Jujur, I. N., Sah, J., Agustanhakri, Triwibowo, B., Mustika, T., **Setyadi, I.**, Damisih, Marchel, P., & Prajitno, D. H. (2024). The effect of aging temperature on hardness properties and corrosion resistance of casted Ti-6Al-4V ELI. AIP Conference Proceedings, 3003(1). https://doi.org/10.1063/5.0186577
5. Saudi, A. U., Wibisono, M., Rianti, W., Triwibowo, B., Damisih, **Setyadi, I**.,& Jujur, I. N. (2022, September). Evaluation of Ti-6Al-7Nb femoral stem fabricated by centrifugal investment casting using fatigue test. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2663, No. 1, p. 050008). AIP Publishing LLC.
6. Damisih, D., Hanafi, R., Gumelar, M. D., Sah, J., Rahmania, A. W., Gustiono, D., Nurlina, N., Arrifqi, M. H., **Setyadi, I.**, Triwibowo, B., Kozin, M., & Jujur, I. N. (2023). Pullout strength evaluation of titanium pedicle screw in different grades of polyurethane. AIP Conference Proceedings, 2719(December 2019). https://doi.org/10.1063/5.0133309

Kekayaan Intelektual

Paten Nasional Terdaftar

1. Cetakan Terintergrasi Pada Pembuatan Batang Logam Dan Kompositnya, 2026, P00202605592
2. Struktur Implan Mandibula Berbahan Ss316l Hasil Bound Metal Deposition, 2026, P00202604878

Paten Nasional Tersertifikasi

1. Implan Gigi Dengan Tiga Sudut Ruang Tulang Serta Modul Puncaknya Tertutup Erat Oleh *Abutment* Padat, 2025, IDP000102656
2. Metode Proses Pemurnian *Medical Grade Stainless Steel* 316L Dengan Meniupkan Gas Argon ke Tanur Induksi, 2022, P00201800773

Desain Industri

1. *Cross Link Spinal Implant,* 2025, IDD000075576
2. *Abutment* Implan Gigi dengan Tiga Sudut Ruang Tulang untuk Tinggi Gusi 3 mm, 2025, A00202306029

Kerjasama

Transaksi Lisensi

1. Kerjasama Lisensi Produksi & Komersialisasi Implan Tulang *Stainless Steel* 316L, 2023, No 086/AMD/PKS/BRIN/VIII/2023

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. DATA PRIBADI

Nama	:	Dr. Ir. Iwan Setyadi, M.T.
Tempat, tanggal. Lahir	:	Bukittinggi, 28 Oktober 1969
Anak ke	:	1 dari lima bersaudara
Jenis Kelamin	:	Laki-laki
Nama Ayah Kandung	:	Ir. H. Nurmawan
Nama Ibu Kandung	:	Hj. Erniwati
Nama Istri:	:	Leni Devera Asrar, S.T., M.T.
Jumlah Anak	:	2 (dua)
Nama Anak	:	1. drg. Nada Rania 2. drg. Sulthan Farhan Athallah
Nama Unit	:	Pusat Riset Komposit dan Biomaterial
Nama Organisasi		Organisasi Riset Nanoteknologi dan Material
Nama Instansi	:	Badan Riset dan Inovasi Nasional
Judul Orasi	:	Teknologi dan Rekayasa Material Medis: Inovasi Material Komposit *Biodegradable* Berbasis Logam Magnesium untuk Implan Tulang Traumatik
Ilmu	:	Teknik
Bidang	:	Material
Bidang Kepakaran	:	Logam *Biodegradable*
No SK Pangkat Terakhir	:	Keppres RI No. 22/K Tahun 2024, tanggal 09 Oktober 2024

No SK Peneliti Ahli Utama	:	Keppres RI No. 44/M Tahun 2024, tanggal 13 Juni 2024
Tautan Scopus	:	https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216397660
Tautan Google Scholar	:	https://scholar.google.com/citations?user=c22RzIsAAAAJ&hl=id

B. PENDIDIKAN FORMAL

No	Jenjang	Nama Sekolah /PT/Universitas	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
1	SD	Adabiah	Padang/ Indonesia	1982
2	SMP	Adabiah	Padang/ Indonesia	1985
3	SMA	SMAN 3	Padang/ Indonesia	1988
4	S-1	Institut Teknologi Sepuluh November (ITS)	Surabaya/ Indonesia	1993
5	S-2	Universitas Indonesia (UI)	Depok/ Indonesia	2001
6	S-3	Universitas Indonesia (UI)	Depok/ Indonesia	2021

C. PENDIDIKAN NONFORMAL

No	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
1	*Training on Advanced Biomaterials for Medical Devices*	Care of Our Environment (COOE), Adelaide, Australia	2016
2	Analisa Vibrasi Untuk Mesin Rotasi (SKF *Predictive Maintenance*)	PJB (Cilegon, Semarang) dan PLN Telo Makasar	1999-2000
3	*Good Clinical Practice*	CRSU-UI, Jakarta	2021

JABATAN STRUKTURAL

No	Jabatan/Pekerjaan	Nama Instansi	Tahun
1	Kepala Bidang Teknologi Industri Logam	BPPT	2012-2016

D. JABATAN FUNGSIONAL

No	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1	Ajun Peneliti Muda	01-05-2004
2	Ajun Peneliti Madya	01-06-2005
3	Peneliti Muda	01-06-2005
4	Peneliti Madya IVa	01-04-2008
5	Peneliti Madya IVb	01-07-2012
6	Peneliti Madya IVc	01-11-2016
7	Peneliti Ahli Utama	25-06-2024

E. PENUGASAN KHUSUS NASIONAL/ INTERNASIONAL

No	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
	-		

KEIKUTSERTAAN DALAM KEGIATAN ILMIAH

No	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara	Tahun
1.	Seminar Nasional Metalurgi dan Material V (SENAMM V)	Pemakalah	ITS, Surabaya	2012
2.	Seminar Nasional Besi dan Baja III	Peserta	ITB, Bandung	2013
3.	Seminar Insentif Riset Sistem Inovasi Nasional	Peserta	Kemeristek, Jakarta	2013
4.	*Indonesian Process Metallurgy* IV (IPM IV)	Peserta	ITB, Bandung	2014
5.	*4th International Symposium on Biomedical Engineering* (ISBE 2019)	Pemakalah	UI-ISBE, Padang	2019

No	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara	Tahun
6.	*10th International Conference on Material and Manufacturing Technology* (ICMMT 2019)	Pemakalah	ICMMT 2019, Kuala Lumpur	2019
7.	*The 5th International Seminar on Metallurgy and Materials* (ISMM) 2022 , in Serpong, Indonesia	Pemakalah	BRIN	2022

F. KETERLIBATAN DALAM PENGELOLAAN JURNAL ILMIAH

No	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/Tugas	Tahun
1.	Majalah Ilmiah Pengkajian Industri	TIRBR-BPPT	Anggota Dewan Editor	2012-2016
2	ISMETEK	ITBU-Jakarta	Anggota Dewan Redaksi	2021-sekarang

G. CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

1. Karya Tulis Ilmiah
   a) Kualifikasi Karya

No	Kualifikasi Karya	Jumlah
1.	Buku Internasional	-
2.	Buku Nasional	-
3.	Bagian dari Buku Internasional	-
4.	Bagian dari Buku Nasional	-
5.	Jurnal Internasional	14
6.	Jurnal Nasional	32
7.	Prosiding Internasional	6
8.	Prosiding Nasional	-
9.	Paten Internasional	-
	Terdaftar	-
	Tersertifikasi	-
10.	Paten Nasional	
	Terdaftar	2
	Tersertifikasi	2
11.	Perlindungan Varietas Tanaman (PVT)	-
12.	Rumpun atau Galur Hewan/Ikan/Benih Unggul Tanaman Hutan	-
13.	Hak Cipta	-
14.	Desain Industri	2
15.	Desain dan Tata Letak Sirkuit Terpadu	-
16.	Transaksi Lisensi	1

b) Kualifikasi Penulis

No	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Penulis Tunggal	15
2.	Bersama Penulis Lainnya	37
	Total	52

c) Kualifikasi Bahasa

No	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Indonesia	32
2.	Bahasa Inggris	20
3	Bahasa Lainnya	-
	Total	52

2. Kekayaan Intelektual

No	Kualifikasi Karya	Jumlah
1.	Paten Internasional	-
	Terdaftar	-
	Tersertifikasi	-
2.	Paten Nasional	
	Terdaftar	2
	Tersertifikasi	2
3.	Perlindungan Varietas Tanaman (PVT)	-
4.	Rumpun atau Galur Hewan/Ikan/Benih Unggul Tanaman Hutan	-
5.	Hak Cipta	-
6.	Desain Industri	2
7.	Desain dan Tata Letak Sirkuit Terpadu	-

3. Kerjasama bersama Mitra

No	Kualifikasi Karya	Jumlah
1.	Transaksi Lisensi	1

J. PEMBINAAN KADER ILMIAH

Pejabat Fungsional Peneliti/Perekayasa

No	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Aghni Ulma Saudi, ST.	BRIN	Pembimbing Teknis	2022
2.	Damisih, MSc	BRIN	Pembimbing Teknis	2023

Mahasiswa/mahasiswi

No	Nama	PT/Universitas	Peran/Tugas	Tahun
1	Budi Putra	DTMM-UI	Pembimbing S2	2023
2	Adhinda Septhia Nur Rizky	Fisika-UPI Bandung	Pembimbing S1	2024
3	Yoga Saputra	T.Mesin -Jakarta Global Univ. (JGU)	Pembimbing S1	2024
4	Ana Karina Bano	Fisika-UNUD Denpasar	Pembimbing S1	2025
5	Nurhasanah	Fisika-UIN Banten	Pembimbing S1	2025
6	Reigina Afrillia	Fisika-UIN Banten	Pembimbing S1	2025
7	Anisa Ruaidah	Fisika-UIN Banten	Pembimbing S1	2025

No	Nama	PT/Universitas	Peran/Tugas	Tahun
8	Tracy Deborah Zebua	T. Metalurgi-UNTIRTA	Pembimbing S1	2025
9	Moch. Arif Solchudin	T.Biomedis-UNAIR	Pembimbing S1	2026
10	Nabila Safira Hanun	T.Biomedis-UNAIR	Pembimbing S1	2026
11	Usfu Halifah	Fisika-UIN Banten	Pembimbing S1	2026
12	Arya Priana Dilaga	T. Metalurgi-UNTIRTA	Pembimbing S1	2026
13	Dewi Syahrotunnisa	Fisika-UIN Banten	Pembimbing S1	2026
14	Ersyi Arini Valmelina	UI (calon DBR)	Pembimbing S3	2026

K. Organisasi Profesi Ilmiah

No	Nama Organisasi	Jabatan	Tahun
1	Himpunan Peneliti Indonesia (HIPENINDO)	Anggota	2019-2021
2.	Persatuan Insinyur Indonesia (PII)	Anggota	2019-sekarang
3.	Perhimpinan Periset Indonesia (PPI)	Anggota	2022-sekarang

L. Tanda Penghargaan

No	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1.	Satyalancana Karya Satya 10 tahun	Presiden RI	2004

No	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
2.	Satyalancana Karya Satya 20 tahun	Presiden RI	2014
3.	Satyalancana Karya Satya 30 tahun	Presiden RI	2024

Pengembangan komposit *biodegradable* magnesium–*carbonate apatite* (Mg–CAp) menawarkan pendekatan inovatif untuk implan tulang traumatik yang dirancang mampu menopang beban sekaligus terdegradasi secara terkendali tanpa memerlukan operasi pelepasan. Keterbaruan riset ini terletak pada pengembangan komposit magnesium dengan *carbonate apatite* berbasis lokal yang menyerupai mineral tulang dan berpotensi mendukung respons biologis. Melalui integrasi formulasi material, densifikasi, ekstrusi, rekayasa permukaan, dan pengujian biologis, diperoleh Mg–CAp dengan peningkatan kekuatan mekanik, pengendalian degradasi hingga 0,2 mm/tahun, serta respons biokompatibilitas yang baik.

Riset kemudian dikembangkan dari material menuju **kandidat implan fungsional** melalui simulasi biomekanik dan pembuatan prototipe *interference screw* untuk rekonstruksi ligamen ACL. Capaian tersebut menempatkan Mg–CAp pada tahap **menuju kesiapan praklinis**, dengan tantangan berikutnya berupa validasi mekanik eksperimental dan uji praklinis pada model hewan yang lebih besar. Secara strategis, inovasi ini membuka peluang pemanfaatan sumber daya dalam negeri untuk mengurangi ketergantungan impor, memperkuat kapasitas riset dan manufaktur, serta mendorong kemandirian industri alat kesehatan nasional.

BRIN Publishing
The Legacy of Knowledge

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Gedung B.J. 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.3684

ISSN 3090-8485