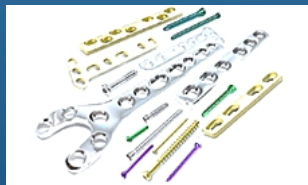


**ORASI ILMIAH: RISET DAN INOVASI  
STRATEGI INOVATIF DALAM PENGEMBANGAN  
TEKNOLOGI MATERIAL MEDIS DAN  
REKAYASA IMPLAN TULANG DAN GIGI UNTUK  
KEMANDIRIAN INDUSTRI NASIONAL**

**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET  
ILMU TEKNK  
BIDANG MATERIAL  
KEPAKARAN BIOMATERIAL**



**OLEH:  
I NYOMAN JUJUR**

**BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL**

**ISSN 3090-8485**

**ORASI ILMIAH PROFESOR RISET  
ILMU TEKNIK  
BIDANG MATERIAL  
KEPAKARAN BIOMATERIAL**

Diterbitkan pertama pada 2026 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: [penerbit.brin.go.id](http://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

**STRATEGI INOVATIF DALAM PENGEMBANGAN  
TEKNOLOGI MATERIAL MEDIS DAN  
REKAYASA IMPLAN TULANG DAN GIGI UNTUK  
KEMANDIRIAN INDUSTRI NASIONAL**

**ORASI ILMIAH PROFESOR RISET  
ILMU TEKNIK  
BIDANG MATERIAL  
KEPAKARAN BIOMATERIAL**

**OLEH:  
I NYOMAN JUJUR**

Penerbit BRIN



## DAFTAR ISI

BIODATA RINGKAS .....	1
PRAKATA PENGUKUHAN .....	5
I. PENDAHULUAN.....	7
II. PERKEMBANGAN BIONERT STAINLESS STEEL DAN TITANIUM MATERIAL MEDIS.....	13
A. Perkembangan Teknologi Pembuatan Material Medis SS 316L dan Titanium.....	13
B. Perkembangan Kinerja Material Medis SS 316L dan Titanium	17
III. PENGEMBANGAN MATERIAL DAN TEKNOLOGI PRODUKSI IMPLAN TULANG DAN GIGI UNTUK DAYA SAING INDUSTRI.....	19
A. Riset Teknologi Pembuatan SS 316L dan Titanium Berbahan Lokal .....	19
B. Rekayasa Implan Tulang dan Gigi Berbasis SS 316L dan Titanium.....	31
IV. IMPLIKASI STRATEGIS IMPLAN TULANG DAN GIGI TERHADAP KEUNGGULAN INSTITUSI RISET .....	43
A. Pengembangan Material Medis Berbahan Baku Lokal .....	43
B. Perencanaan Implan Tulang dan Gigi.....	44
C. Implikasi Strategis Terhadap Institusi Riset.....	44
V. PELUANG DAN STRATEGI PENGEMBANGAN IMPLAN TULANG DAN GIGI NASIONAL.....	47
A. Standarisasi Material Medis Dalam Pengembangan Implan Tulang dan Gigi .....	47
B. Pencetakan 3D Logam untuk Customize dan Presisi Implan Tulang.....	48

VI. KESIMPULAN.....	53
VII. PENUTUP.....	55
UCAPAN TERIMA KASIH .....	57
DAFTAR PUSTAKA.....	61
CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET DAN INOVASI.....	69
DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET DAN INOVASI.....	71
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	83

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1	Inklusi oksida dalam patahan uji tarik SS 316L (Jujur et al., 2015) .....	23
Gambar 3.2	Grafik tegangan-regangan pengaruh penambahan Nb, sebelum (A) dan sesudah perlakuan panas (B) (Jujur et al., 2021). .....	24
Gambar 3.3	Penanaman implan pada femur kanan ekstremitas belakang (Gustian et al., 2018).....	30
Gambar 3.4	Uji pull-out <i>pedicle screw</i> implan tulang belakang, standar ASTM F1839-08 .....	33
Gambar 3.5	Simulasi pembebanan desain implan gigi.....	37
Gambar 3.6	Foto <i>Rontgen</i> subjek setelah pemasangan implan tulang .....	38
Gambar 3.7	Uji praklinik pada kadaver di Laboratorium Anatomi FKUI/RSCM.....	39
Gambar 3.8	Uji <i>Fatigue</i> implan gigi.....	40
Gambar 3.9	Uji kinerja purwarupa implan gigi pada model .....	41



## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Komposisi kimia sebelum dan sesudah penambahan FeCr (%) (Jujur, 2005) .....	20
Tabel 3.2	Hasil uji tarik SS 316L setelah perlakuan gas diffuser.....	25
Tabel 3.3	Hasil pemeriksaan MTT Assay (Gustian et al, 2018).....	29



## BIODATA RINGKAS



Dr. Ir. I Nyoman Jujur, M.Eng., lahir di Tabanan, pada tanggal 30 September 1962 adalah anak ke-3 dari Bapak I Ketut Koyong dan Ibu Ni Nyoman Tengkok. Menikah dengan Gusti Ayu Made Sri Kardiani dan dikaruniai 2 orang anak, yaitu Putu Agus Puja Nugraha, ST dan Made Ayu Wandita Nugraha, ST.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 3/M Tahun 2022 tanggal 19 Januari 2022, yang bersangkutan diangkat sebagai Perekayasa Ahli Utama di Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional Nomor 82/I/HK/2026 tanggal 10 Februari 2026, yang bersangkutan melakukan pengukuhan sebagai Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Negeri Dalang, tahun 1973, SMP Negeri Bajera Tahun 1976, SMPP Denpasar Tahun 1980, memperoleh gelar sarjana Teknik Mesin dari Universitas Brawijaya Tahun 1985, gelar Magister di bidang *Material Engineering* Tohoku University Jepang Tahun 1991, dan gelar Doctor di bidang *Material Engineering* dari Tohoku University Jepang Tahun 1994

Mengikuti beberapa pelatihan yang terkait bidang kompetensinya, antara lain *Manufacturing CCM Alloy implant product by using electron beam melting* (EBM) di Tohoku University, Jepang, tahun 2014, *Tailor-Made Course on Management and Economics of Photovoltaic* di Institute National De L'Energie Solaire (INES), Prancis tahun 2015,

*Training on Advanced Biomaterials for Medical Devices* di Care of Our Environment (COOE), Adelaide, Australia tahun 2016.

Pernah menduduki jabatan struktural sebagai Koordinator Kelompok Teknologi Logam-BPPT tahun 2000, Kepala Bidang Teknologi Logam-BPPT tahun 2001-2006.

Jabatan fungsional diawali sebagai fungsional peneliti sebagai Peneliti Ahli Muda-IIIc tahun 1995, Peneliti Ahli Madya-IVa tahun 1998, Peneliti Ahli Madya-IVc tahun 2006, Perekayasa Ahli Utama-IVd tahun 2022, bidang Metalurgi dan Material.

Menghasilkan 53 karya tulis ilmiah (KTI), baik ditulis sendiri maupun berkolaborasi bersama penulis lain dalam bentuk buku, jurnal dan prosiding. Sebanyak 13 KTI ditulis dalam bahasa Indonesia dan 40 ditulis dalam bahasa Inggris. Menghasilkan 6 paten tersertifikasi, 3 paten terdaftar dan 2 di antaranya sudah menghasilkan kerja sama produksi dan komersialisasi implan tulang *stainless steel* 316L dan plat implan traumatik paduan Titanium Ti-6Al-4V ELI dengan PT. Zenith Allmart Precisindo.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing jabatan fungsional perekayasa, pembimbing skripsi di Universitas Indonesia, Universitas 17 Agustus 1945, Institut Teknologi Indonesia, Universitas Global Jakarta pembimbing tesis di Universitas Indonesia, Universitas Padjadjaran dan Universitas Diponegoro; pembimbing disertasi di Universitas Indonesia dan Universitas Diponegoro; serta penguji disertasi di Universitas Indonesia dan Universitas Diponegoro.

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, yaitu sebagai Ketua Umum Perhimpunan Perekayasa Indonesia HIMPERINDO (2019-2021), Wakil Ketua Umum Perhimpunan Periset Indonesia PPI (2022-2024), Departemen Hilirisasi Dewan Pakar

PPI (2025-saat ini). Anggota Persatuan Insinyur Indonesia PII (2021-saat ini).

Menerima tanda penghargaan Satya Lancana Karya Satya X Tahun Tahun 1996, Satyalancana Wira Karya Tahun 2005, Satya Lancana Karya Satya XX Tahun Tahun 2006, Satyalancana Pembangunan Tahun 2014, Satya Lancana Karya Satya XXX Tahun Tahun 2016, Satyalancana Pembangunan Tahun 2018 dari Presiden Republik Indonesia.



## **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 ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya sehingga dalam kesempatan ini kita dapat berkumpul dan bersama-sama hadir pada acara orasi ilmiah pengukuhan Profesor Riset di Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya pada tanggal 15 April 2026 menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

**STRATEGI INOVATIF DALAM PENGEMBANGAN  
TEKNOLOGI MATERIAL MEDIS DAN REKAYASA  
IMPLAN TULANG DAN GIGI UNTUK KEMANDIRIAN  
INDUSTRI NASIONAL**



## I. PENDAHULUAN

Pertumbuhan layanan kesehatan di Indonesia menunjukkan kecenderungan yang semakin meningkat, seiring dengan pesatnya pertumbuhan jumlah penduduk dan membaiknya harapan hidup (*life expectancy*) bangsa. Fenomena ini diiringi pula oleh tantangan baru di bidang kesehatan, salah satunya adalah meningkatnya kasus cedera akibat kecelakaan lalu lintas, terutama yang melibatkan kendaraan bermotor.

Data Korlantas POLRI mencatat bahwa pada tahun 2023, yang angkanya hampir sama dengan tahun 2024, sekitar 72% cedera masyarakat disebabkan oleh kecelakaan kendaraan bermotor (Sandi, 2024). Selain itu, jumlah populasi penyakit tulang seperti *osteoarthritis* dan kanker turut memicu lonjakan kebutuhan alat kesehatan, khususnya implan tulang, yang terus meningkat dari tahun ke tahun.

Sementara kebutuhan implan gigi di Indonesia juga terus meningkat seiring meningkatnya kesadaran masyarakat terhadap kesehatan dan estetika gigi. Di sisi lain, kemajuan teknologi, ketersediaan layanan kedokteran gigi spesialis, serta penurunan biaya prosedur secara bertahap membuat implan gigi semakin terjangkau, sehingga pasar domestik berkembang pesat dan membuka peluang besar bagi produksi dalam negeri.

Pengembangan implan tulang dan gigi di industri nasional berada pada irisan strategis antara RIRN 2017–2045, yang menetapkan teknologi kesehatan dan material medis sebagai riset prioritas jangka panjang, dan RPJMN 2020–2024, yang menargetkan kemandirian alat kesehatan melalui inovasi,

hilirisasi riset, dan substitusi impor. Kebijakan ini diperkuat oleh Permenkes No. 17 Tahun 2017 yang memuat rencana aksi pengembangan industri alat kesehatan dalam negeri, termasuk peta jalan produksi berbasis teknologi tinggi dan pemanfaatan potensi sumber daya lokal. Sinergi ketiga dokumen ini menjadi landasan yang kuat untuk mendorong produksi implan tulang dan gigi dalam memenuhi standar mutu internasional.

Material implan tulang berkualitas dengan harga terjangkau untuk BPJS Kesehatan adalah *Stainless steel 316L* (SS 316L) (Jujur et al., 2021). Implan bedah harus tahan terhadap korosi saat ditempatkan di dalam tubuh untuk mencegah kemungkinan infeksi. Sesuai standar ASTM F 138, SS 316L mengandung sekitar 17 hingga 19% kromium untuk membentuk lapisan pasif yang tipis di permukaan dan 13 hingga 15% nikel untuk membentuk fasa austenit yang berfungsi untuk meningkatkan keuletan (*ductility*), sementara 2,25 hingga 3% molibdenum ditambahkan untuk membentuk lapisan pelindung agar tahan terhadap korosi lubang dan asam klorida.

Material Titanium dan paduannya dikenal mempunyai kekuatan spesifik lebih tinggi dibandingkan dengan SS 316L dan mempunyai karakteristik biokompatibilitas yang sangat baik. Beberapa implan tulang traumatik dan implan tulang belakang serta implan gigi menggunakan material ini dengan pertimbangan kekuatan dan rekayasa teknologi permukaan untuk peningkatan osseointegrasinya (Adhitya et al., 2024). Namun demikian, harganya relatif mahal.

Dalam beberapa tahun terakhir, kapasitas produksi *stainless steel grade*: seri 200, 300, dan 400 jenis *flat-rolled* (HRC/CRC), *coils, bars/rods, wire* di Indonesia berkembang sangat cepat sekitar 2 juta ton pada 2017, kemudian 5 juta ton untuk produk *flat, coils, bars/rods* pada tahun 2021-2022 dan diproyeksikan

mencapai 7 juta ton pada tahun 2027 yang didominasi oleh *flat-rolled* dan produk berkinerja tinggi (*high-nickel grades*) (Aria, 2024). Produk tersebut kebanyakan untuk kebutuhan ekspor, sehingga penggunaannya untuk kebutuhan biomedis masih sangat terbatas. Sementara itu, *stainless steel* yang mempunyai karakteristik biokompatibilitas yang baik adalah SS 316L karena mempunyai kandungan Mo untuk ketahanan *pitting* dan *crevice corrosion* di lingkungan cairan tubuh. Kesenjangan produksi ini menandakan tantangan penting dalam pengembangan manufaktur implan SS 316L dalam negeri untuk mengembangkan material medis berbahan baku lokal. Pembuatan implan menggunakan proses pemesinan membutuhkan bahan baku pelat, namun kelemahannya banyak sisa bahan terbuang, sedangkan pengecoran terutama dengan *investment casting* mampu untuk produksi massal sehingga menghasilkan produk yang lebih murah.

Penambahan pepadu feronikel (FeNi) hasil *smelter* lokal merupakan potensi untuk peningkatan penggunaan bahan baku lokal (Jujur, 2004). Oksida-oksida yang terperangkap di dalam logam cair adalah permasalahan utama yang sulit untuk dibersihkan. Oksida-oksida menginisiasi mikrovoid yang secara signifikan menurunkan kekuatan mekanis, ketahanan korosi dan sifat biokompatibilitas (Deng et al., 2021). Selain itu, munculnya  $\delta$ -ferit pada struktur mikro SS 316L harus dihindari karena menimbulkan sifat magnetik pada implan bedah yang dapat mengganggu peralatan pencitraan resonansi magnetik (MRI) (Wang et al., 2025) (Rodrigues et al., 2021).  $\delta$ -ferit juga berpengaruh pada morfologi permukaan sehingga memengaruhi ketahanan korosi dan kekuatan mekanis serta biokompatibilitas (Pattanayak et al., 2025). Mengurangi inklusi oksida dan pengaturan komposisi kimia untuk menghilangkan  $\delta$ -ferit di dalam fasa austenit dalam proses pepaduan SS 316L

berbahan baku lokal merupakan permasalahan riset yang harus diselesaikan (Jujur et al., 2015).

Telah dilakukan pengembangan teknologi pembuatan *stainless steel* bekerja sama dengan PT. Aneka Tambang. Tahap selanjutnya adalah pengembangan material medis SS 316L yang diproses menggunakan dapur induksi di industri mitra PT Zenith Allmart Precisindo. Karakterisasi mekanis dan kristalografi dilakukan di BRIN, sementara uji *in-vitro* dan *in-vivo* material SS 316L dilaksanakan bekerja sama dengan Fakultas Kedokteran Hewan IPB.

Sedangkan paduan titanium yang umum digunakan sebagai material medis adalah Ti-6Al-4V *Extra Low Interstitial* (ELI), karena tingkat kemurnian dari unsur *interstitial* (oksigen, nitrogen dan karbon) yang berdampak langsung pada kekuatan, keuletan dan karakteristik biokompatibilitasnya (Jujur et al., 2024). Riset dilakukan menggunakan argon *arc-melting* skala laboratorium, dilanjutkan dengan perlakuan panas untuk rekayasa struktur mikro. Uji *in-vitro* dan *in-vivo* SS 316L dilakukan bekerja sama dengan FKG-UI (Jujur et al., 2020). Produk implan traumatik SS 316L dan Titanium telah mendapatkan izin edar dan dikomersialkan oleh PT. Zenith Allmart Precisindo, serta terdaftar dalam e-Katalog LKPP.

Peleburan paduan titanium skala industri bekerja sama dengan PT. Itokoh Ceperindo, Klaten. Kegiatan ini difokuskan untuk melakukan optimasi peleburan sentrifugal pembuatan komponen batang femur dari implan *Total Hip Arthroplasty* (THA) menggunakan cetakan presisi (Saudi et al., 2022). Karakterisasi paduan Ti-6Al-7Nb dikembangkan sebagai paduan alternatif Ti-6Al-4V dengan mengganti unsur vanadium yang

berpotensi toksik dengan niobium yang lebih biokompatibel (Hulka et al., 2022).

Penguatan teknologi produksi implan gigi berbahan titanium dilakukan melalui kerja sama dengan PT Pudak Scientific dan Persatuan Dokter Gigi Indonesia (PDGI). Kegiatan ini berfokus pada riset teknologi kunci, yaitu rekayasa permukaan material titanium untuk komponen *fixture*, serta pengembangan teknologi pemesinan yang presisi (Adhitya et al., 2024). Saat ini implan gigi sudah masuk tahap persiapan uji klinik.

Pada bagian awal orasi ini akan dibahas tentang perkembangan material medis, diikuti oleh penyampaian hasil riset material medis SS 316L dan Ti-6Al-4V ELI berbahan lokal, serta rekayasa implan tulang traumatik, implan tulang belakang, dan implan gigi. Selanjutnya, akan diuraikan implikasi strategis hasil riset tersebut terhadap peningkatan keunggulan institusi riset, disertai pembahasan peluang pengembangan implan tulang dan gigi nasional. Orasi ini akan ditutup dengan penyampaian kesimpulan dan penutup.



## II. PERKEMBANGAN BIONERT STAINLESS STEEL DAN TITANIUM MATERIAL MEDIS

Dalam bab ini akan dijelaskan perkembangan teknologi pembuatan dan kinerja material medis SS 316L dan Titanium untuk alat kesehatan. Kedua material tersebut merupakan material logam yang tidak bereaksi secara biologis dengan jaringan tubuh (*bioinert*). Material tersebut telah lama digunakan secara luas dalam bidang ortopedi, kedokteran gigi, dan perangkat bedah karena kombinasi antara kekuatan, ketahanan korosi, serta kemudahan proses manufakturnya. Oleh karena itu, pemahaman terhadap perjalanan evolusi teknologi pembuatan dan kinerja SS 316L dan Titanium dari masa lalu yang bersifat pasif, masa kini yang penuh inovasi, hingga masa depan yang menjanjikan integrasi cerdas menjadi penting untuk merancang solusi alat kesehatan yang lebih efektif dan presisi.

### A. Perkembangan Teknologi Pembuatan Material Medis SS 316L dan Titanium

Material SS 316L mulai digunakan sebagai material implan tulang sejak tahun 1960 menggantikan SS 302/SS 304 karena kandungan karbonnya lebih rendah sehingga lebih tahan korosi dan harga lebih murah dibandingkan dengan Titanium dan paduan Co-Cr. Produksi SS 316L untuk alat kesehatan dilakukan menggunakan metode metalurgi konvensional seperti pengecoran, rol panas, dan pengerjaan dingin. Setelah pembentukan, material biasanya melalui proses *annealing* untuk menghilangkan tegangan sisa dan mengoptimalkan sifat mekanik. Teknologi yang digunakan berfokus pada kontrol komposisi kimia, khususnya kadar

karbon rendah ( $\leq 0,03\%$ ) untuk meningkatkan ketahanan terhadap *intergranular corrosion*, dan penambahan molibdenum untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi lubang (*pitting corrosion*) dalam lingkungan tubuh yang mengandung klorida (Drapala et al., 2018).

Selama periode masa lalu dan saat ini, proses seperti *Vacuum Induction Melting* (VIM), *Argon Oxygen Decarburization* (AOD) dan *Vacuum Oxygen Decarburization* (VOD) diterapkan untuk meningkatkan kemurnian logam, mengurangi inklusi non-logam, dan menurunkan kadar gas (seperti hidrogen dan nitrogen) yang berisiko menurunkan keuletan atau menyebabkan korosi (Yin et al., 2016). Teknologi ini menjadikan SS 316L cukup andal sebagai material implan yang mempunyai standar baik dan harga bersaing. Namun demikian, keterbatasan utama dari pemrosesan konvensional adalah struktur mikro yang relatif besar dan homogen, serta keterbatasan dalam pembuatan bentuk kompleks, sehingga sulit dicapai fitur geometris spesifik yang dibutuhkan untuk integrasi biologis.

Pada masa lalu, SS 316L dan Titanium murni serta paduan Ti-6Al-4V diproduksi menggunakan proses konvensional (*conventional manufacturing*) seperti pengecoran dan penempaan. Setelah itu, dilakukan pemesinan secara manual atau CNC untuk membentuk model implan tulang (El Khalloufi et al., 2021).

Saat ini, era *Additive Manufacturing* (*advanced manufacturing*) dan teknologi rekayasa permukaan telah mendorong pemanfaatan SS 316L dan titanium secara luas dalam pembuatan implan tulang dan gigi, berkat sifat mekanik yang baik, biokompatibilitas yang memadai, dan harga relatif terjangkau. Berbagai metode pencetakan digunakan, masing-masing dengan keunggulan dan tantangan. *Selective Laser Melting* (SLM),

*Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)*, *Binder Jetting*, *Fused Filament Fabrication (FFF)*, *Bound Metal Deposition (BMD)* dan *Electron Beam Melting (EBM)* menjadi pilihan utama karena mampu menghasilkan komponen berdensitas tinggi (>99%) dan mikrostruktur halus yang penting untuk implan, meskipun sering menimbulkan tegangan sisa tinggi sehingga memerlukan perlakuan panas pasca-pencetakan (Chenfan et al., 2023). *Binder Jetting (BJ)* unggul dalam produktivitas dan biaya lebih rendah, menghasilkan struktur berpori yang menarik untuk scaffold, meski densitasnya lebih rendah. Sementara itu, *Fused Filament Fabrication (FFF)* atau *Bound Metal Deposition (BMD)* memungkinkan pencetakan geometri kompleks dari campuran logam-polimer yang kemudian diproses melalui *debinding* dan *sintering* (Hartmann et al., 2022).

Selain itu, beberapa pendekatan lain juga telah dievaluasi secara eksperimental untuk pencetakan SS 316L dan Titanium, seperti *Electron Beam Melting (EBM)*, yang menggunakan berkas elektron dalam lingkungan vakum. Beberapa studi telah mengkaji potensi EBM terutama karena minimnya *residual stress* dan sifat mikrostruktur *kolumnar* yang terbentuk secara alami (Olsén et al., 2018). Secara keseluruhan, pemilihan teknologi pencetakan 3D untuk SS 316L dan Titanium sebagai material implan sangat bergantung pada kebutuhan aplikasi spesifik, antara lain: kustomisasi geometri yang presisi sesuai *file digital (CT-scan pasien)*, struktur berpori yang dapat direkayasa sesuai kebutuhan oseointegrasi dan laju pertumbuhan jaringan serta penurunan waktu dan biaya produksi.

Di bidang permukaan, integrasi antara teknologi fabrikasi dan rekayasa permukaan (misalnya elektrodposisi, anodisasi, laser *surface texturing*) menghasilkan permukaan yang tidak hanya bioaktif, tetapi juga antibakteri dan *osteoconductive*

(Sridevi et al., 2019). Riset lain melaporkan bahwa gabungan antara modifikasi permukaan Titanium dengan penambahan tembaga (Cu) meningkatkan *osteogenesis* dan memberikan efek antibakteri pada implan ortopedi dan gigi (Li et al., 2023). Dengan kata lain, saat ini SS 316L dan Titanium tidak hanya diproses untuk kekuatan, tetapi juga didesain untuk menyatu dengan tubuh secara aktif. Selain itu, berbagai jenis pelapisan, seperti hidroksiapatit, kalsium fosfat, dan *bioactive glass*, diterapkan untuk meningkatkan bioaktivitas dan biokompatibilitas. Proses *plasma electrolytic oxidation* (PEO) yang dikombinasikan dengan pelapisan *polydopamine* (PDA) telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam meningkatkan bioaktivitas (Zhang et al., 2025).

Di masa depan, teknologi pembuatan SS 316L dan Titanium untuk aplikasi medis akan semakin melibatkan pendekatan yang lebih cerdas, personal, dan multifungsi. Penggabungan antara digital *workflow* dengan desain berbasis kecerdasan buatan, di mana desain berbasis kecerdasan buatan dan optimasi topologi memungkinkan penciptaan struktur implan berbasis kebutuhan individual pasien, dengan memperhitungkan sifat mekanis dan biologis tulang (Li et al., 2023).

Penggabungan antara implan *multifunctional & smart coatings*, di mana SS 316L dan Titanium dilapisi dengan pelapisan berbasis polimer responsif, material yang melepaskan ion aktif (misalnya  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ), atau implan dengan sensor tertanam di dalamnya yang mendeteksi infeksi atau tekanan mekanik abnormal secara *real-time* (Wakale & Goswami, 2025). *Biofabrication* menggabungkan antara pencetakan 3D (*scaffold*) dan jaringan lunak (*sel punca*) menggunakan *bioprinting*.

## B. Perkembangan Kinerja Material Medis SS 316L dan Titanium

Pada masa sebelumnya adalah era material medis konvensional, SS 316L sangat diandalkan oleh dunia alat kesehatan, terutama karena sifat mekaniknya yang andal, ketahanan korosi yang baik, serta kemudahan fabrikasi, harganya relatif terjangkau dan ketersediaannya luas (Jujur et al., 2021). Namun, dari sisi biologis, keberadaan ion nikel meskipun rendah, masih dapat menimbulkan potensi reaksi alergi atau korosi lokal dalam jangka panjang (Kimber & Basketter, 2022).

Titanium murni (*commercially pure Titanium*, Cp-Ti) dan paduan Ti-6Al-4V digunakan secara luas karena kekuatan tarik tinggi, tahan korosi dan ringan, sifat biokompatibilitasnya sangat baik. Namun, modulus elastisitasnya yang tinggi menimbulkan *stress shielding* yang menghambat pertumbuhan tulang di sekitar implan karena waktu lalu desain implan kurang mempertimbangkan distribusi beban. Disamping itu, risiko partikel mikro dari permukaan akibat keausan terutama pada paduan titanium yang mengandung vanadium dan aluminium menjadi tantangan waktu masa lalu (Venkatesh et al., 2009).

Saat ini adalah era transformasi SS 316L dan Titanium menuju material medis aktif dan adaptif. Paradigma material medis telah berubah secara drastis. Kedua material ini tidak lagi dipandang hanya sebagai material struktural, tetapi sebagai *platform* multifungsi yang dapat direkayasa untuk mendukung regenerasi jaringan, meningkatkan oseointegrasi, dan bahkan menurunkan risiko infeksi. Transformasi ini ditopang oleh kemajuan dalam *surface engineering*, *additive manufacturing*, dan teknologi nano.

Pencetakan 3D logam memungkinkan pencetakan bentuk kompleks dengan struktur poros yang mendekati struktur

trabekular tulang. Sehingga, implan tidak hanya ringan, tetapi juga mendukung pertumbuhan jaringan tulang baru ke dalam implan, membuka peluang integrasi biologis yang lebih baik sehingga mengurangi pemulihan pascaoperasi.

Sebagai metode gabungan Topografi Mikro/Nano Bertingkat menggabungkan strukturisasi mikro dengan oksidasi anodik untuk membentuk susunan *nanotube* secara signifikan mampu meningkatkan diferensiasi osteogenik dan pembentukan tulang.

Kinerja mekanik material juga telah dievaluasi secara lebih ketat dan realistis, termasuk pengujian kelelahan dinamis, simulasi biomekanik multiaksial, hingga analisis kegagalan berdasarkan *finite element modeling*. Pengembangan paduan Titanium dilakukan dengan menggantikan elemen beracun untuk paduan yang lebih aman seperti Ti-6Al-7Nb atau Ti-13Nb-13 Zr. Rekayasa proses deformasi untuk paduan  $\beta$ -Titanium sehingga menghasilkan paduan dengan modulus elastisitas lebih rendah mendekati tulang. Pengaruh *texture* pada deformasi  $\beta$  Ti-Nb-Sn dan presipitasi  $\alpha$  untuk meningkatkan kekuatannya (Nunes et al., 2020).

Selanjutnya ke masa depan adalah di Era Implan Cerdas dan Regeneratif, arah pengembangan kinerja material SS 316L dan Titanium semakin menarik. Tantangan biomedis yang kompleks, seperti kebutuhan akan penyembuhan cepat, pencegahan infeksi kronis, dan personalisasi implan untuk setiap pasien, mendorong pendekatan baru yang lebih inovatif. Kinerja SS 316L dan Titanium mulai memasuki ranah *smart biomaterials* dan *bio-responsive systems*.

### III. PENGEMBANGAN MATERIAL DAN TEKNOLOGI PRODUKSI IMPLAN TULANG DAN GIGI UNTUK DAYA SAING INDUSTRI

Pada bab ini membahas upaya pengembangan material medis SS 316L dan Titanium yang berasal dari bahan baku lokal, dan karakterisasi biokompatibilitasnya untuk memastikan keamanan dan performa pada tubuh manusia. Pengembangan ini tidak berdiri sendiri, tetapi merupakan hasil sinergi riset yang melibatkan para dokter spesialis ortopedi, ahli bedah mulut, dan rumah sakit sebagai mitra uji klinis, serta dukungan industri sebagai wahana penerapan teknologi. Melalui kolaborasi ini, teknologi pembuatan implan tulang dan gigi dapat dikembangkan dari hulu hingga hilir, sehingga tidak hanya memenuhi kebutuhan medis, tetapi juga meningkatkan daya saing nasional di pasar global.

#### A. Riset Teknologi Pembuatan SS 316L dan Titanium Berbahan Lokal

Pengaturan tahapan proses pemurnian pada *smelter*, khususnya di *shaking converter*, memegang peranan penting dalam penambahan ferokrom (FeCr) pada cairan feronikel (FeNi) untuk menghasilkan bahan baku *stainless steel*. Pemurnian FeNi dilakukan dengan prinsip oksidasi selektif, di mana oksigen pada suhu sekitar 1500–1600 °C mengoksidasi karbon, silikon, dan pengotor lain yang memiliki afinitas oksigen lebih tinggi daripada nikel. Berdasarkan prinsip termokimia yang dijelaskan melalui Diagram Ellingham, gas CO yang terbentuk akan terlepas, sedangkan oksida pengotor akan masuk ke dalam slag. Gerakan “*shaking*” mempercepat pencampuran dan reaksi,

sehingga kadar karbon dan unsur pengotor dapat diturunkan tanpa banyak kehilangan nikel (Jujur, 2005).

Riset penambahan FeCr dilakukan setelah proses dekarburisasi pada 15 ton cairan FeNi di *shaking converter* (Jujur, 2005). Dari jumlah tersebut, disisakan 7 ton FeNi untuk tahap pemaduan di industri *smelter* FeNi Pomalaa, Sulawesi Tenggara. Optimasi proses pemaduan mempertimbangkan kondisi di *shaking converter*, termasuk penambahan *flux* dan oksidator untuk menjaga temperatur tinggi serta pengadukan yang merata. Penambahan 200 kg ferosilikon (FeSi) dilakukan untuk memicu reaksi eksotermis yang menaikkan temperatur cairan, sehingga FeCr dapat larut dengan baik. Selanjutnya, 1750 kg FeCr ditambahkan bersamaan dengan peniupan oksigen selama 30 menit, sambil *shaking converter* digoyang untuk mempercepat reaksi. Tabel 3.1 memperlihatkan FeCr terlarut secara optimal dengan peningkatan kadar kromium yang signifikan.

**Tabel 3.1** Komposisi kimia sebelum dan sesudah penambahan FeCr (%) (Jujur, 2005)

Komposisi Kimia	Sebelum	Sesudah
C	0,02	0,06
Ni	20,24	15,63
Co	0,33	0,12
Mn	0,03	0,07
Cr	0,86	13,22
Si	0,11	0,45
P	0,00	0,04
S	0,01	0,01
Cu	0,01	0,01
Fe	<i>Bal.</i>	<i>Bal.</i>

Hasil riset berupa paduan Fe-Ni-Cr ini telah diuji coba di beberapa industri peleburan *stainless steel* lokal. Tanggapan yang diperoleh sangat positif, karena paduan tersebut terbukti lebih mudah diolah dan lebih efisien digunakan dalam tanur industri untuk menghasilkan *stainless steel* dengan standar komersial. Akan tetapi, pada saat itu kebijakan pendukung belum tersedia, sehingga hasil riset ini belum dapat diterapkan secara luas dan dimanfaatkan oleh industri. Hasil riset yang telah dilakukan berkontribusi menghasilkan teknologi pemaduan bahan baku *stainless steel* skala industri untuk meningkatkan nilai tambah bahan baku FeNi.

### **1. Peningkatan Kinerja SS 316L dan Titanium Berbasis Bahan Lokal untuk Aplikasi Medis Berstandar Internasional**

Pengurangan oksida terlarut dalam paduan SS 316L, khususnya untuk aplikasi material medis, sangat penting untuk meningkatkan kekuatan mekanis dan biokompatibilitas. Riset ini menggunakan fasilitas dapur induksi berkapasitas 100–250 kg di PT Zenith Allmart Precisindo. Proses induksi menghasilkan pengadukan alami (*electromagnetic stirring*) yang membantu homogenisasi komposisi, namun tidak berfungsi sebagai tahap pemurnian. Karena itu, pemilihan dan perhitungan bahan baku menjadi tahap krusial sebelum pengecoran.

Sebelum proses peleburan, dilakukan pengujian awal untuk menentukan komposisi kimia dan kualitas bahan baku, sehingga kebutuhan elemen paduan dapat dihitung dengan tepat. Proses pengecoran umumnya menggunakan kombinasi skrap *stainless steel* 2205 dan FeNi dari Pomalaa sebagai bahan dasar, yang kemudian dipadukan dengan elemen paduan tambahan agar memenuhi standar medis F 138 dari SS 316L. Komposisi sesuai

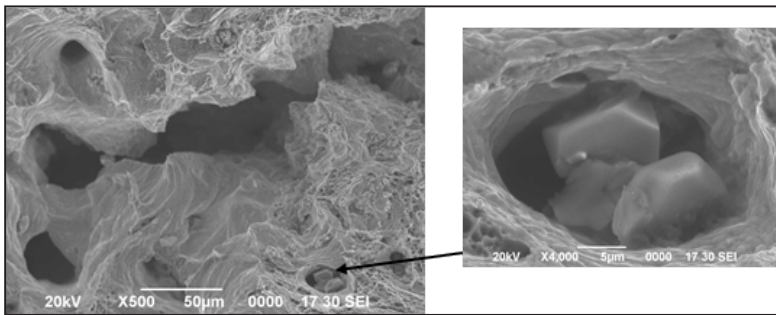
standar telah berhasil dicapai dengan melakukan pemilihan bahan baku (Jujur et al., 2015).

Selama proses peleburan, komposisi kimia harus dipastikan sesuai dengan standar SS 316L. Untuk itu, dilakukan pengambilan sampel logam cair yang kemudian diuji menggunakan spektrofotometer guna memverifikasi kesesuaian hasil pemaduan dengan spesifikasi. Hasilnya paduan SS 315L ASTM F 138.

Walaupun komposisi kimia hasil peleburan sudah sesuai standar, tetapi kekuatan mekanis belum mencapai nilai standar ASTM F 138, terutama nilai elongasinya (Jujur et al., 2015). Dalam aplikasinya, menurut dokter ortopedi duktilitas diperlukan karena implan memerlukan pembentukan yang menyesuaikan dengan kondisi tulang yang disambungkan, sehingga nilai elongasi tidak boleh rendah. Selanjutnya, riset mengkaji proses hubungan antara pemilihan bahan baku dan kekuatan serta mikrostruktur SS 316L menggunakan bahan baku FeNi dari Pomalaa sebagai unsur paduan utama (Jujur et al., 2015). Dua komposisi peleburan disiapkan dari skrap *stainless steel* jenis 2205 dan 316L. Keduanya umumnya memenuhi komposisi kimia sesuai standar ASTM F138 dan ISO 5832-1 untuk implan tulang. Hasilnya menunjukkan performa mekanik penggunaan skrap jenis 2205 yang lebih unggul dibandingkan dengan 316L, ditandai dengan kekuatan tarik dan luluh yang lebih tinggi, elongasi yang lebih besar, serta kekerasan yang lebih tinggi. Analisis mikrostruktur menggunakan mikroskop optik dan SEM-EDS mengungkap adanya berbagai inklusi oksida dalam kedua spesimen, terutama dalam bentuk segitiga, heksagonal, dan bulat, yang tersusun dari senyawa  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , dan  $CaO$ . Inklusi oksida yang lebih banyak ditemukan pada sampel menggunakan skrap 316L dikaitkan dengan penurunan

sifat mekanik akibat terbentuknya *microvoids* dan retakan di sekitar fasa oksida, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.1. Kehadiran fasa  $\alpha$ -*ferrite* pada penggunaan skrap 2205 juga diduga berkontribusi terhadap penyempurnaan ukuran butir dan peningkatan kekuatan mekanik (Jujur et al., 2015).

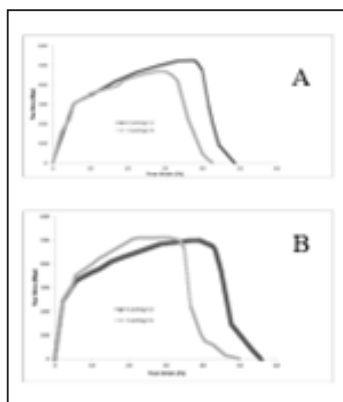
Hasil studi ini menegaskan pentingnya pengendalian pembentukan inklusi oksida selama proses peleburan dan pemaduan untuk memenuhi kriteria material kelas medis. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan potensi besar pemanfaatan sumber daya dalam negeri untuk memproduksi *stainless steel* 316L berkualitas medis.



**Gambar 3.1** Inklusi oksida dalam patahan uji tarik SS 316L (Jujur et al., 2015)

Mengingat elongasi belum sesuai dengan standar ASTM F 138, telah dilakukan riset mengevaluasi pengaruh penambahan unsur niobium (Nb) terhadap sifat mekanik dan ketahanan korosi *stainless steel* 316L kelas medis yang diproduksi menggunakan bahan baku lokal FeNi Pomalaa. Nb dipilih karena sudah dikenal sebagai elemen penghalus butir di dalam baja. Dua komposisi uji, yaitu tanpa Nb dan dengan Nb, dianalisis dari aspek kekerasan, kekuatan tarik, elongasi, serta laju korosi dalam media simulasi

cairan tubuh. Hasil menunjukkan seperti terlihat pada Gambar 3.2, penambahan Nb mampu meningkatkan kekerasan hingga 6%, kekuatan tarik sebesar 7,7%, serta elongasi hingga 8,7% sebelum perlakuan panas, dan sekitar 5% setelah perlakuan panas. Peningkatan ini berkaitan dengan pembentukan presipitat karbonitrida Nb(C,N) yang berfungsi sebagai penghambat pergerakan dislokasi dan pertumbuhan butir selama perlakuan panas. Namun, di sisi lain, penambahan Nb menyebabkan penurunan ketahanan korosi secara signifikan, di mana laju korosi meningkat lebih dari 15 kali lipat dibandingkan baja tanpa Nb, terutama setelah perlakuan panas (Jujur et al., 2021).



**Gambar 3.2** Grafik tegangan-regangan pengaruh penambahan Nb, sebelum (A) dan sesudah perlakuan panas (B) (Jujur et al., 2021).

Studi ini menegaskan bahwa Nb efektif sebagai unsur paduan penguat struktur mikro dan peningkat elongasi, tetapi berdampak negatif terhadap ketahanan terhadap korosi. Oleh karena itu, aplikasi penambahan Nb pada *stainless steel* 316L kelas medis

harus mempertimbangkan kompromi antara kekuatan mekanik dan ketahanan korosi, terutama untuk penggunaan implan jangka panjang di lingkungan biologis yang agresif.

Riset sebelumnya melaporkan bahwa pemasangan *porous plug* dengan aliran argon sebelum *tapping* mampu meningkatkan umur *lining*, kebersihan baja, serta kinerja pengecoran di dapur induksi dengan kapasitas 1 ton (Terrazas et al., 2020). Aliran argon melalui gas diffuser mampu menurunkan kandungan oksigen, sekaligus menurunkan kandungan inklusi oksida di dalam cairan baja.

Penerapan teknik difusi gas argon selama proses peleburan *stainless steel* 316L terbukti memberikan pengaruh signifikan terhadap kualitas logam cor, baik dari segi kekuatan mekanik maupun kebersihan metalurgi. SS 316L yang dibuat dari bahan baku lokal dan dicor menggunakan metode *investment casting* dalam dapur induksi, menunjukkan peningkatan sifat mekanik terutama nilai elongasi yang konsisten setelah diberi perlakuan penyemburan argon melalui diffuser berlubang, seperti terlihat pada Tabel 3.2.

**Tabel 3.2** Hasil uji tarik SS 316L setelah perlakuan gas *diffuser*

	Kekuatan Luluh (MPa)	Kekuatan Puncak (MPa)	elongasi
ASTM F 138	Min 190	Min 490	Min 40
ISO 5832-1	Min 190	490-690	Min 40
Hasil Riset	270	521	45

Inklusi kompleks yang mengandung  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , dan  $CaO$  berkurang secara signifikan. Secara keseluruhan, penerapan gas

argon dengan metode difusi terbukti efektif dalam meningkatkan kebersihan logam cair dan memperbaiki sifat mekanik SS 316L (Jujur et al., 2022). Hasil riset yang telah dilakukan berkontribusi menghasilkan teknik pemurnian peleburan paduan *stainless steel* yang sederhana dan ekonomis, namun mampu menurunkan kandungan oksigen dan inklusi secara efisien, sehingga sangat potensial diterapkan dalam produksi *stainless steel* berkualitas tinggi untuk aplikasi di bidang medis.

Riset selanjutnya membandingkan kinerja tribologis SS 316L sebagai komponen *total hip-joint arthroplasty (THA)*, dengan keramik alumina terhadap permukaan *Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE)* dalam kondisi kering menggunakan metode *pin-on-disk*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kehilangan volume dan laju aus UHMWPE akibat kontak geser dengan alumina (1,948 mg) sedikit lebih rendah dibandingkan dengan SS 316L (1,986 mg), yang mengindikasikan potensi alumina untuk meningkatkan umur pakai komponen bantalan, menunjukkan bahwa alumina cenderung menyebabkan erosi permukaan yang lebih rendah dibandingkan dengan 316L. Temuan ini menegaskan pentingnya sifat morfologi dan kekerasan material pasangan dalam memengaruhi laju aus, gaya kontak, dan koefisien gesek pada aplikasi implan sendi (Jujur et al., 2023).

Pengembangan paduan Ti-6Al-4V ELI sebagai material implan tulang dan gigi dimulai dari skala laboratorium menggunakan dapur *arc-melting*, dengan bahan lokal Al murni dari ingot Inalum. Riset mengevaluasi pengaruh perlakuan panas *solution treatment* pada berbagai temperatur (850°C, 950°C, 1050°C) terhadap mikrostruktur dan kekerasan mikro paduan Ti-6Al-4V ELI. Hasil pemaduan menunjukkan terbentuknya mikrostruktur Widmanstätten dengan campuran fasa  $\alpha$  dan  $\beta$ , di

mana distribusi aluminium lebih dominan pada fasa  $\alpha$  sedangkan vanadium pada fasa  $\beta$ . Nilai kekerasan mikro Vickers meningkat seiring kenaikan temperatur perlakuan, mencapai optimum 452 HV pada 950°C akibat pembentukan martensit  $\alpha'$ , kemudian sedikit menurun pada 1050°C. Perlakuan *solution treatment* diikuti pendinginan cepat dan penuaan terbukti mampu meningkatkan sifat mekanik, sehingga kondisi perlakuan pada 950°C direkomendasikan untuk mendapatkan kombinasi mikrostruktur dan kekerasan terbaik (Damisih et al., 2018).

Riset tentang perlakuan *solution treatment* terhadap ketahanan korosi paduan Ti-6Al-4V ELI hasil cor memberikan hasil bahwa ketahanan korosi terbaik diperoleh pada 950 °C dengan laju korosi 0,093 mmpy, terkait dengan dominasi fasa  $\beta$  yang menguntungkan pembentukan lapisan pasif pelindung. Studi ini menegaskan bahwa variasi temperatur *solution treatment* berpengaruh signifikan pada transformasi fasa dan sifat akhir Ti-6Al-4V ELI untuk aplikasi implan biomedis (Azahra et al., 2024).

Riset mengkaji pengaruh variasi temperatur penuaan (400, 500, 600, dan 700°C) terhadap kekerasan dan ketahanan korosi paduan cor Ti-6Al-4V ELI menunjukkan bahwa struktur martensit acicular  $\alpha'$  yang terbentuk pasca pendinginan cepat berubah menjadi campuran lamelar  $\alpha$  dan  $\beta$  selama proses penuaan, dengan persentase fasa  $\beta$  meningkat seiring kenaikan temperatur. Kekerasan tertinggi sebesar 563 HVN diperoleh pada penuaan 600°C akibat presipitasi  $\alpha_2$  yang optimal, sedangkan ketahanan korosi terbaik (laju korosi 0,016 mmpy) terjadi pada penuaan 700°C karena kandungan fasa  $\beta$  tertinggi (32,5%). Variasi temperatur penuaan terbukti dapat digunakan untuk mengoptimalkan sifat mekanik dan ketahanan korosi implan berbasis Ti-6Al-4V ELI (Jujur et al., 2024).

Proses pewarnaan permukaan material implan Titanium diperlukan oleh para dokter spesialis ortopedi dan bedah mulut untuk lebih mudah membedakan penggunaannya disamping meningkatkan biokompatibilitasnya. Telah dilakukan riset mengkaji pengaruh proses *anodizing* dengan variasi tegangan terhadap warna permukaan dan ketahanan korosi paduan Ti-6Al-4V. Hasil menunjukkan bahwa *anodizing* menghasilkan variasi warna emas (10 V), biru tua (20 V), dan biru muda (30 V) akibat perubahan densitas pori dan ketebalan lapisan oksida, yang masing-masing mencapai 198,6 nm, 435,5 nm, dan 1199 nm. Uji polarisasi menunjukkan bahwa ketahanan korosi meningkat seiring bertambahnya ketebalan lapisan. Proses *anodizing* terbukti memberikan manfaat ganda berupa pewarnaan permukaan untuk identifikasi implan serta peningkatan ketahanan korosi tanpa mengubah sifat mekanik material (Saraswati et al., 2020). Hasil riset yang telah dilakukan berkontribusi menghasilkan rekayasa struktur mikro paduan titanium untuk meningkatkan kekuatan mekanis dan ketahanan korosinya serta metode pewarnaan melalui *anodizing*.

## **2. Karakterisasi Biokompatibilitas SS 316L dan Titanium Berbasis Bahan Lokal untuk Aplikasi Medis**

Uji pra-klinis hasil pengembangan material medis SS 316L dilakukan bekerja sama dengan periset dari RS Kedokteran Hewan IPB. Uji *in-vivo* meliputi uji iritasi, uji toksisitas dan uji inflamasi.

Uji *in-vitro* sitotoksitas SS 316L dilakukan secara tidak langsung menggunakan sel *mesenkimal* manusia dan sel *endotel arteri pulmonalis koroner* (CPAEC) pada dua sampel, yaitu produksi Zenith/BRIN dan impor *Syntes*. Hasil menunjukkan pada hari ke-7 (Tabel 3.3), material Zenith/BRIN memiliki

persentase viabilitas sel lebih tinggi dibandingkan dengan *Syntes*, sedangkan pada hari ke-14 keduanya menunjukkan viabilitas yang sama.

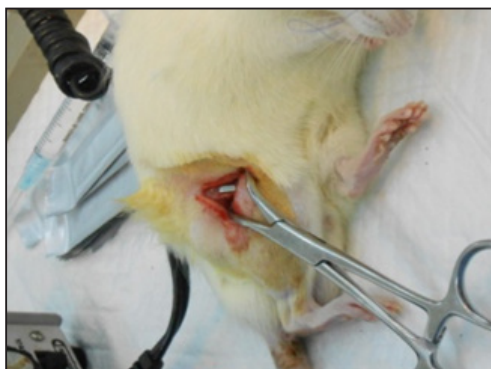
**Tabel 3.3** Hasil pemeriksaan MTT Assay (Gustian et al, 2018)

D7 ppm	Pengulangan (prosentase)			Rata- rata	% Inhibisi	% Viabilitas OD I
	OD I	OD II	OD III			
Zenith	0.523	0.493	0.450	0,489	Zenith	0.523
<i>Syntes</i>	0.350	0.444	0.354	0.382	<i>Syntes</i>	0.350
Kontrol Sel	0.406	0.422	0.417	0.415	Kontrol Sel	0.406

Hasil pemeriksaan *hemositometer* dilakukan dengan metode langsung, di mana material secara langsung direndam pada media pertumbuhan yang telah mengandung sel kultur. Hasilnya menunjukkan adanya perbedaan hasil persen viabilitas pada pengujian *hemositometer* (Gustian et al., 2018). Persen viabilitas menunjukkan persentase sel yang hidup selama pengujian. Urutan rata-rata persen viabilitas adalah kelompok sampel Zenith lebih tinggi daripada sampel *Syntes*, sedangkan menurut jumlah sel yang hidup, sampel material dari Zenith memiliki sel hidup yang lebih tinggi.

Riset mengevaluasi biokompatibilitas SS 316L lokal Indonesia sebagai bahan implan metal tidak terserap tubuh melalui uji profil darah *in-vivo* pada tikus putih. Tiga puluh ekor tikus jantan strain *Sprague Dawley* dibagi menjadi tiga kelompok perlakuan, yaitu kontrol tanpa implan, implan dengan *stainless steel* 316L impor, dan implan dengan *stainless steel* 316L lokal yang dikembangkan oleh Zenith/BRIN. Material

implan ditanamkan secara aseptik pada tulang femur tikus, dan dilakukan pemeriksaan darah lengkap sebelum serta 30 hari setelah implantasi, seperti terlihat pada Gambar 3.3. Hasil penelitian menunjukkan tidak terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik pada parameter hematologi seperti jumlah eritrosit, hemoglobin, hematokrit, MCV, MCH, MCHC, jumlah leukosit, dan diferensial leukosit antar kelompok. Hal ini mengindikasikan bahwa implan SS 316L lokal maupun impor tidak memicu respon sistemik negatif pada hewan uji (Gustian et al., 2018).



**Gambar 3.3** Penanaman implan pada femur kanan ekstremitas belakang (Gustian et al., 2018)

Riset mengevaluasi pengaruh variasi temperatur perlakuan panas *solution treatment* terhadap biokompatibilitas paduan Ti-6Al-4V ELI melalui uji *in-vivo* pada tulang femur tikus *Sprague Dawley*, bekerja sama dengan periset FKG UI. Sebanyak 12 ekor tikus dibagi menjadi enam kelompok, termasuk kontrol, kelompok cacat tulang tanpa implan, dan kelompok dengan implan hasil cor maupun yang diberi perlakuan panas. Setelah

30 hari, analisis histologi menggunakan *modified Salkeld score* menunjukkan bahwa semua kelompok implan, baik as-cast maupun perlakuan panas, memiliki skor rata-rata 2–2,5, yang mencerminkan pembentukan jaringan *fibrosa*, *fibrocartilage*, dan *kartilago* termineralisasi di sekitar implan. Tidak ditemukan perbedaan signifikan tingkat regenerasi dan maturasi tulang antar variasi temperatur perlakuan panas, sehingga seluruh kondisi perlakuan menunjukkan biokompatibilitas setara dengan proses regenerasi tulang normal (Jujur et al., 2020). Hasil riset yang telah dilakukan berkontribusi menghasilkan paduan SS 316L dan Ti-6Al-4V ELI yang mempunyai karakteristik biokompatibilitas sesuai kebutuhan material medis.

## **B. Rekayasa Implan Tulang dan Gigi Berbasis SS 316L dan Titanium**

### **1. Optimasi teknologi produksi implan tulang dan gigi**

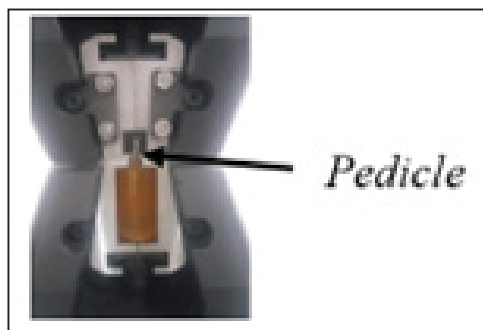
Riset optimasi teknologi produksi implan tulang ini difokuskan pada proses *investment casting*. Proses diawali dengan pemilihan jenis implan tulang traumatik yang akan diproduksi, diikuti perancangan desain produk secara digital menggunakan perangkat lunak 3D CAD. Desain tersebut kemudian dianalisis melalui simulasi desain pengecoran (*casting design*) untuk mengoptimalkan aliran logam cair dan meminimalkan potensi cacat produk. Selanjutnya, pola lilin dibentuk sesuai desain, lalu dilapisi bertahap dengan keramik hingga membentuk cetakan yang kokoh. Pada tahap akhir, setelah rongga cetakan dipanaskan, kemudian diisi logam cair untuk membentuk implan tulang. Seluruh proses dilakukan menggunakan fasilitas

PT. Zenith Allmart Precisindo, yang memungkinkan kontrol kualitas presisi pada setiap tahap produksi.

Pola lilin yang telah dibentuk harus disusun dalam satu rangkaian tangkai (*tree assembly*) sebelum proses pelapisan keramik dilakukan. Desain tangkai pengecoran ini dibuat berdasarkan kombinasi antara pengalaman praktis dan hasil simulasi casting. Optimasi ini mampu meningkatkan efisiensi produksi, satu tangkai dapat menghasilkan antara 60 hingga 80 keping implan tulang dalam sekali cor, dibandingkan sebelumnya hanya 16 keping. Untuk memastikan kualitas hasil pengecoran, dilakukan uji *non-destruktif* (NDT) guna mendeteksi cacat internal seperti porositas. Hasil uji NDT, *X-ray diffraction* (XRD) dan/atau radiografi neutron memperlihatkan tidak adanya cacat coran (Jujur et al., 2019).

Kegiatan rancang bangun implan tulang belakang memanfaatkan pengalaman riset sebelumnya pada paduan titanium Ti-6Al-4V ELI, dan dilaksanakan melalui kolaborasi antara PT. Zenith Allmart Precisindo serta dokter spesialis ortopedi dari FKUI/RSCM. Berdasarkan kebutuhan klinis, fokus pengembangan diarahkan pada bagian torako-lumbar dari ruas tulang belakang, yang merupakan area dengan permintaan implan tertinggi. Kebaruan desain terletak pada komponen skrup pedikal (*pedicle screw*) yang dirancang memiliki ketahanan pull-out lebih baik dibandingkan dengan implan impor. Untuk membuktikan hal ini, dilakukan pengujian kekuatan tarik lepas (*pull-out strength*) pada sekrup pedikel titanium dengan variasi diameter inti ulir, menggunakan tulang sapi sebagai model uji, seperti terlihat pada Gambar 3.4. Hasil riset menunjukkan bahwa peningkatan diameter inti ulir secara signifikan meningkatkan kekuatan tarik lepas, yang berkorelasi langsung dengan luas kontak antara ulir sekrup dan jaringan tulang. Temuan ini

memberikan panduan penting dalam perancangan sekrup pedikel guna meningkatkan stabilitas fiksasi pada prosedur ortopedi khususnya implan tulang belakang (Damisih et al., 2023).



**Gambar 3.4** Uji pull-out *pedicle screw* implan tulang belakang, standar ASTM F1839-08

Pengalaman ini kemudian diperluas pada pengembangan teknologi pembuatan komponen batang femur, yang dilakukan di PT. Itokoh Ceperindo memanfaatkan bahan baku paduan titanium Ti-6Al-7Nb impor dari Jepang. Bahan tersebut dilebur menggunakan fasilitas industri *vacuum arc-melting* dan dibentuk melalui proses *investment casting* secara sentrifugal. Penelitian ini mengkaji pengaruh perlakuan panas terhadap mikrostruktur dan sifat mekanik paduan. Hasilnya menunjukkan bahwa perlakuan larutan (*solution treatment*) pada 970°C selama 1 jam, diikuti pendinginan cepat dan penuaan pada 500°C selama 8 jam, menyebabkan penyusutan koloni lamelar  $\alpha$  dan peningkatan fasa  $\beta$ . Transformasi ini menurunkan kekerasan mikro dari 396,2 HV menjadi 377,2 HV, yang mengindikasikan perubahan sifat mekanik akibat konversi fasa  $\alpha$  menjadi  $\beta$  (Maharani et al., 2020).

Variasi temperatur *solution treatment* pada 850°C, 970°C, dan 1050°C menunjukkan bahwa 970°C memberikan keseimbangan optimal antara kekuatan tarik (690 MPa) dan ketahanan korosi terbaik (0,00826 mmpy). Kondisi ini dihasilkan dari presipitat  $\alpha$  halus yang merata serta lapisan oksida pasif homogen. Sebaliknya, temperatur 1050°C menghasilkan kekerasan tertinggi (458 HV) namun menurunkan kekuatan tarik dan meningkatkan laju korosi akibat presipitasi  $\alpha'$  kasar dan tidak merata (Saudi et al., 2025).

Pengaruh variasi waktu penuaan (4, 6, dan 8 jam) pada paduan Ti-6Al-7Nb menunjukkan bahwa penuaan 8 jam menghasilkan butir paling halus (327,87  $\mu\text{m}$ ), fraksi  $\alpha$  tertinggi (~95%), dan ketahanan korosi terbaik (0,0023 mpy). Semua sampel menunjukkan perilaku pasivasi stabil dalam larutan cairan tubuh buatan (SBF), tetapi butir yang lebih halus dan lapisan oksida padat pada penuaan 8 jam memberikan perlindungan korosi paling optimal, menjadikannya kondisi paling potensial untuk aplikasi implan ortopedi (Oktikawati et al., 2024).

Evaluasi ketahanan lelah (*fatigue*) pada batang femur Ti-6Al-7Nb hasil centrifugal *investment casting* memperlihatkan kemampuan bertahan pada siklus tinggi sebelum gagal, dengan retakan awal umumnya muncul di area konsentrasi tegangan. Analisis *fractography* menunjukkan pola patah lelah khas logam berupa *beach marks* dan *striations*. Hal ini menandakan bahwa meskipun ketahanan lelahnya sudah memadai, optimasi desain dan perlakuan panas lanjutan masih dapat meningkatkan umur pakai implan (Saudi et al., 2022).

Riset selanjutnya kondisi *as-cast* batang femur paduan Ti-6Al-7Nb memiliki batas kelelahan yang cukup, namun lebih rendah dibandingkan dengan material hasil perlakuan panas. Faktor penyebabnya meliputi porositas mikro dan

heterogenitas struktur akibat proses pengecoran. Hasil analisis patahan dengan SEM memperlihatkan *striations* dan *beach marks* yang menandakan pertumbuhan retak bertahap. Studi ini menegaskan bahwa meskipun paduan Ti-6Al-7Nb as-cast layak untuk aplikasi implan, peningkatan sifat kelelahan dapat dicapai melalui pengendalian mikrostruktur dan pengurangan cacat pengecoran (Taqwatomo et al., 2024). Hasil-hasil riset ini memberikan peluang untuk pemanfaatan pembuatan komponen batang femur sebagai komponen THA di industri lokal.

Pengembangan teknologi kunci pembuatan komponen implan gigi dimulai dengan rekayasa permukaan titanium murni (CP-4) sebagai material pengganti akar gigi (*fixture*). Riset skala laboratorium telah berhasil membuat kekasaran permukaan implan 1-2 mikron agar sel osteoblast tulang mudah tumbuh dan berkembang untuk mewujudkan osseointegrasi. Hasil riset ini telah dikembangkan menjadi skala industri di PT. Pudak Scientific menjadi bagian dari proses produksi pembuatan implan gigi.

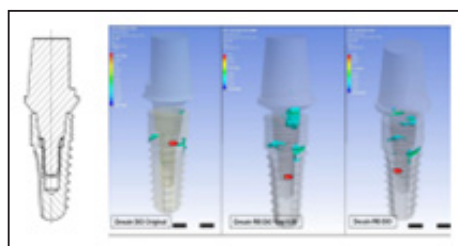
Jarak *sand blasting* dan durasi etsa asam sangat memengaruhi kekasaran permukaan material titanium murni. Telah dilakukan riset untuk mengkaji pengaruh modifikasi permukaan titanium CP-4 dengan metode *sandblasted, large grit, acid-etched* (SLA) terhadap kekasaran, tekstur kristalografi, dan tegangan sisa untuk aplikasi implan gigi. Variasi jarak *sandblasting* (2, 4, 6 cm) dan durasi etsa asam (0, 30, 60 menit) dianalisis menggunakan karakterisasi kekasaran 3D dan difraksi sinar-X. Hasil menunjukkan bahwa jarak *sandblasting* yang lebih pendek meningkatkan tegangan sisa tekan dan pembentukan *hill features*, sedangkan etsa yang lebih lama menurunkan kekasaran serta mengubah orientasi kristal dominan dari arah bidang [0002] ke arah bidang [1120]. Durasi etsa 60 menit menghasilkan parameter

kekasaran yang mendekati rekomendasi paten Straumann untuk osseointegrasi optimal, memberikan wawasan penting bagi optimalisasi desain permukaan implan titanium (Adhitya et al., 2024).

Rekayasa permukaan selain dilakukan secara fisik juga telah dilakukan secara kimia dengan melakukan pelapisan hidroksiapatit yang mempunyai struktur menyerupai tulang. Riset membahas optimasi parameter *electrophoretic deposition* (EPD) untuk pelapisan hidroksiapatit pada titanium murni untuk meningkatkan ketahanan korosi dan bioaktivitas untuk aplikasi implan. Metode EPD dilakukan pada tegangan 20, 30, dan 40 V selama 30 menit dalam suspensi HA/DMF. Hasil menunjukkan bahwa tegangan 30 V menghasilkan lapisan HA paling kompak dengan ketebalan  $\pm 50 \mu\text{m}$ , ketahanan polarisasi sepuluh kali lebih tinggi, dan arus korosi sepuluh kali lebih rendah dibanding tegangan lainnya (Rahmadani et al., 2020). Riset lainnya menghasilkan bahwa lapisan dengan rasio Ca/P 1,82 berhasil terbentuk merata, dengan ketebalan bertambah seiring tegangan. Tegangan 30 V menghasilkan lapisan paling padat, memiliki ketahanan polarisasi sepuluh kali lebih tinggi, arus korosi terendah, serta stabil dalam larutan tubuh simulasi selama 28 hari. Sebaliknya, lapisan pada 20 V lebih berpori, sedangkan 40 V menghasilkan retakan dan mudah terlepas dalam media fisiologis. Tegangan 30 V merupakan parameter optimal untuk menghasilkan lapisan HA yang stabil, tebalnya sesuai standar implan, dan memiliki ketahanan korosi terbaik (Rahmadani et al., 2022).

Masukan para dokter gigi spesialis dari PDGI sangat bermanfaat dalam optimasi desain implan gigi khususnya geometri *fixture*, *abutment* dan alat pemasangnya (Alam et al., 2025). Selanjutnya, dilakukan simulasi pembebanan sesuai beban yang harus dipikul oleh desain dalam kondisi dirakit seperti terlihat pada Gambar 3.5.

Pembuatan purwarupa implan gigi menggunakan pemesinan mikro PT. Pudak dan dilanjutkan dengan rekayasa permukaannya. Pemilihan material SS 420 sebagai alat pemasang telah direkomendasikan beserta proses perlakuan panasnya untuk peningkatan kekerasannya. Hasil riset yang telah dilakukan berkontribusi menghasilkan teknologi pembuatan implan tulang dan gigi skala industri yang digunakan sebagai bagian dari *production manual* pembuatan produk industri.



**Gambar 3.5** simulasi pembebanan desain implan gigi

## 2. Optimasi kinerja Implan Tulang dan gigi

Dalam rangka meningkatkan pemanfaatan hasil produksi implan tulang SS316L dilakukan koordinasi dengan mitra dokter spesialis ortopedi, terutama mengoptimasikan desain sesuai dengan perkembangan kebutuhan pengguna. Studi klinis terhadap implan tulang traumatik berbahan *stainless steel* SS316L telah dilaksanakan di RSUPN Dr. Cipto Mangunkusumo Jakarta selama 12 bulan (Juli 2021 – Juli 2022) setelah melalui persetujuan etik dan izin lokasi. Studi ini melibatkan sembilan subjek dengan kriteria inklusi seperti usia minimal 15 tahun, fraktur tertutup pada tulang panjang atau distal radius, serta fraktur terbuka derajat satu. Subjek dengan fraktur patologis, porotik, cedera kepala, atau kelainan ekstremitas dikecualikan. Implan dipasang pada semua subjek sesuai kebutuhan klinis.

Evaluasi mencakup aspek efektivitas (melalui kekuatan fiksasi, waktu penyembuhan, dan kehadiran *metal wear debris*) serta aspek keamanan (infeksi dan reaksi jaringan), salah satu hasilnya seperti terlihat pada Gambar 3.6. Pemantauan dilakukan melalui evaluasi klinis (minggu ke-1, bulan ke-1, bulan ke-3) dan radiologis (pascaoperasi dan bulan ke-3).



**Gambar 3.6** Foto *Rontgen* subjek setelah pemasangan implan tulang

Hasil menunjukkan bahwa implan traumatik SS 316L mempunyai efektivitas yang baik dengan hanya satu kasus krepitasi dan *implant loosening* (11%) pada bulan ketiga, serta tidak ditemukan kasus *implant failure* atau *metal debris*. Tingkat penyembuhan fraktur cukup baik dengan 89% subjek mengalami *clinical* dan *radiological union* pada bulan ketiga. Dari segi keamanan, hanya satu kasus infeksi (11%) terjadi pada fraktur terbuka; fraktur tertutup tidak menunjukkan komplikasi infeksi. Tidak ditemukan reaksi jaringan lokal pada subjek lainnya. Komplikasi seperti infeksi hanya muncul pada kelompok fraktur terbuka, yang mengindikasikan hubungan antara jenis fraktur dengan risiko infeksi. Secara keseluruhan, implan SS316L dinyatakan aman dan efektif.

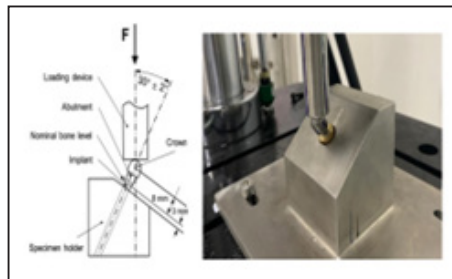
Uji untuk peningkatan tingkat kesiapan teknologi riset implan tulang belakang dilakukan dengan pengembangan teknologi material, desain, dan uji kinerja purwarupa pada lingkungan mendekati sebenarnya (Jujur et al., 2020). Kegiatan yang dilakukan ini berupa uji kinerja dan praklinis pemasangan purwarupa implan sekrup pedikel tulang belakang pada kadaver manusia yang melibatkan dokter spesialis Ortopedi dan Traumatologi, konsultan Spine di RSUPN dr. Cipto Mangunkusumo. Riset dilakukan di RSUPN dr. Cipto Mangunkusumo, Jakarta. Lokasi uji di KSM Ortopedi dan Traumatologi Klinik, KSM Radiologi Klinik, Instalasi Forensik dan Pemulasaran Jenazah dan Laboratorium Anatomi Fakultas Kedokteran Universitas Indonesia, Jakarta.

Melalui beberapa perbaikan desain *pedicle screw* (Damisih et al., 2023) telah dilakukan 2 kali uji, pada 1 dan 3 kadaver, seperti terlihat pada Gambar 3.7. Uji kadaver ke-2 telah merekomendasikan bahwa purwarupa ini bisa dilanjutkan ke uji klinik. Saat ini adalah tahap pengoperasian, dimana PT. Zenith Allmart Precisndo telah mendapatkan pendanaan Fasilitas Pengujian Produk Inovasi Kesehatan dari Kedeputian Fasilitas Riset dan Inovasi-BRIN. Pengujian ini telah mengantongi Perijinan Pelaksanaan Uji Klinik dari Kementerian Kesehatan.



**Gambar 3.7** Uji praklinik pada kadaver di Laboratorium Anatomi FKUI/RSCM

Implan gigi berfungsi untuk menahan beban berulang karena digunakan untuk mengunyah, sehingga diperlukan uji kelelahan (*fatigue*) purwarupa. Gambar 3.8 memperlihatkan proses uji *fatigue*, menggunakan protokol standar ISO 14801. Sampel yang mengalami pembebanan siklik dengan nilai maksimum masing-masing 90, 80, 70 dan 60% dari nilai rata-rata beban statik, didapatkan gagal antara 34.222, 105.570 dan 187.500 siklus. Sampel yang dikenai beban 60% bertahan dengan total 5.000.000 siklus. Hasil ini menunjukkan bahwa purwarupa lolos uji *fatigue* sesuai standar ISO 14801.



**Gambar 3.8** Uji *Fatigue* implan gigi

Uji kinerja purwarupa implan gigi Titanium dilakukan bersama 3 orang dokter spesialis dari PDGI, menggunakan model seperti terlihat pada Gambar 3.9. Pemilihan dan perlakuan panas material untuk alat pemasang *fixture* dan *abutment* sangat memengaruhi kinerjanya. Kegagalan uji kinerja purwarupa tahap pertama diperbaiki setelah dilakukan pengerasan permukaan (*case hardening*) pada bahan SS 420 sebagai material alat pasanganya.



**Gambar 3.9** Uji kinerja purwarupa implan gigi pada model

Osseointegrasi merupakan teknologi kunci dalam pengembangan implan gigi, oleh karena itu, diperlukan uji *in-vivo* untuk melihat kinerja purwarupa pada lingkungan mendekati sebenarnya. Pengujian *push-in* dan *pull-out* ini dilakukan untuk mengetahui tingkat osseointegrasi dari tulang tibia kelinci terhadap skrup implan gigi (*fixture*), skrup ditanamkan selama tiga bulan di tulang oleh tim di Universitas Padjadjaran. Hasil pengujian osseointegrasi lebih baik daripada implan gigi impor. Hal ini membuktikan bahwa pengembangan teknologi kunci telah berhasil sehingga menaikkan tingkat kesiapan teknologi pembuatan implan gigi. Selanjutnya, masuk ke tahap pengoperasian bersama industri mitra PT. Pudak Scientific dan PT. Mitra Sejati untuk memperoleh sertifikat Cara Pembuatan Alat Kesehatan yang Baik (CPAKB) sebagai syarat utama

pengajuan Perijinan Pelaksanaan Uji Klinik dari Kementerian Kesehatan.

Riset dalam bidang *additive manufacturing* dan rekayasa permukaan telah dilakukan untuk mengkaji pengaruh desain berpori pada *scaffold* kubik Ti-6Al-4V untuk implan mandibula melalui simulasi *finite element analysis* (FEA). Studi ini menemukan bahwa ukuran pori 800  $\mu\text{m}$  dan 850  $\mu\text{m}$  memberikan kombinasi optimal antara kekuatan, efisiensi material, dan keamanan, bahkan pada densitas di bawah 35% jika diproduksi dengan metode *bound metal deposition* (BMD) (Saleh et al., 2025). Temuan ini menjadi landasan penting bagi pengembangan implan kustom presisi, dengan tahap lanjut meliputi uji beban siklik dan biokompatibilitas untuk memastikan performa jangka panjang. Hasil riset yang telah dilakukan berkontribusi menghasilkan teknologi pengujian kinerja purwarupa yang sesuai dengan peraturan berlaku sehingga layak menjadi produk implan tulang dan gigi skala komersial.

#### **IV. IMPLIKASI STRATEGIS IMPLAN TULANG DAN GIGI TERHADAP KEUNGGULAN INSTITUSI RISET**

Pengembangan teknologi pembuatan material medis berbahan baku lokal dan perekayasaan implan tulang serta gigi melalui kerja sama strategis dengan pihak industri memiliki implikasi yang luas terhadap penguatan keunggulan institusi riset. Sinergi ini tidak hanya menghasilkan kontribusi ilmiah yang bermakna dan inovasi teknologi yang aplikatif, tetapi juga memperkuat relevansi sosial-ekonomi melalui peningkatan kapasitas produksi dalam negeri, pengurangan ketergantungan impor, dan penciptaan nilai tambah di sektor kesehatan.

##### **A. Pengembangan Material Medis Berbahan Baku Lokal**

Riset ini memberikan kontribusi orisinal melalui pengembangan teknologi pemaduan dan pemurnian pada proses peleburan baja tahan karat SS 316L dengan menggunakan gas diffuser. Teknologi ini mampu menghasilkan material berkualitas standar medis yang dapat diproduksi oleh industri berskala menengah. Rekayasa struktur mikro paduan Titanium Ti-6Al-4V ELI dan Ti-6Al-7Nb telah dilakukan untuk optimasi kekuatan mekanis dan ketahanan korosi. Paduan SS 316L dan Titanium yang dihasilkan telah lolos uji *in-vitro* dan *in-vivo*, menunjukkan karakteristik biokompatibilitas yang sangat baik untuk aplikasi implan tulang. Hasil ini memperkuat peran institusi riset sebagai pusat pengembangan teknologi kesehatan, yang mampu menghasilkan material medis sesuai standar global dengan harga yang kompetitif.

## **B. Perencanaan Implan Tulang dan Gigi**

Rancang bangun implan tulang traumatik berbahan SS 316L dilakukan melalui optimasi proses pengecoran *investment casting* dengan pendekatan simulasi *casting layout*. Metode ini memungkinkan produksi massal yang efisien, sehingga dapat menurunkan biaya produksi pada skala industri. Di sisi lain, hasil riset teknologi kunci rekayasa permukaan yang awalnya dikembangkan di skala laboratorium telah berhasil diterapkan sebagai *production manual* di skala industri, sebagai upaya penguatan teknologi produksi implan gigi berbahan titanium. Kedua capaian ini memperkuat peran institusi riset dalam mendorong kemandirian dan daya saing industri implan tulang dan gigi.

## **C. Implikasi Strategis Terhadap Institusi Riset**

Gabungan riset pengembangan material medis berbahan lokal dan perencanaan implan tulang serta gigi di industri alat kesehatan nasional memperkuat peran institusi riset sebagai pelopor pengembangan material maju di bidang ini. Hasil riset tidak hanya memenuhi standar internasional (misalnya ASTM F138 untuk SS 316L) dan membuktikan kriteria biokompatibilitas serta keamanan, tetapi juga memberikan nilai tambah melalui peningkatan Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN). Capaian ini selaras dengan arah kebijakan RIRIN 2017–2045, RPJMN 2020–2024, dan Permenkes No. 17 Tahun 2017 yang menekankan pengembangan industri alat kesehatan, kemandirian teknologi, dan substitusi impor.

Dengan demikian, upaya riset ini tidak hanya menghasilkan inovasi material dan rancang bangun implan tulang serta gigi yang relevan secara klinis dan ilmiah, tetapi juga memperkuat

daya saing institusi riset sebagai pusat unggulan nasional. Pendekatan yang diambil bersifat inklusif, adaptif, dan berkelanjutan, sehingga mendukung ekosistem teknologi implan tulang dan gigi yang siap menghadapi tantangan industri dan kebutuhan layanan kesehatan di masa depan.



## **V. PELUANG DAN STRATEGI PENGEMBANGAN IMPLAN TULANG DAN GIGI NASIONAL**

Bab ini mengulas peluang dan strategi pengembangan material serta teknologi untuk mewujudkan implan tulang dan gigi yang unggul dari segi kualitas, keamanan, dan kemanfaatan. Pembahasan ini berpijak pada kecenderungan global terkini di bidang material, teknologi *additive manufacturing* pencetakan 3D, dan rekayasa permukaan, yang membuka ruang inovasi luas mulai dari tahap desain, produksi, hingga optimasi kinerja implan di dalam tubuh. Dengan memadukan potensi teknologi mutakhir dan sumber daya lokal, pengembangan ini diarahkan untuk menjawab tantangan medis masa kini sekaligus memperkuat posisi Indonesia dalam lanskap industri kesehatan dunia.

### **A. Standarisasi Material Medis Dalam Pengembangan Implan Tulang dan Gigi**

Indonesia memiliki peluang besar dalam pengembangan material *stainless steel* 316L untuk aplikasi implan tulang, didorong oleh kebutuhan domestik yang tinggi terhadap implan ortopedi, industri manufaktur lokal, serta dukungan riset dari institusi akademik dan lembaga litbang nasional. Standardisasi merupakan elemen krusial dalam pengembangan dan hilirisasi material implan tulang, terutama untuk memastikan keamanan, kualitas, dan daya saing produk dalam negeri di tengah dominasi produk impor. Sebagai biomaterial yang bersentuhan langsung dengan sistem biologis manusia, implan tulang harus memenuhi persyaratan ketat seperti biokompatibilitas, ketahanan korosi, kekuatan fatik, dan ketangguhan mekanik.

Tanpa adanya standar yang jelas, sulit menjamin bahwa produk yang dihasilkan aman dan efektif digunakan secara klinis. Oleh karena itu, penyusunan Standar Nasional Indonesia (SNI) menjadi sangat penting sebagai acuan teknis yang disepakati para pemangku kepentingan. Standar ini juga menjadi fondasi dalam membangun infrastruktur Lembaga Penilaian Kesesuaian (LPK) seperti laboratorium uji dan lembaga sertifikasi produk, serta dalam mempersiapkan kapabilitas industri nasional agar mampu memproduksi implan tulang yang sesuai dengan SNI dan siap untuk tahap komersialisasi.

## **B. Pencetakan 3D Logam untuk *Customize* dan Presisi Implan Tulang**

Pengembangan riset terkait pencetakan 3D untuk implan tulang telah dilakukan, didukung oleh ketersediaan peralatan serta fasilitas uji yang memadai. Penelitian dimulai dengan karakterisasi dasar material, seperti pengujian kekuatan mekanis dan biokompatibilitas. Pengembangan teknologi pencetakan 3D untuk menghasilkan implan yang terpersonalisasi membutuhkan kolaborasi multidisipliner. Dokter ortopedi dan dokter bedah mulut berperan penting dalam memberikan masukan berdasarkan pengalaman klinis, khususnya terkait dimensi, pembebanan, dan kebutuhan biokompatibilitas implan. Selanjutnya, para periset merancang desain implan yang mampu menanggung beban secara efektif dan dapat diproduksi secara efisien serta ekonomis. Proses desain ini sejak awal melibatkan industri pengguna, sehingga turut mendorong penguatan kapabilitas produksi di sektor industri. Purwarupa kemudian dikembangkan berdasarkan desain yang telah disepakati, dengan memanfaatkan fasilitas lembaga riset dan industri serta didukung oleh kajian

akademik dari para periset. Pada tahap ini, masukan dari para dokter spesialis kembali dibutuhkan untuk mengoptimalkan desain dan menyempurnakan purwarupa, baik berdasarkan pengalaman klinis maupun ide-ide inovatif. Seiring dengan kemajuan pengembangan, fokus riset secara bertahap berpindah dari kegiatan rekayasa menuju tahap pengujian medis, meliputi uji *in-vitro* dan *in-vivo* serta uji klinis sesuai regulasi yang berlaku.

Pengembangan implan tulang membutuhkan penerapan teknologi kunci, terutama pada tahap desain, untuk mengurangi efek *stress shielding* dan meningkatkan osseointegrasi antara implan dan jaringan tulang atau gigi. Salah satu cara penting untuk memverifikasi efektivitas desain adalah melalui uji kinerja purwarupa dengan pembebanan statis dan dinamis. Pengujian modulus elastisitas menjadi penting karena menunjukkan seberapa besar beban yang mampu ditanggung oleh implan sebelum dialirkan ke tulang di sekitarnya. Semakin rendah modulus elastisitas suatu implan, semakin besar porsi beban yang dialihkan ke tulang, sehingga mendorong pertumbuhan tulang yang lebih padat dan kuat dalam menahan beban. Disamping itu, teknologi rekayasa permukaan perlu dikembangkan untuk meningkatkan osseointegrasi. Modifikasi permukaan ini dapat dilakukan melalui pendekatan fisik, kimia, atau biologis. Salah satu pendekatan kimia yang menjanjikan adalah pelapisan hidroksiapatit melalui metode *thermal coating*. Oleh karena itu, riset mendalam terhadap teknik rekayasa permukaan menjadi bagian penting dalam keseluruhan proses pengembangan implan.

Pengembangan teknologi pencetakan 3D dan rekayasa permukaan untuk implan tulang merupakan proses yang kompleks dan multidisipliner. Salah satu tantangan utama dalam keseluruhan rantai proses ini adalah lamanya waktu pelaksanaan

di setiap tahap, yang dapat menghambat laju inovasi dan keterlambatan pemanfaatan klinis. Proses desain dan validasi memerlukan koordinasi lintas bidang antara ahli teknik, dokter spesialis, periset biomedis, dan industri manufaktur. Selain itu, tahapan uji pra-klinis seperti uji *in-vitro* dan *in-vivo* memiliki durasi yang tidak singkat karena harus memenuhi standar regulasi dan memastikan keamanan serta efektivitas produk. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan sistem yang terintegrasi yang mampu memetakan setiap proses secara detail, mengidentifikasi tahapan-tahapan kritis yang menjadi potensi hambatan, serta menghitung waktu pelaksanaan yang paling efisien. Kajian sistem ini mencakup alur kerja, pengaturan prioritas kegiatan, serta sinkronisasi lintas lembaga dan pemangku kepentingan, sehingga proses pengembangan dapat dilakukan dalam waktu yang lebih singkat tanpa mengorbankan mutu dan aspek keselamatan. Pendekatan ini penting untuk mempercepat adopsi teknologi pencetakan 3D dan rekayasa permukaan ke dalam praktik medis nasional, sekaligus mendorong kemandirian industri alat kesehatan dalam negeri.

Riset kolaboratif yang melibatkan berbagai pemangku kepentingan sejak tahap awal, mulai dari peneliti, perekayasa, dokter spesialis, hingga pelaku industri, merupakan fondasi penting dalam percepatan inovasi implan medis yang efektif dan aplikatif. Pendekatan duduk satu meja ini memungkinkan pertukaran pengetahuan lintas disiplin secara langsung, sehingga setiap keputusan desain, material, dan proses manufaktur dapat mempertimbangkan kebutuhan klinis nyata dan kesiapan teknologi industri. Di era transformasi digital, kolaborasi ini semakin diperkuat dengan pemanfaatan teknologi kecerdasan buatan, big data, dan *Internet of Things* (IoT) yang memungkinkan proses desain hingga evaluasi prototipe berjalan lebih cepat, akurat, dan berbasis data nyata. Dengan dukungan

sistem digital ini, hambatan komunikasi antarbidang dapat diurai, proses pengambilan keputusan menjadi lebih cerdas, dan potensi kegagalan dapat ditekan sejak dini.



## VI. KESIMPULAN

Kolaborasi jangka panjang antara perekayasa dengan para pengguna, termasuk dokter spesialis ortopedi dan dokter gigi, pihak industri, serta dukungan kebijakan dari Kementerian Kesehatan dan Kementerian Perindustrian, mencerminkan upaya strategis dan terarah dalam menjawab tantangan nyata di bidang kesehatan dan teknologi material medis di Indonesia. Orasi ini telah menguraikan bagaimana sinergi tersebut mendorong kemajuan riset, menghasilkan pengembangan teknologi, dan memastikan penerapannya secara efektif di industri implan tulang dan gigi, sehingga memberikan dampak yang nyata baik di ranah ilmiah maupun sosial-ekonomi.

Perolehan penting dari riset ini dalam pengembangan implan tulang dan gigi meliputi:

- Metode Produksi Implan Tulang Stainless steel Berbahan Ferronikel, paten no. IDP000065857
- Metode Proses Pemurnian Medical Grade Stainless steel 316L Dengan Meniupkan Gas Argon ke Tanur Induksi, paten no. IDP000081235
- Sistem Implan Tulang Belakang Menggunakan Skrup Pedikal Berulir Ganda yang Berkelanjutan, paten terdaftar no. P00202209494
- Implan Gigi Dengan Tiga Sudut Ruang Tulang Serta Modul Puncaknya Tertutup Erat Oleh Abutment Paten no. IDP000102656
- Kerja sama Lisensi Produksi dan Komersialisasi Implan

Tulang Stainless steel 316L, PT. Zenith Allmart Precisindo

- Kerja sama Lisensi Produksi dan Komersialisasi Plat Implan Traumatik Paduan Titanium TI-6Al-4V ELI, PT. Zenith Allmart Precisindo.
- Tahapan uji klinik implan tulang belakang sesuai peraturan Kementerian Kesehatan, sudah lolos seleksi pendanaan PPIK-LPDP dan memperoleh Persetujuan Pelaksanaan Uji Klinik dari Kementerian Kesehatan
- Tahapan uji klinik implan gigi sesuai peraturan Kementerian Kesehatan, industri mitra sedang mengurus sertifikat Cara Pembuatan Alat Kesehatan yang Baik (CPAKB).

## VII. PENUTUP

Indonesia dianugerahi sumber daya nikel yang melimpah. Kini, saatnya potensi ini dimaksimalkan melalui hilirisasi cerdas, yakni pengembangan material medis *stainless steel 316L* berbasis lokal dengan nilai tambah tinggi. Tantangan ke depan adalah bagaimana material medis ini dapat dikembangkan untuk kebutuhan yang lebih luas, khususnya untuk mendukung implan tulang. Diperlukan penajaman peta jalan yang telah disusun oleh Kemenkes sesuai perkembangan teknologi, bersinergi dengan industri alat kesehatan lokal, pengguna para dokter ortopedi dan dokter gigi dan didukung oleh pusat-pusat riset di lembaga pemerintah serta perguruan tinggi. Namun, inisiasi ini tidak cukup hanya bertumpu pada teknologi; dibutuhkan pula pilar kebijakan, terutama standar nasional yang menjamin keamanan jangka panjang bagi pengguna implan. Sementara itu, sumber Titanium di Indonesia banyak bersumber dari *ilmenit iron sand* (pasir besi) yang jumlahnya sangat melimpah, serta dari mineral *rutil*, karenanya diperlukan proses pengolahan untuk mendukung rancang bangun implan tulang dan gigi berbahan titanium lokal, sesuai dengan *tophometry* masyarakat Indonesia. Dukungan kebijakan pemerintah menjadi krusial untuk mengawal pertumbuhan industri alat kesehatan yang telah memanfaatkan hasil riset karya anak bangsa, sehingga pada saatnya mampu bersaing di pasar global.

Pengembanganteknologipencetakanlogam3Dmembutuhkan insentif investasi dan adopsi progresif. Kegiatan ini diperkuat oleh potensi besar dalam rekayasa desain, serta didukung oleh rekayasa permukaan untuk meningkatkan osseointegration.

Sinergi ini perlu berpadu dengan riset biokeramik hidroksiapatit yang telah berkembang pesat. Kini, kita perlu melangkah lebih jauh untuk mengembangkan lapisan implan yang bukan hanya biokompatibel, tetapi juga *therapeutic*, misalnya dengan doping hidroksiapatit yang berfungsi antikanker dan antitumor, guna menghasilkan *personalized implants* generasi mendatang. Untuk itu, penyusunan peta jalan dan kolaborasi riset global menjadi kunci dalam memperkuat penguasaan teknologi mutakhir. Dengan komitmen bersama, Indonesia tidak hanya akan mandiri dalam material medis, tetapi juga mampu menjadi pionir inovasi implan masa depan.

Sebagai penutup, marilah kita mendorong sinergi antara akademisi, industri, pemerintah, tenaga medis, dan media massa, demi mewujudkan kolaborasi strategis yang mengangkat potensi besar ini, untuk kesehatan dan kesejahteraan masyarakat Indonesia.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan yang berbahagia ini, perkenankan saya menyampaikan puji dan syukur ke hadapan Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat dan karunia-Nya orasi ini dapat berjalan sebagaimana yang diharapkan. Pada kesempatan ini juga perkenankan saya dengan segala kerendahan hati untuk menyampaikan penghargaan dan terima kasih setinggi-tingginya kepada Presiden Republik Indonesia, Prabowo Subianto dan Presiden dan Presiden Susilo Bambang Yudhoyono yang menetapkan saya sebagai Perekayasa Ahli Utama.

Ucapan terima kasih kepada Kepala BRIN, Prof. Dr. Arif Satria, S.P, M.Si; Wakil Kepala BRIN, Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian, M.Sc., DESD., IPU., ASEAN Eng., atas dukungan beliau dalam menciptakan ekosistem riset yang kondusif bagi para periset untuk berkarya dan berkembang secara profesional. Ucapan terima kasih kepada Kepala BRIN periode 2021 - 2025 Dr. Laksana Tri Handoko, M.Sc.

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

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Tim Penelaah Naskah Orasi Ilmiah Prof. Nurul Taufiqu Rochman, M.Eng, Prof. Dr. Ing. Andika Widya Pramono, M.Sc, Prof. Dr. Jarot Raharjo, ST., MSc., Prof. Dr. Wisnu Ari Adi, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. Ir. Bambang Suharno, dan Prof. Dr. Efendi, S.T., M.T., atas

penelaahan, masukan yang konstruktif dan bermanfaat, serta semangat akademik untuk menyempurnakan naskah orasi saya.

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

Terima kasih kepada pembimbing S-1, S-2. dan S-3 saya, yaitu Ir. I Made Gunadiarta, Prof. Shuji Hanada serta guru dan dosen yang telah mendidik saya mulai dari sekolah dasar hingga perguruan tinggi, yang tidak bisa saya sebut satu persatu, saya ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas ilmu pengetahuan yang telah diajarkan. Begitu juga kepada teman-teman di Pusat Riset Komposit dan Biomaterial, Kelompok Riset Biomaterial Tulang dan Gigi, dan teman-teman lainnya yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu, yang telah bersama-sama saling mendukung dalam kegiatan riset dan melakukan perekayasaan di PRKB, serta semua pihak yang telah berkontribusi secara langsung maupun tidak langsung untuk kesuksesan penyelenggaraan acara pengukuhan profesor riset hari ini.

Terima kasih kepada CEO PT. Zenith Allmart Precisindo, Allan Changrawinata dan Tim di Zenih atas dukungan dan bantuannya sehingga kegiatan riset dan inovasi implan tulang dapat berlangsung dengan baik. Juga Direktur PT. Pudak Scientific, Stanley Wangsanegara atas dukungan dan bantuannya sehingga kegiatan riset implant gigi dapat berlangsung dengan baik.

Akhirnya, terima kasih yang tak terhingga diberikan kepada kedua orang tua saya, ayahnda I Ketut Koyong (alm) dan Ibunda Ni Nyoman Tengkog (alm), serta bapak dan ibu mertua, Gusti Putu Mataram (alm) dan Gusti Ayu Reni (alm). Kepada keluarga besar saya, khususnya kepada istri tercinta, Gusti Ayu Made Sri Kardiani, dan ananda

tercinta, Putu Agus Puja Nugraha, Made Ayu Wandita Nugraha, terima kasih atas doa, dukungan, dan perhatiannya.

Tiada gading yang tak retak, untuk itu perkenankanlah kami memohon maaf atas segala kesalahan yang disengaja maupun tidak dalam penyampaian orasi ini. Kiranya Tuhan Yang Maha Esa, memberkati kita semua. Salam hormat kami, sekian dan 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>
- Alam, G. W., **Jujur, I. N.**, Kozin, M., Triwibowo, B., Mustika, T., Taqwatomo, G., Damisih, Setyadi, I., Suryadi, Fitriani, D. A., Hanafi, R., Ulfah, I. M., Nurlina, Wargadipura, A. H. S., Sulaikan, H. P., Roseno, S., Gustiono, D., Waluyo, R. T., Rohmah, A., ... Wangsanegara, S. (2025). *Implant Gigi Dengan Tiga Sudut Ruang Tulang Serta Modul Puncaknya Tertutup Erat Oleh Abdument Padat*. <https://doi.org/IPD000102656>
- Aria. (2024). Indonesia's Rising Nickel and Stainless Steel Sectors: A Global Production Overview. *Jianglin Stainless Steel*. <https://jlinmetal.com/indonesias-rising-nickel-and-stainless-steel-sectors-a-global-production-overview/>
- Azahra, S. A., Damisih, Kozin, M., Fitriani, D. A., Puranto, P., **Jujur, I. N.**, Prajitno, D. H., Ulfah, I. M., Hanafi, R., Saudi, A. U., Suwondo, K. P., Marchel, P., & Kamil, M. P. (2024). The Effect of Solution Treatment Temperature on Hardness, Microstructure, and Corrosion Resistance of Ti-6Al-4V ELI. *Defect and Diffusion Forum*, 433(June), 3–11. <https://doi.org/10.4028/p-7ES1Pj>
- Chenfan, Y., Yafei, W., Congcong, Z., & Wei, L. (2023). The Solidification Characteristics and Microstructure of 316L Stainless Steel Manufactured Via Selective Laser Melting.

*Materials Science and Technology*. <https://doi.org/10.11951/j.issn.1005-0299.20230199>

- Damisih, 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, 030020. <https://doi.org/10.1063/5.0133309>
- Damisih, **Jujur, I. N.**, Sah, J., Agustanhakri, & Prajitno, D. H. (2018). Characteristics Microstructure and Microhardness of Cast Ti-6Al-4V ELI for Biomedical Application Submitted to Solution Treatment. *AIP Conference Proceedings* 1964, 020037, 020037. <https://doi.org/10.1063/1.5038319>
- Deng, P., Karadge, M., Rebak, R. B., Gupta, V. K., Prorok, B. C., & Lou, X. (2021). The Role of Extraneous Oxygen in the Formation of Oxide Inclusions in 316L Stainless Steel Manufactured by Laser Powder Bed Fusion. In Sharlotte L.B. Kramer; Rachael Tighe (Ed.), *Thermomechanics & Infrared Impenuaan, Inverse Problem Methodologies and Mechanics of Additive & Advanced Manufactured Materials, Volume 7* (pp. 75–80). Springer Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-59864-8\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-59864-8_12)
- Drapala, J., Kostiukova, G., & Losertova, M. (2018). Influence of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of SUS 316L Alloy. *METAL 2018: 27th International Conference on Metallurgy and Materials*, 1527–1532.
- El Khalloufi, M., Drevelle, O., & Soucy, G. (2021). Titanium: An Overview of Resources and Production Methods. *Minerals*, 11(12), 1425. <https://doi.org/10.3390/min11121425>
- Gustian, Soehartono, H., Jujur, I. N., Wargadipura, A. H. S., & Noviana, D. (2018). Blood Profile of Implantation Stainless Steel 316L Local Implant Material on Rat Femoral Bone. *Jurnal Ilmu*

*Ternak Dan Veteriner*, 23(3), 123–129. <https://doi.org/10.14334/jitv.v23i3.1836>

- Hartmann, C., van den Bosch, L., Spiegel, J., Rumschöttel, D., & Günther, D. (2022). Removal of Stair-Step Effects in Binder Jetting Additive Manufacturing Using Grayscale and Dithering-Based Droplet Distribution. *Materials*, 15(11), 3798. <https://doi.org/10.3390/ma15113798>
- Hidayat, A., Sah, J., Mustika, T., Setyadi, I., Suryadi, Adhitya, K., Wibisono, M., Wahyu Alam, G., Harahap, M. E., Sulaikan, H. P., Suhendra, N., Hermanto, B., **Jujur, I. N.**, & Manawan, M. (2024). Enhancing Stainless Steel 316L Casting with Argon Gas Diffuser: Impact on Mechanical Strength, Residual Stress, and Crystallographic Texture. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2024.2424011>
- Hulka, I., Florido-Suarez, N. R., Mirza-Rosca, J. C., & Saceleanu, A. (2022). Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Thermally Treated Ti-6Al-7Nb Dental Alloy. *Materials*, 15(11). <https://doi.org/10.3390/ma15113813>
- Jujur, I. N.** (2004). Pembuatan Bahan Baku Stainless Steel Berbasis Sumber Daya Alam. *Seminar Nasional Ilmu Dan Teknologi Material*.
- Jujur, I. N.** (2005). Pengembangan Bahan Baku Stainless steel Melalui Optimalisasi Fasilitas Pabrik Feronikel Pomalaa. *Jurnal SAINTEK-UNTAG Surabaya*.
- Jujur, I. N.**, Damisih, Devy, K., Suha, S., Bachtiar, B. M., & Bachtiar, E. W. (2020). Effect of Implantation Ti-6Al-4V ELI in Femoral Bone Defect Regeneration of Sprague Dawley Rat. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 11(4), 202. [https://doi.org/10.4103/japtr.JAPTR\\_74\\_20](https://doi.org/10.4103/japtr.JAPTR_74_20)
- 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. *Proceeding 5th International Seminar on Metallurgy and Materials (ISMM2022) AIP Conf. Proc.* 3003, 020049. <https://doi.org/10.1063/5.0186577>

**Jujur, I. N.,** Sah, J., Bakri, A., & Hadi S. Wargadipura, A. (2015). Analysis of Oxide Inclusions on Medical Grade 316L Stainless Steel using Local Raw. *International Journal of Technology*, 6(7), 1184. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v6i7.1263>

**Jujur, I. N.,** Suhendra, N., Harahap, M. E., Habibie, S., Masmui, Rahayu, S., Damisih, Saudi, A. U., Azahra, S. A., Purwati, H., Lukmana, & Setiawan, H. (2023). A Comparative Study of Alumina and SS 316L Frictional Contact Against UHMWPE on The Change in The Softer Bearing Surface Morphologies. *International Journal of Advanced Research*, 11(05), 674–687. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/16921>

**Jujur, I. N.,** Susilowati, S. E., Roseno, S., & Wargadipura, A. H. S. (2021). The Effect of Niobium Addition on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of a Medical Grade SS316L. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 21(2), 178. <https://doi.org/10.22146/ajche.63778>

**Jujur, I. N.,** Wargadipura, A. H. S., Riswoko, A., Changrawinata, A., Agustanhakri, Budiyo, D., Sulaikan, H., Mustika, T., Sah, J., Damisih, Rohmah, A., Susanto, H., Roseno, S., Swathatafijriah, W., Harahap, M. E., Setyadi, I., Wibisono, M., & Suryadi. (2022). *Metode Proses untuk Pemurnian Medical Grade Stainless Steel 316L dengan Meniupkan Gas Argon ke Tanur Induksi*. <https://doi.org/IDP000081235>

**Jujur, I. N.,** Wargadipura, A. H. S., Sulaikan, H., Changrawinata, A., Sah, J., Bakri, A., Mustika, T., Budiyo, D., Damisih, Rohmah, A., Susanto, H., & Roseno, S. (2019). *Metode Produksi Implan Tulang Stainless Steel 316L Berbahan Ferronikel*. <https://doi.org/IDP000065857>

- Kimber, I., & Basketter, D. A. (2022). Allergic Sensitization to Nickel and Implanted Metal Devices: A Perspective. *Dermatitis*, 33(6), 396–404. <https://doi.org/10.1097/DER.0000000000000819>
- Li, R., Li, S., Zhang, Y., Jin, D., Lin, Z., Tao, X., Chen, T., Zheng, L., Zhang, Z., & Wu, Q. (2023). Titanium Surfaces With Biomimetic Topography and Copper Incorporation to Modulate Behaviors of Stem Cells and Oral Bacteria. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11(July), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1223339>
- Maharani, D., Anawati, A., **Jujur, I. N.**, & Damisih. (2020). Effect of Solution Treatment on Microstructure and Mechanical Hardness of Ti-6Al-7Nb. *Key Engineering Materials*, 860, 218–222. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.860.218>
- Nunes, A. R. V., Borborema, S., Araújo, L. S., Malet, L., Dille, J., & Almeida, L. H. de. (2020). Influence of Thermo-Mechanical Processing on Structure and Mechanical Properties of A New Metastable  $\beta$  Ti-29Nb-2Mo-6Zr Alloy with Low Young's Modulus. *Journal of Alloys and Compounds*, 820, 153078. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153078>
- Oktikawati, A., Riastuti, R., Damisih, **Jujur, I. N.**, & Kaban, A. P. S. (2024). Electrochemical Characteristic and Microstructure of Ti-6Al-7Nb Alloy by Centrifugal Casting for Orthopedic Implant Based on Ageing Time Variations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(12 (128)), 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302614>
- Olsén, J., Shen, Z., Liu, L., Koptuyug, A., & Rännar, L. E. (2018). Micro- and Macro-Structural Heterogeneities in 316L Stainless Steel Prepared by Electron-Beam Melting. *Materials Characterization*, 141, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.04.026>
- Pattanayak, S., Dash, P., Satpathi, S., Sahoo, A. K., Das, N. R., Nayak, B., & Sahoo, S. K. (2025). Additive Manufacturing of 316 L Stainless Steel Orthopedic Implant With Improved In Vitro

Hemocompatibility and Hydrophilicity for Osteoinduction in Wistar Rat Model. *Biomaterials Advances*, 175(April), 214322. <https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2025.214322>

- Rahmadani, S., Anawati, A., Gumelar, M. D., Hanafi, R., & **Jujur, I. N.** (2022). Optimizing Parameter for Electrophoretic Deposition of Hydroxyapatite Coating with Superior Corrosion Resistance on Pure Titanium. *Materials Research Express*, 9(11), 115402. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aca509>
- Rahmadani, S., Anawati, A., **Jujur, I. N.**, & Hanafi, R. (2020). Fabrication of Hydroxyapatite Coating on Commercially Pure Ti by Electrophoretic Deposition Technique. *Key Engineering Materials*, 860, 239–243. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.860.239>
- Rodrigues, T. A., Escobar, J. D., Shen, J., Duarte, V. R., Ribamar, G. G., Avila, J. A., Maawad, E., Schell, N., Santos, T. G., & Oliveira, J. P. (2021). Effect of Heat Treatments on 316 Stainless Steel Parts Fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing : Microstructure and Synchrotron X-ray Diffraction Analysis. *Additive Manufacturing*, 48, 102428. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102428>
- Saleh, Y. K. P., Ismail, R., Jamari, J., **Jujur, I. N.**, Suryadi, Winarso, R., & Anggara, T. (2025). Finite Element Analysis of Ti-6Al-4V Lattice Cubic Scaffolds for Mandibular Bone Implant Applications. *Advances in Technology Innovation*, 10(3), 283–295. <https://doi.org/10.46604/aiti.2024.14542>
- Sandi, M. R. (2024). 72 Persen Kecelakaan Lalu Lintas di Indonesia Melibatkan Sepeda Motor. *Okezone Nasional*. <https://nasional.okezone.com/read/2024/05/02/337/3003434/72-persen-kecelakaan-lalu-lintas-di-indonesia-melibatkan-sepeda-motor>
- Saraswati, W. C., Anawati, A., **Jujur, I. N.**, & Gumelar, M. D. (2020). Effect of Coloring by Anodizing on The Corrosion Behavior of

Ti-6Al-4V Alloy. *AIP Conference Proceedings*, 2232(April), 020004. <https://doi.org/10.1063/5.0001483>

- Saudi, A. U., Wibisono, M., Azahra, S. A., Taqwatomo, G., Rianti, W., Damisih, Agustanhakri, Kozin, M., Suryadi, **Jujur, I. N.**, Setyadi, I., Triwibowo, B., Gumelar, M. D., Sah, J., & Suhendra, 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. <https://doi.org/10.4028/p-Zohd2Z>
- 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, 050008. <https://doi.org/10.1063/5.0108289>
- Sridevi, C., Sathishkumar, S., Karthikeyan, P., & Maheswaran, P. (2019). Exploration on Anticorrosive, Antibacterial and Osteocompatibility Properties of Samarium/Europium Substituted Hydroxyapatite Coating on Surgical Grade Stainless Steel for Biomedical Applications. *Asian Journal of Chemistry*, 31(7), 1549–1554. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2019.21967>
- Taqwatomo, G., Saudi, A. U., Damisih, Suhendra, N., Wibisono, M., Alam, G. W., **Jujur, I. N.**, Rianti, W., Azahra, S. A., Gumelar, M. D., Saputra, D. A., Husin, S., & Fidyarningsih, R. (2024). Fatigue Experimental of AS-CAST Ti-6Al-7Nb Implemented on Designed Femoral Stem for Indonesian People Through Finite Element Analysis. *Strojnický Časopis - Journal of Mechanical Engineering*, 74(3), 105–120. <https://doi.org/10.2478/scjme-2024-0038>
- Terrazas, M., Drambarean, M., & Juan, S. (2020). Installation of Porous Plug and Injection of Argon Gas Through the Bottom in Induction Furnaces at Matrix Metals – Acerlan Foundry. *Proceedings of the 74th Technical & Operating Conference of the Steel Founder's*

*Society of America, 1*, 1–6. <https://www.sfsa.org/wordpress/wp-content/uploads/2021/10/2020-Acerlan-Terrazas.pdf>

- Venkatesh, B. D., Chen, D. L., & Bhole, S. D. (2009). Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of Ti–6Al–4V ELI Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 506(1–2), 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.11.018>
- Wakale, S., & Goswami, T. (2025). Investigating Smart Knee Implants. *Designs*, 9(4), 93. <https://doi.org/10.3390/designs9040093>
- Wang, Y., Chen, C., Yang, X., Zhang, Z., Wang, J., Li, Z., Chen, L., & Mu, W. (2025). Solidification Modes and Delta-Ferrite of Two Types of 316L Stainless Steels: A Combination of as-Cast Microstructure and HT-CLSM Research. *Journal of Iron and Steel Research International*, 32(2), 426–436. <https://doi.org/10.1007/s42243-024-01401-4>
- Yin, X., Sun, Y. H., Yang, Y. D., Bai, X. F., Deng, X. X., Barati, M., & McLean, A. (2016). Inclusion Evolution During Refining and Continuous Casting of 316L Stainless Steel. *Ironmaking & Steelmaking*, 43(7), 533–540. <https://doi.org/10.1080/03019233.2015.1125599>
- Zhang, W., Zhang, J., Liu, H., Liu, Y., Sheng, X., Zhou, S., Pei, T., Li, C., & Wang, J. (2025). Functional Hydrogel Empowering 3D Printing Titanium Alloys. *Materials Today Bio*, 30(December 2024), 101422. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2024.101422>

## **CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET DAN INOVASI**

### **Karya Tulis Ilmiah**

- |                            |         |
|----------------------------|---------|
| 1. Buku Nasional           | 1 buah  |
| 2. Jurnal Internasional    | 25 buah |
| 3. Jurnal Nasional         | 6 buah  |
| 4. Prosiding Internasional | 14 buah |
| 5. Prosiding Nasional      | 7 buah  |

### **Kekayaan Intelektual**

- |                                  |        |
|----------------------------------|--------|
| 6. Paten Nasional Terdaftar      | 3 buah |
| 7. Paten Nasional Tersertifikasi | 6 buah |
| 8. Hak Cipta                     | 5 buah |
| 9. Desain Industri               | 3 buah |

### **Kerjasama Mitra**

- |                       |        |
|-----------------------|--------|
| 10. Transaksi Lisensi | 2 buah |
|-----------------------|--------|



## DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET DAN INOVASI

### Bagian dari Buku

1. Anggaravidya, M., Ratno, N., W., A. H. S., **Jujur, I. N.**, & Habibie, S. (2018). *Outlook inovasi teknologi material*. Pusat Teknologi Material.

### Jurnal Internasional

2. 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. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104502>
3. 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*. <https://doi.org/10.1108/MMMS-10-2024-0308>
4. Bargowo, L., Khosuma, F., Hendrawan, R., Kusumawardani, B., Prahasanti, C., **Jujur, I. N.**, Aljunaid, M., & Qaid, H. (2025). RUNX2 and ALP Expression on the Femur of Rats (*Rattus norvegicus*) after Implantation of Polymethylmethacrylate-Hydroxyapatite (PMMA-HA) Material. *Tropical Journal of Natural Product Research*, 9(4), 1548. <https://doi.org/10.26538/tjnpr/v9i4.25>

5. 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., Tri Wibowo, B., Gumelar, M. D., Sah, J., & Suhendra, 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. <https://doi.org/10.4028/p-Zohd2Z>
6. Setyoadi, Y., Ismail, R., Bayuseno, A., **Jujur, I. N.**, Novriansyah, R., Darmanto, Prawibowo, H., & Anggoro, P. W. (2025). Virtual Machining of Total Knee Replacement Products Based on Finite Element Analysis (FEA) and Re-Design Optimization by ISO 14243. *Management Systems in Production Engineering*, 33(2), 258–267. <https://doi.org/10.2478/mspe-2025-0025>
7. Saleh, Y. K. P., Ismail, R., Jamari, **Jujur, I. N.**, Suryadi, Winarso, R., & Anggara, T. (2025). Finite Element Analysis of Ti-6Al-4V Lattice Cubic Scaffolds for Mandibular Bone Implant Applications. *Advances in Technology Innovation*, 10(3), 283–295. <https://doi.org/10.46604/aiti.2024.14542>
8. Hidayat, A., Sah, J., Mustika, T., Setyadi, I., Suryadi, Adhitya, K., Wibisono, M., Wahyu Alam, G., Harahap, M. E., Sulaikan, H. P., Suhendra, N., Hermanto, B., **Jujur, I. N.**, & Manawan, M. (2024). Enhancing Stainless Steel 316L Casting with Argon Gas Diffuser: Impact on Mechanical Strength, Residual Stress, and Crystallographic Texture. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2024.2424011>

9. Setyadi, I., Suryadi, **Jujur, I. N.**, Wibisono, M., Damisih, Manawan, M., Adhitya, K., Hidayat, A., Kamal, A. F., Rahyusalim, Suharno, B., & Supriadi, S. (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 and Information Technology*, 14(1), 73–80. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.14.1.19211>
10. 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>
11. Oktikawati, A., Riastuti, R., Damisih, D., **Jujur, I. N.**, & Kaban, A. P. S. (2024). Electrochemical characteristic and microstructure of Ti-6Al-7Nb alloy by centrifugal casting for orthopedic implant based on ageing time variations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(12 (128)), 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302614>
12. Taqwatomo, G., Saudi, A. U., Damisih, Suhendra, N., Wibisono, M., Alam, G. W., **Jujur, I. N.**, Rianti, W., Azahra, S. A., Gumelar, M. D., Saputra, D. A., Husin, S., & Fidyarningsih, R. (2024). Fatigue Experimental of AS-CAST Ti-6Al-7Nb Implemented on Designed Femoral Stem for Indonesian People Through Finite Element Analysis. *Strojnícky Časopis - Journal of Mechanical Engineering*, 74(3), 105–120. <https://doi.org/10.2478/scjme-2024-0038>

13. Azahra, S. A., Damisih, D., Kozin, M., Fitriani, D. A., Puranto, P., **Jujur, I. N.**, Prajitno, D. H., Ulfah, I. M., Hanafi, R., Saudi, A. U., Suwondo, K. P., Marchel, P., & Kamil, M. P. (2024). The Effect of Solution Treatment Temperature on Hardness, Microstructure, and Corrosion Resistance of Ti-6Al-4V ELI. *Defect and Diffusion Forum*, 433, 3–11. <https://doi.org/10.4028/p-7ES1Pj>
14. Han, A. L., Indriyantho, B. R., Asshidiqie, M. R., Purwanto, Widowati, Kartono, & **Jujur, I. N.** (2024). Fracture Behavior of Crop Circle Ceramic Tiles: Experimental and Numerical Study. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 14(2), 201–215. <https://doi.org/10.46604/ijeti.2024.13070>
15. **Jujur, I. N.**, Suhendra, N., Harahap, M. E., Habibie, S., A, M., Rahayu, S., B, D., Saudi, A. U., Azahra, S. A., Purwati, H., C, L., & Setiawan, H. (2023). A Comparative Study of Alumina and SS 316L Frictional Contact Against UHMWPE on The Change in The Softer Bearing Surface Morphologies. *International Journal of Advanced Research*, 11(05), 674–687. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/16921>
16. 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, 152–165. <https://doi.org/https://doi.org/10.31603/mesi.10389>
17. Rahmadani, S., Anawati, A., Gumelar, M. D., Hanafi, R., & **Jujur, I. N.** (2022). Optimizing parameter for electrophoretic deposition of hydroxyapatite coating with superior corrosion resistance on pure titanium. *Materials Research Express*, 9(11), 115402. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aca509>

18. **Jujur, I. N.**, Susilowati, S. E., Roseno, S., & Wargadipura, A. H. S. (2021). The Effect of Niobium Addition on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of a Medical Grade SS316L. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 21(2), 178. <https://doi.org/10.22146/ajche.63778>
19. **Jujur, I. N.**, Damisih, Devy, K., Suha, S., Bachtiar, B., & Bachtiar, E. (2020). Effect of implantation Ti-6Al-4V ELI in femoral bone defect regeneration of Sprague Dawley rat. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 11(4), 202. [https://doi.org/10.4103/japtr.JAPTR\\_74\\_20](https://doi.org/10.4103/japtr.JAPTR_74_20)
20. Rahmadani, S., Anawati, A., **Jujur, I. N.**, & Hanafi, R. (2020). Fabrication of Hydroxyapatite Coating on Commercially Pure Ti by Electrophoretic Deposition Technique. *Key Engineering Materials*, 860, 239–243. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.860.239>
21. Maharani, D., Anawati, A., **Jujur, I. N.**, & Damisih. (2020). Effect of Solution Treatment on Microstructure and Mechanical Hardness of Ti-6Al-7Nb. *Key Engineering Materials*, 860, 218–222. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.860.218>
22. Damisih, **Jujur, I. N.**, Sah, J., Agustanhakri, & Prajitno, D. H. (2018). Characteristics microstructure and microhardness of cast Ti-6Al-4V ELI for biomedical application submitted to solution treatment. *AIP Conference Proceedings*, 020037. <https://doi.org/10.1063/1.5038319>
23. Gustian, Soehartono, H., **Jujur, I. N.**, Wargadipura, A. H. S., & Noviana, D. (2018). Blood profile of implantation stainless steel 316L local implant material on rat femoral bone. *Jurnal Ilmu Ternak Dan Veteriner*, 23(3), 123–129. <https://doi.org/10.14334/jitv.v23i3.1836>
24. **Jujur, I. N.**, Sah, J., Bakri, A., & Hadi S. Wargadipura, A. (2015). Analysis of Oxide Inclusions on Medical Grade 316L Stainless Steel using Local Raw. *International Journal of Technology*, 6(7), 1184. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v6i7.1263>

25. Afandi, Y., Zulfia, A., Priadi, D., & **Jujur, I. N.** (2013). Formation and Characterization of MMCs Alloy Al-5%Cu-4%Mg/SiC(p) by Thixoforming Process. *Advanced Materials Research*, 56–59. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.0.56>
26. **Jujur, I. N.**, & Hanada, S. (1995). Tensile properties of W/Ni<sub>3</sub>Al composites at elevated temperatures. *Materials Science and Engineering: A*, 192–193, 848–855. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(94\)03335-8](https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)03335-8)

### **Jurnal Nasional**

27. Saleh, Y. K. P., Muhammad, F. A., **Jujur, I. N.**, Luqman, M. L. S. F., & Zaenudin, M. (2025). Perancangan Spesial Tools Rebusihng Torq Rod dan Radius Rod HD7857. *Jurnal Permadi : Perancangan, Manufaktur, Material Dan Energi*, 7(02), 120–139. <https://doi.org/10.52005/permadi.v7i02.187>
28. Mustika, T., Soegiyono, B., & **Jujur, I. N.** (2011). Pembuatan Komposit AC8A/SiCp dengan Metode Hot Press Metalurgi Serbuk. *Metalurgi*, 26(3), 161. <https://doi.org/10.14203/metalurgi.v26i3.22>
29. Zulfia, A., Juwita, R., Uliana, A., **Jujur, I. N.**, & Raharjo, J. (2010). Proses Penuaan (Aging) pada Paduan Aluminium AA 333 Hasil Proses Sand Casting. *Jurnal Teknik Mesin*, 12(1). <https://doi.org/10.9744/jtm.12.1.13-20>
30. **Jujur, I. N.** (2006). Pengaruh Fraksi Berat Terhadap Sifat Mekanis Bahan Paduan Cu-Sn-Zn/grafit. *Jurnal Ilmiah GEMA Teknik UNS*.
31. **Jujur, I. N.** (2005). Pengembangan Bahan Baku Stainless steel Melalui Optimalisasi Fasilitas Pabrik Feronikel Pomalaa. *Jurnal SAINTEK-UNTAG Surabaya*.

32. **Jujur, I. N.** (1995). Pengaruh Unsur Paduan pada Mikrostruktur dan Kekuatan Antarmuka Bahan Komposit W/Ni3Al. *Metal Indonesia*, 017.

### Prosiding Internasional

- 33 Evi Ulina Margareta Situmorang, Heri Sutanto, Parsaoran Siahaan, I Nyoman Jujur, Giri Wahyu Alam, (2025). Surface and Structural Changes of Limestone-Based Hydroxyapatite after Heat Treatment and Exposure to *S. Aureus*. *Journal of Physics: Conference Series*, 3139 (2025) 012020. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3139/1/012020>
- 34 Iwan Setyadi<sup>1</sup>, Ana Karina Bano, Adhinda Septhia Nur Rizky, Mirza Wibisono, Suryadi, Arif Hidayat, Krisna Adhitya, Tika Mustika, Muslim Efendi Harahap, Giri Wahyu Alam, Joni Sah, I Nyoman Jujur, Ni Nyoman Rupiasih, (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 (2025) 012029. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2980/1/012029>
35. 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. *5th International Seminar on Metallurgy and Materials (ISMM2022) – AIP Conference Proceedings*, 020008. <https://doi.org/10.1063/5.0186675>
36. Setyadi, I., Suryadi, **Jujur, I. N.**, Harahap, M. E., Tiwibowo, B., Damisih, Suharno, B., & Supriadi, S. (2024). Observation of mechanical properties improvement of powder-based magnesium-carbonate apatite (Mg-10CA) through deformation strengthening process. *Proceeding 5th International Seminar on Metallurgy and Materials (ISMM2022) AIP Conf. Proc.* 3003, 020028. <https://doi.org/10.1063/5.0186245>

37. **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. *Proceeding 5th International Seminar on Metallurgy and Materials (ISMM2022) AIP Conf. Proc. 3003*, 020049. <https://doi.org/10.1063/5.0186577>
38. 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. *The 3rd International Seminar on Science and Technology 2021: The Path of Sustainable Development for a Better Life – AIP Conference Proceedings*, 030020. <https://doi.org/10.1063/5.0133309>
39. 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*, 050008. <https://doi.org/10.1063/5.0108289>
40. Afandi, Y., Zulfia, A., Priadi, D., & **Jujur, I. N.** (2014, September). Formation and Characterization of MMCs Alloy Al-5%Cu-4%Mg/SiC(p) by Thixoforming Process. *Proceeding of 3rd International Conference on Advanced Materials and Practical Nanotechnology*. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.0.56>
41. Saraswati, W. C., Anawati, A., **Jujur, I. N.**, & Gumelar, M. D. (2020). Effect of coloring by anodizing on the corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy. *AIP Conference Proceedings*, 020004. <https://doi.org/10.1063/5.0001483>

42. Mustika, T., Sugijono, B., & **Jujur, I. N.** (2011). Microstructure and Properties Of Open Air Hot Pressed Al/SiCp Composites. *Proceedings of the 1st Pro International Conference on Materials Engineering (ICME) and 3rd AUN/SEED-Net Regional Conference on Materials (RCM)*.
43. Mustika, T., Sugijono, B., & **Jujur, I. N.** (n.d.). Investigation of Mechanical Properties of Hot pressed Aluminium Alloy Composites (AC8A/SiCp) Affected by Reinforcement Coating. *Proceedings International Seminar on Applied Technology, Science, and Arts, ITS*.
44. **Jujur, I. N.** (2005). The Effect of Microstructure to the Corrosion Rate of Local Fe-Ni-Cr Based Stainless steel. *Proceedings 6th National Seminar on Neutron and X-Ray Scattering*.
45. **Jujur, I. N.** (1998). Rolling of Sic Fibre Reinforced Aluminium Matrix Composites. *The 3rd International Symposium on Advanced and Aerospace Science & Technology In Indonesia (ISASTI 98)*, Vol. 1.
46. **Jujur, I. N.**, & Hanada, S. (1996). Fabrication and Thermal Stability of W. Reinforced NiAl Composites by A. Sandwich. *The 2nd International Symposium on Advanced and Aerospace Science & Technology in Indonesia (ISASTI 96)*.

### **Prosiding Nasional**

47. **Jujur, I. N.** (2006). Peningkatan Kualitas Produk Cor Aluminium Paduan Untuk Komponen Otomotif. *Prosiding SNTTM V*.
48. **Jujur, I. N.** (2005). Teknologi Pembuatan Komponen Engine untuk IKM Logam. *Prosiding SNTTM IV*.
49. **Jujur, I. N.** (2004). Pembuatan Bahan Baku Stainless Steel Berbasis Sumber Daya Alam. *Seminar Nasional Ilmu Dan Teknologi Material*.

50. **Jujur, I. N.** (2003). Pengaruh Proses Degassing pada Kekuatan Mekanis Produk Cor. *Proceeding Seminar Nasional Teknik Mesin.*
51. **Jujur, I. N.** (2000). Pengaruh Unsur (B,Co,Cu,Pd) pada Interdifusi Sambungan W dan Ni3Al. *Prosiding Seminar Nasional Hamburan Neutron Dan Sinar X Ke-3.*
52. **Jujur, I. N.** (2000). Pengaruh Penambahan Boron pada Mekanisme Aliran Retak Sambungan W dengan Ni77Aal23. *Proceeding ETM (Experimental and Theoretical Mechanics).*
53. **Jujur, I. N.** (2000). Karakteristik Tegangan Temperatur Tinggi Material Komposit W/Ni3Al. *Proceedings of the Seminar Quality in Research.*

## **Kekayaan Intelektual**

### **Paten Nasional Terdaftar**

- 54 Sistem Implan Tulang Belakang Menggunakan Skrup Pedikal Berulir Ganda Yang Berkelanjutan, 2022, P00202209494
- 55 Cetakan Ubin Keramik Kristalografi (Paten Sederhana), 2024, S00202307934
- 56 Implan Batang Femoral Berfenestra Lingkaran Tiga Buah Dengan Penampang Trapesium, 2024, P00202415009

### **Paten Nasional Tersertifikasi**

- 57 Fixture Implan Gigi yang Disempurnakan, 2025, IDP000102655
- 58 Implan Gigi Dengan Tiga Sudut Ruang Tulang Serta Modul Puncaknya Tertutup Erat Oleh Abutment Padat, 2025, IDP000102656

- 59 Metode Proses Pemurnian Medical Grade *Stainless steel* 316L Dengan Meniupkan Gas Argon ke Tanur Induksi, 2022, IDP000081235
- 60 Peralatan dan Metode Produksi Hidroksiapatit Berporous, 2019, IDP000062261
- 61 Metode Produksi Implant Tulang *Stainless steel* Berbahan Ferronikel, 2019, IDP000065857
- 62 Metode Pembuatan Blok Mesin Aluminium Dengan Wet Liner, IDP0026869

#### Hak Cipta

- 63 Motif Ornamen Keramik Dinding Embosse Cekung Kristalografi“Espera Gran” dengan Operator Rotasi (0, 90, 180, 270)°, 2025, No.: 001033721
- 64 Corak Motif Berdasarkan Operator: Translasi (T) Dan Rotasi 180° Secara Horizontal, Refleksi (R) Secara Vertical), 2023, No.: 000484369
- 65 Motif Dasar Keramik Dinding Purnama Ceria, 2024, No.: 000666533
- 66 Corak Keramik Dinding Purnama Ceria#2 Berdasarkan Operator: Refleksi Horizontal Dan Vertikal, 2024, No.: 000666531
- 67 Corak Keramik Dinding Purnama Ceria#5 Berdasarkan Operator: Glide Refleksi Horizontal, Refleksi Vertikal, 2024, No.: 000765632

#### Desain Industri

- 68 Implan Gigi dengan Ulir Tunggal Profil V, 2022, No.: A00202204699

- 69 Sekrup Penutup Implan Gigi, 2022, No.: A00202204843
- 70 Cross Link Spinal Implant, 2024, No.: A00202406907

## **Kerja sama**

### **Transaksi Lisensi**

- 71 Kerja Sama Lisensi Produksi dan Komersialisasi Implan Tulang *Stainless Steel* 316L, PT. Zenith Allmart Precisindo
- 72 Kerja Sama Lisensi Produksi dan Komersialisasi Plat Implan Traumatik Paduan Titanium Ti-6Al-4V ELI, PT. Zenith Allmart Precisindo.

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP

### A. DATA PRIBADI

Nama	: Dr. Ir. I Nyoman Jujur, M.Eng
Tempat, tanggal. Lahir	: Tabanan, 30 September 1962
Anak ke	: 3 dari 4 bersaudara
Jenis Kelamin	: Laki-laki
Nama Ayah Kandung	: I Ketut Koyong (alm)
Nama Ibu Kandung	: Ni Nyoman Tengkok (alm)
Nama Istri:	: Gusti Ayu Made Sri Kardiani
Jumlah Anak	: 2 (dua) orang
Nama Anak	: 1. Putu Agus Puja Nugraha 2. Made Ayu Wandita Nugraha
Nama Unit	: Pusat Riset Komposit dan Biomaterial
Nama Organisasi	: Organisasi Riset Nanoteknologi dan Material
Nama Instansi	: Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Judul Orasi	: Strategi Inovatif Dalam Pengembangan Teknologi Material Medis dan Rekayasa Implan Tulang dan Gigi Untuk Kemandirian Industri Nasional
Ilmu	: Teknik
Bidang	: Material
Bidang Kepakaran	: Biomaterial
No SK Pangkat Terakhir	: Keputusan Presiden RI Nomor 15/K Tahun 2012, tanggal 22 Februari 2012

---

No SK Perekayasa Ahli : Keputusan Presiden RI Nomor 3/M Tahun  
Utama 2022, tanggal 18 Januari 2022

---

Tautan Scopus : [https://www.scopus.com/  
authid/detail.uri?authorId=7801459754](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7801459754)

---

Tautan Google Scholar : [https://scholar.google.com/  
citations?user=RxGkz7EAAAAJ&hl=id](https://scholar.google.com/citations?user=RxGkz7EAAAAJ&hl=id)

---

## B. PENDIDIKAN FORMAL

No	Jenjang	Nama Sekolah /PT/Universitas	Tempat/ Kota/ Negara	Tahun Lulus
1	SD	Dalang	Tabanan/ Indonesia	1973
2	SMP	Bajera	Tabanan/ Indonesia	1976
3	SMA	SMPP	Denpasar/ Indonesia	1980
4	S-1	Universitas Brawijaya	Malang/ Indonesia	1985
5	S-2	Tohoku University	Sendai/ Jepang	1991
6	S-3	Tohoku University	Sendai/ Jepang	1994

### C. PENDIDIKAN NONFORMAL

No	Nama Pelatihan	Nama Kota/ Negara	Tahun
1	Management Project	Palamec, London, England	1987
2	Manufacturing CCM Alloy implant product by using electron beam melting (EBM)	Tohoku University, Japan	2014
3	Tailor-Made Course on Management and Economics of Photovoltaic	Institute National De L'Energie Solaire (INES), Perancis	2015
4	Training on Advanced Biomaterials for Medical Devices	Care of Our Environment (COOE), Adelaide, Australia	2016

### D. JABATAN STRUKTURAL

No	Jabatan/Pekerjaan	Nama Instansi	Tahun
1	Kelompok Kelompok Teknologi Pengecoran dan Penyambungan	BPPT	1999
2	Koordinator Kelompok Teknologi Logam	BPPT	2000
3	Kepala Bidang Teknologi Logam	BPPT	2001 - 2006

## **E. JABATAN FUNGSIONAL**

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1.	Peneliti Ahli Muda	01-05-1995
2.	Peneliti Ahli Madya	01-05-1998
3.	Peneliti Ahli Madya	20-07-2006
4.	Perekayasa Ahli Utama	10-10-2011

## **F. PENUGASANKHUSUS NASIONAL/INTERNASIONAL**

No	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
1	Anggota Tim Pembangunan Proyek Alumina Bintan	Ka. BPPT	1986-1987
2	Tim Kerja Proyek Natuna	Presiden	1994-1996

## **G. KEIKUTSERTAAN DALAM KEGIATAN ILMIAH**

No	Nama Kegiatan	Peran	Penyelenggara	Tahun
1	The 2nd International Symposium on Advanced and Aerospace Science & Technology in Indonesia (ISASTI 96)	Pemakalah	BPPT	1996

No	Nama Kegiatan	Peran	Penyelenggara	Tahun
2	The 3rd International Symposium on Advanced and Aerospace Science & Technology In Indonesia (ISASTI 98)	Pemakalah	BPPT	1998
3	The 6 <sup>th</sup> National Seminar on Neutron and X-ray Scattering	Pemakalah	BATAN	2005
4	Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) IV	Pemakalah	Universitas Udayana	2005
5	Seminar Nasional CEMATEK 2009	Pembicara Kunci	Politeknik Manufactur, Bandung	2009
6	Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM)	Pembicara Kunci	Universitas Brawijaya	2011
7	Seminar TEKNOIN	Pemakalah	Universitas Muhammadiyah	2013
8	Quality in Research (QIR) International Conference	Pemakalah	Universitas Indonesia	2015

No	Nama Kegiatan	Peran	Penyelenggara	Tahun
9	11th Joint Conference on Chemistry 2016 in conjunction with The 4th Regional Biomaterials Scientific Meeting 2016	Pemakalah	Universitas Jenderal Soedirnan	2016
10	The 3 <sup>rd</sup> International Conference on Materias and Metallurgical Engineering Technology (INCOMET 2017)	Pemakalah	ITS	2017
11	The 5th International Seminar on Metallurgy and Materials (ISMM)	Pemakalah	BRIN	2022

#### **H. KETERLIBATAN DALAM PENGELOLAAN JURNAL ILMIAH**

No	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/Tugas	Tahun
1	Jurnal Ilmiah Humanika dan Jurnal Ilmiah Saintek	UNTAG- Jakarta	Penyunting	2005-2008

2	Metalurgi	P2M-LIPI	Redaktur Tim Penyusunan Jurnal	2015- 2021
3	Majalah Ilmiah Pengkajian Industri	TIRBR- BPPT	Anggota Dewan Redaksi	2019- 2021

## I. CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISTEK DAN INOVASI

### 1. Karya Tulis Ilmiah

#### a). Kualifikasi Karya

No	Kualifikasi Karya	Jumlah
1	Buku Nasional	1 buah
2	Jurnal Internasional	25 buah
3	Jurnal Nasional	6 buah
4	Prosiding Internasional	14 buah
5	Prosiding Nasional	7 buah
6	Paten Nasional	
	Terdaftar	3 buah
	Tersertifikasi	6 buah
7	Hak Cipta	5 buah
6	Desain Industri	3 buah

### b) Kualifikasi Penulis

No	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1	Penulis Tunggal	12 buah
2	Bersama Penulis Lainnya	41 buah
	Total	53 buah

### c) Kualifikasi Bahasa

No	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1	Bahasa Indonesia	13 buah
2	Bahasa Inggris	40 buah
3	Bahasa Lainnya	-
	Total	53 buah

## 2. Kekayaan Intelektual

No	Kualifikasi Karya	Jumlah
1	Paten Nasional	
	Tersertifikasi	6 buah
2	Perlindungan Varietas Tanaman (PVT)	- buah

## J. PEMBINAAN KADER ILMIAH

### Pejabat Fungsional Perekayasa

No	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1	Muhammad Kozin	BPPT	Memberi bimbingan Teknis	2018
2	Agustanhakri	BPPT	Memberi bimbingan Teknis	2019

3	Jonisah	BPPT	Memberi bimbingan Teknis	2020
4	Suryadi	BRIN	Memberi bimbingan Teknis	2021
5	Giri Wahyu Alam	BRIN	Memberi bimbingan Teknis	2022
6	Arif Hidayat	BRIN	Memberi bimbingan Teknis	2023
7	Tika Mustika	BRIN	Memberi bimbingan Teknis	2024
8	Mirza Wibisono	BRIN	Memberi bimbingan Teknis	2025

### **Mahasiswa**

No	Nama	PT/ Universitas	Peran/Tugas	Tahun
1	A.S. Pintar	Universitas Indonesia	Pembimbing S2	2006
2	Sri Endah Susilowati	Universitas Indonesia	Pembimbing S2	2006
3	Mochammad Zainuri	Universitas Indonesia	Penguji S3	2008
4	Widyastuti	Universitas Indonesia	Penguji S3	2008
5	Is Prima Nanda	Universitas Indonesia	Penguji S3	2009
6	Agus Suprpto	Universitas Indonesia	Penguji S3	2009
7	Tika Mustika	Universitas Indonesia	Membimbing S3	2009

No	Nama	PT/ Universitas	Peran/Tugas	Tahun
8	Rianti Dewi Sulamet Ariobimo	Universitas Indonesia	Penguji S3	2010
9	Yusuf Afandi	Universitas Indonesia	Pembimbing S3	2010
10	Abdul Hay	Universitas Indonesia	Penguji S3	2012
11	Elman Panjaitan	Universitas Indonesia	Penguji S3	2013
12	Chandra Liza	Universitas Indonesia	Penguji S3	2013
13	Mahendra Anggarawidya	Universitas Indonesia	Penguji S3	2013
14	Dwita Suastyanti	Universitas Indonesia	Penguji S3	2013
15	Kirman	Universitas Indonesia	Penguji S3	2014
16	Mellani Cindera Negara	Universitas Padjadjaran	Pembimbing S2	2019
17	Anastasia Susilo	Universitas Padjadjaran	Pembimbing S2	2020
18	Iwan Setyadi	Universitas Indonesia	Penguji S3	2024
19	Yuris Setyoadi	Universitas Diponegoro	Membimbing S3	2024
20	Yasya Khalif Perdana Saleh	Universitas Diponegoro	Membimbing S3	2024

No	Nama	PT/ Universitas	Peran/Tugas	Tahun
21	Evi Ulina Margareta Situmorang	Universitas Diponegoro	Membimbing S3	2025

## K. ORGANISASI PROFESI ILMIAH

No	Nama Organisasi	Jabatan	Tahun
1	Himpunan Perekayasa Indonesia (HIMPERINDO)	Ketua Umum	2019-2021
2	Perhimpinan Periset Indonesia (PPI)	Wakil Ketua Umum	2022-2024
3	Perhimpinan Periset Indonesia (PPI)	Dewan Pengarah	2025-2027
4	Persatuan Insinyur Indonesia	Anggota	2021- saat ini

## L. TANDA PENGHARGAAN

No	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1	Satya Lancana Karya Satya X tahun	Presiden RI	1996
2	Satyalancana Wira Karya	Presiden RI	2005
3	Satya Lancana Karya Satya XX tahun	Presiden RI	2006
4	Satyalancana Pembangunan	Presiden RI	2014

---

5	Satya Lancana Karya Satya XXX tahun	Presiden RI	2016
6	Satyalancana Pembangunan	Presiden RI	2018

---

**P**eningkatan layanan kesehatan, usia harapan hidup, dan kebutuhan penanganan cedera serta penyakit tulang ditambah meningkatnya perhatian terhadap kesehatan dan estetika gigi menjadikan kemandirian produksi implan sebagai prioritas nasional. Orasi ini menegaskan bagaimana substitusi impor dapat dicapai melalui rekayasa teknologi yang memanfaatkan bahan baku lokal.

Melalui kolaborasi antara periset, dokter spesialis, dan industri, riset ini mengembangkan material medis berbasis SS 316L dan paduan titanium, lengkap dengan karakterisasi biokompatibilitas, rancang bangun produk, serta peningkatan tingkat kesiapan teknologi hingga tahap komersial. Orasi ini juga menyoroti penguasaan teknologi kunci manufaktur implan dari implan tulang traumatik dan tulang belakang hingga implan gigi serta integrasi litbang dengan proses industri untuk memperoleh izin edar dan sudah dikomersialkan. Dengan demikian, orasi ini menggambarkan secara ringkas bagaimana inovasi lokal dapat memperkuat 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.2954



ISSN 3090-8485



9 773090 848005