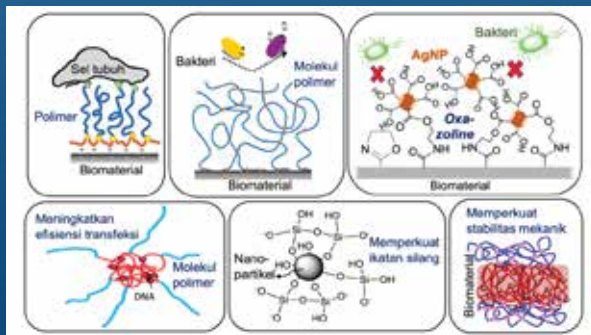


ORASI ILMIAH: RISET DAN INOVASI

STRATEGI MOLEKULER DALAM TEKNOLOGI PERMUKAAN BIOMATERIAL UNTUK MENDUKUNG SEKTOR KESEHATAN NASIONAL

ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET ILMUTEKNIK KIMIA BIDANG MATERIAL KEPAKARAN MATERIAL POLIMER DAN MODIFIKASI PERMUKAAN MATERIAL



OLEH:

BIDHARI PIDHATIKA

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

**STRATEGI MOLEKULER DALAM TEKNOLOGI
PERMUKAAN BIOMATERIAL UNTUK
MENDUKUNG SEKTOR KESEHATAN NASIONAL**

Diterbitkan pertama pada 2025 oleh Penerbit BRIN

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



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

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

Informasi detail terkait lisensi CC BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



**STRATEGI MOLEKULER DALAM
TEKNOLOGI PERMUKAAN BIOMATERIAL
UNTUK MENDUKUNG SEKTOR
KESEHATAN NASIONAL**

**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
ILMU TEKNIK KIMIA
BIDANG MATERIAL
KEPAKARAN MATERIAL POLIMER DAN
MODIFIKASI PERMUKAAN MATERIAL**

OLEH:
BIDHARI PIDHATIKA

Penerbit BRIN

© 2025 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Strategi Molekuler dalam Teknologi Permukaan Biomaterial untuk Mendukung Sektor Kesehatan Nasional/Bidhari Pidhatika–Jakarta: Penerbit BRIN, 2025.

xi + 98 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISSN 3090-8485

1. Biomaterial cerdas
3. Teknologi plasma

2. Fungsionalisasi permukaan
4. Teknologi supramolekuler

610.28

Copy editor : Rahma Hilma Taslima
Proofreader : Martinus Helmiawan
Penata Isi : Rahma Hilma Taslima
Desainer Sampul : Rahma Hilma Taslima

Edisi pertama : Oktober 2025



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

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR.....	vii
BIODATA RINGKAS	1
PRAKATA PENGUKUHAN	3
I. PENDAHULUAN.....	5
II. PERKEMBANGAN PENGELOLAAN TAHURA DI INDONESIA	7
A. Dasar hukum dan Sejarah Pembangunan Tahura.....	7
B. Pengelolaan Tahura periode 1990–1999.....	9
C. Pengelolaan Tahura Periode 2000–2024.....	10
D. Periode Transformasi Pengelolaan Tahura	12
III. URGENSI TRANSFORMASI PENGELOLAAN TAHURA.....	15
A. Kondisi dan Potensi Tahura Saat Ini	15
B. Tantangan yang Dihadapi dalam Pengelolaan Tahura	27
C. Kendala Pengelolaan Tahura Saat Ini.....	29
D. Peluang ke Depan	32
IV. TRANSFORMASI PENGELOLAAN TAMAN HUTAN RAYA: SEBUAH PENDEKATAN HOLISTIK	35
A. Pendekatan Kolaboratif dan Partisipatif: Membangun Tata Kelola Inklusi	35
B. Pemanfaatan Teknologi Digital	36
C. Pengembangan Ekonomi Berbasis Konservasi	38
D. Kebijakan dan Regulasi Adaptif.....	39
E. Rehabilitasi dan Konservasi Ekosistem	41
F. Jejaring Konservasi Nasional: Memperkuat Sistem Ekologis Terpadu	42

G. Pendidikan dan Kesadaran Lingkungan: Membangun Literasi Ekologi	43
H. Transformasi Kebijakan dari Konservasi Konvensional ke Holistik	44
I. Mitigasi Dampak Pembangunan: Menjaga Keseimbangan antara Infrastruktur dan Ekosistem.....	46
V. IMPLIKASI KEBIJAKAN.....	49
A. Bagi Pembuat Kebijakan.....	49
B. Bagi Pengelola Tahura	50
C. Bagi Pemerintah Daerah	51
D. Bagi Stakeholder Non-Pemerintah	52
E. Sistem Monitoring dan Evaluasi untuk Pengelolaan Tahura yang Akuntabel.....	53
VI. KESIMPULAN	57
VI. PENUTUP	59
UCAPAN TERIMA KASIH	61
DAFTAR PUSTAKA.....	63
DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH.....	77
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	89

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Contoh metode (a) kimia, (b) fisika, dan (c) kombinasi fisika–kimia dalam teknologi modifikasi permukaan biomaterial.....	15
Gambar 3.1	Reaksi polimerisasi monomer <i>2-alkyl-2-oxazoline</i> , di mana nilai n , serta gugus R_1 , R_2 , dan R_3 dapat divariasikan dan disesuaikan dengan sifat polimer yang ingin diperoleh.....	25
Gambar 3.2	Reaksi polimerisasi monomer <i>2-methyl-2-oxazoline</i> , di mana jenis inisiator dapat divariasikan untuk menghasilkan rantai polimer yang memiliki a) satu gugus reaktif, yaitu -COOH (asam karboksilat), pada salah satu ujung rantai dan b) dua gugus reaktif, yaitu $CH\equiv C$ (<i>acetylene</i>) pada salah satu ujung, dan -COOH pada ujung lainnya, dilanjutkan dengan inkorporasi antimikroba QAS dan jangkar PLL pada rantai polimer, menghasilkan <i>PLL-g-PMOXA-QAS</i>	29
Gambar 3.3	Polimerisasi monomer <i>N,N-dimethylacrylamide</i> (DMAA) dan ko-monomer <i>methacryloyloxybenzophenone</i> (MABP) dengan inisiator <i>azobisisobutyronitrile</i> (AIBN) menghasilkan <i>poly(N,N-dimethylacrylamide) - n% methacryloyloxybenzophenone</i> atau P(D-MAA-n%MABP), dengan $n = y/(x+y)$	30
Gambar 3.4	Tingkat kecerdasan permukaan biomaterial.....	31
Gambar 3.5	Ilustrasi interaksi antara bakteri dan permukaan biomaterial termodifikasi lapisan tipis PLL-g-PMOXA dengan densitas rantai polimer yang (a-b) kurang optimal dan (c) optimal. (d-f) Citra dari mikroskop kontras fase yang menunjukkan bahwa perlekatan bakteri dapat dicegah secara optimal pada biomaterial termodifikasi PLL-g-PMOXA dengan densitas rantai polimer yang optimal.....	33

- Gambar 3.6 Ilustrasi interaksi antara bakteri dan permukaan biomaterial termodifikasi lapisan tipis (a) PLL-g-PMOXA yang bersifat biopasif, (b) PLL-g-QAS yang bersifat bioaktif, dan (c) PLL-g-PMOXA-QAS yang bersifat biopasif sekaligus bioaktif (menonaktifkan atau *killing*) terhadap bakteri. (d–f) Citra dari mikroskop fluoresensi yang menunjukkan bahwa perlekatan bakteri hidup ataupun nonaktif (mati) dapat dicegah secara optimal pada biomaterial termodifikasi PLL-g-PMOXA-QAS. 37
- Gambar 3.7 Ilustrasi “*a race for the surface*” antara bakteri dan sel tubuh, pada permukaan biomaterial TiO_2 (a) tanpa modifikasi, (b) termodifikasi lapisan tipis PLL-g-PEG yang bersifat biopasif, dan (c) termodifikasi lapisan tipis PLL-g-PEG-RGD yang bersifat biopasif terhadap bakteri namun bioaktif (*attracting*) terhadap sel tubuh. (d–f) Citra dari mikroskop konfokal yang menunjukkan bahwa sel tubuh melekat dan tumbuh paling baik pada permukaan termodifikasi PLL-g-PEG-RGD. 40
- Gambar 3.8 Membran berbasis gelatin dan CHA termodifikasi hidrogel PDMAA pada permukaannya. 43
- Gambar 3.9 Membran berbasis gelatin, kitosan, dan nanopartikel $\text{Ca}(\text{OH})_2$ termodifikasi molekul *tetraethyl orthosilicate* (TEOS) di permukaannya. 44
- Gambar 3.10 Skema pembuatan membran PVA/CNF/BA sebagai membran antibakteri dan modifikasi permukaannya dengan plasma OD–MOXA. 46
- Gambar 3.11 Skema modifikasi permukaan substrat bioplastik dengan plasma berbasis *oxazoline* (MOXA) untuk imobilisasi partikel bioaktif perak (AgNP). 47

Gambar 4.1 Tahapan aplikasi dan evaluasi biomaterial komposit berbasis gelatin/kitosan/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /TEOS sebagai kandidat material regeneratif pulpa gigi:
(a) penampakan fisik purwarupa komposit dalam bentuk serbuk putih; (b) citra morfologi permukaan komposit menggunakan SEM; (c) aplikasi langsung biomaterial ke dalam saluran akar gigi tikus Wistar sebagai model in vivo; dan (d) hasil imunohistokimia yang menunjukkan ekspresi protein nestin yang lebih kuat dibandingkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tanpa matriks polimer. 52

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Potensi biomaterial membran berbasis gelatin/ CHA-PDMAA (pada kolom hijau) dibandingkan dengan produk-produk komersial lainnya.....	51
-----------	---	----

BIODATA RINGKAS



Bidhari Pidhatika, lahir di Jakarta pada tahun 1980, adalah anak kedua dari Bapak Yoanes Chrisostomus dan Ibu Lucia. Menikah dengan Indra Perdana dan dikaruniai tiga orang anak, yaitu Leonardi, Khrisandra, dan Khrisantika.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 43/M Tahun 2024 tanggal 13 Juni 2024, yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Nomor 199/I/HK/2025, tanggal 7 Oktober 2025 tentang Majelis Pengukuhan Profesor Riset, yang bersangkutan dapat melakukan Orasi Ilmiah Pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Marsudirini I Jakarta, tahun 1987–1993, Sekolah Menengah Pertama Marsudirini I Jakarta, tahun 1993–1995, dan Sekolah Menengah Atas Stella Duce I Yogyakarta, tahun 1995–1998. Memperoleh gelar Sarjana Teknik Kimia (S.T.) dari Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, tahun 2003, gelar Magister Teknik Kimia (M.Sc.) dari *Chalmers University of Technology*, Gothenburg, Swedia, tahun 2006, dan gelar Doktor bidang Ilmu Material (Dr.Sc.) dari *ETH Zürich*, Zürich, Swiss, tahun 2011.

Mengikuti beberapa pelatihan yang terkait dengan bidang kompetensinya, antara lain: *pascadoctoral* di *University of Freiburg*, Freiburg, Jerman (tahun pelaksanaan 2016–2018), kunjungan riset di *Flinders University*, Adelaide, Australia

(tahun pelaksanaan 2022–2023), dan kunjungan riset di *State University of New York at Buffalo*, New York, Amerika Serikat (tahun pelaksanaan 2024–2025).

Pernah menduduki jabatan struktural sebagai Sekretaris Program Studi di Politeknik ATK (Akademi Teknologi Kulit), Kementerian Perindustrian (tahun 2011–2013).

Perjalanan karir yang pernah ditempuh adalah sebagai Lektor pada Akademi Teknologi Kulit pada tahun 2012, dan Lektor pada Sekolah Tinggi Manajemen Industri pada tahun 2013. Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Peneliti Ahli Muda golongan III/c tahun 2015, Peneliti Ahli Madya golongan III/d tahun 2020, dan memperoleh jabatan Peneliti Ahli Utama golongan IV/a bidang Material tahun 2024.

Menghasilkan 43 karya tulis ilmiah (KTI) yang ditulis bersama penulis lain dalam bentuk buku, jurnal internasional, prosiding internasional, jurnal nasional, dan prosiding nasional. Sebanyak 39 KTI ditulis dalam bahasa Inggris, dan 4 dalam bahasa Indonesia., serta menghasilkan 4 paten.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing jabatan fungsional peneliti pada BRIN, pembimbing skripsi (S-1) pada Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia dan Universitas Pertamina, pembimbing tesis (S-2) pada ETH Zürich, Universitas Gadjah Mada, *University at Buffalo*, *University of Freiburg*, dan BRIN; pembimbing disertasi (S-3) pada Universitas Gadjah Mada dan Universitas Islam Negeri Mataram.

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, yaitu sebagai anggota bidang kerja sama Perhimpunan Periset Indonesia (PPI) DIY

(2015–2025), anggota bidang advokasi dan kekayaan intelektual PPI Pusat (2024–2029).

Menerima tanda penghargaan *L'Oreal–UNESCO National (Indonesia) Fellowship Program for Women in Science* (tahun 2011), *Alexander von Humboldt Research Fellowship for Experienced Researcher* (tahun 2016), *APEC–Australia Women in Research Fellowship* (tahun 2022), Peneliti berkinerja tinggi (tahun 2024), *Fulbright Visiting Scholar Program* (tahun 2024), Satyalancana Karya Satya X Tahun (tahun 2014), dan Satyalancana Karya Satya XX Tahun (tahun 2024) dari Presiden RI.

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillaahirrahmaanirrahiim.

Assalaamu 'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua.

Om Swastyastu.

Namo Buddhaya.

Salam Kebajikan.

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 (tanggal/bulan/tahun orasi dilaksanakan) menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

**“STRATEGI MOLEKULER DALAM TEKNOLOGI
PERMUKAAN BIOMATERIAL UNTUK MENDUKUNG
SEKTOR KESEHATAN NASIONAL”**

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas kesempatan yang diberikan kepada kita untuk berkumpul dalam forum ilmiah ini. Pada orasi ini, akan disampaikan perkembangan terkini, peluang, dan tantangan dalam penelitian modifikasi

permukaan untuk aplikasi medis dan biomaterial. Penemuan-penemuan dalam bidang ini memberikan wawasan mendalam tentang interaksi material dengan lingkungan biologis dan juga membuka peluang besar untuk pengembangan inovasi teknologi.

Melalui pendekatan multidisiplin yang mencakup teknik fisik, kimia, dan biologis, modifikasi permukaan dapat menghasilkan material dengan sifat yang disesuaikan untuk berbagai aplikasi. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi landasan pengembangan biomaterial unggul berbasis lokal yang mampu bersaing di pasar global. Selain itu, strategi ini memungkinkan penciptaan solusi efektif dalam bidang medis, seperti rekayasa jaringan, sistem pengiriman obat, dan pengembangan implan yang lebih biokompatibel.

Orasi ini diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai kontribusi teknologi modifikasi permukaan terhadap kemajuan ilmu pengetahuan dan aplikasi medis. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat mendukung terciptanya kebijakan yang lebih tepat sasaran dalam sektor kesehatan di Indonesia, sekaligus berkontribusi pada upaya mitigasi dampak kesehatan dari perubahan lingkungan global.

I. PENDAHULUAN

Pada skala nasional, industri alat kesehatan di Indonesia masih menghadapi tantangan besar dalam hal ketergantungan pada produk impor, untuk bahan baku maupun teknologi yang digunakan. Sekitar 70% kebutuhan alat kesehatan di Indonesia masih dipenuhi produk impor (Ngoerah, 2023). Berdasarkan data dari Badan Penyelenggara Jaminan Sosial (BPJS), kebutuhan biomaterial untuk penggantian tulang pangkal paha di Indonesia diperkirakan akan mencapai 272.000 unit pada tahun 2030. Saat ini, sekitar 90% dari kebutuhan tersebut masih dipenuhi produk impor (Maudisha, 2024). Hal ini mengindikasikan adanya kesenjangan dalam kemampuan industri domestik untuk memenuhi kebutuhan nasional. Pada tahun 2021, tercatat sebanyak 891 perusahaan yang bergerak di bidang produksi alat kesehatan, sebuah peningkatan yang signifikan dibandingkan dengan hanya 123 perusahaan pada tahun 2015. Namun, pertumbuhan kuantitatif ini belum sepenuhnya mampu mendorong pemenuhan kebutuhan alat kesehatan dalam negeri (Ngoerah, 2023). Masalah yang sering terjadi pada alat kesehatan adalah infeksi nosokomial, resistensi terhadap antibiotik, penyakit infeksi, dan inflamasi kronis seperti periodontitis. Hal ini mendorong peningkatan kebutuhan akan implan, biosensor/ alat diagnostik penyakit seperti kanker, serta terapi gen (*targeted therapy*), yang menuntut inovasi dalam teknologi modifikasi permukaan biomaterial dan perangkat medis.

Biomaterial merupakan bahan alami atau sintetik yang digunakan dalam aplikasi medis untuk mendukung, memperbaiki, atau menggantikan jaringan biologis yang rusak maupun fungsi jaringan tersebut (*National Institute of Biomedical Imaging*

and Bioengineering, 2024). Diskusi tentang biomaterial tidak dapat dipisahkan dari pembahasan tentang perangkat biomedis (Sukaryo et al., 2016). Titanium murni merupakan salah satu biomaterial yang telah diproses, dibentuk, dan dikombinasikan dengan polietilena yang memiliki berat molekul sangat tinggi (*ultrahigh molecular weight polyethylene*) menjadi perangkat biomedis, seperti prostesis pinggul (Ratner et al., 2020).

Berdasarkan aplikasinya, sebagian besar biomaterial bersentuhan secara langsung dengan fluida biologis dan/ atau jaringan tubuh. Interaksi ini dapat ditemukan, misalnya, pada lensa kontak yang bersentuhan dengan air mata dan jaringan kornea, implan jantung dengan darah, kateter saluran kemih dengan urin dan darah, prostesis pinggul dengan darah, serta implan gigi dengan air liur dan darah. Perangkat medis seperti alat bedah dan biosensor juga termasuk dalam kategori biomaterial dengan kontak langsung terhadap sistem biologis. Selain itu, terdapat pula biomaterial yang tidak bersentuhan langsung dengan fluida biologis, seperti alat bantu dengar dan kaki palsu, yang tetap memainkan peran penting dalam rehabilitasi medis. Sifat-sifat biomaterial yang diperlukan sangat beragam, tergantung pada aplikasi spesifiknya. Untuk mendapatkan biomaterial yang aman bagi tubuh, interaksi antara biomaterial dan tubuh menjadi penting. Oleh karena itu, modifikasi permukaan menjadi langkah strategis untuk meningkatkan biokompatibilitas dan kinerja fungsional biomaterial. Pemilihan biomaterial yang tidak tepat dapat mengakibatkan konsekuensi serius, termasuk rasa sakit, ketidaknyamanan, kebutuhan operasi ulang, hingga kematian dalam kasus tertentu, serta beban ekonomi yang besar. Salah satu masalah utama yang sering terjadi adalah kontaminasi permukaan biomaterial yang bersentuhan dengan fluida atau jaringan biologis, mengingat mikroorganisme seperti bakteri selalu ada di sekitar kita.

Untuk berkontribusi mengurangi ketergantungan impor dan memperkuat kemandirian teknologi dalam negeri, inovasi dan penguasaan teknologi modifikasi permukaan biomaterial dan perangkat medis menjadi penting dengan tujuan menghasilkan permukaan yang: (i) selektif terhadap entitas biologis “buruk” dan “baik”, (ii) stabil dalam lingkungan fisiologis dan biologis, dan (iii) efektif dalam menjembatani hasil uji in vitro ke hasil klinis.

Dalam perjalanan riset sejak 2005, kontribusi riset dan pengembangan teknologi modifikasi permukaan melalui sintesis polimer dan pembentukan lapisan tipis (*thin film*), serta pemahaman fundamental respons entitas biologis pada permukaan telah dilakukan. Teknologi modifikasi permukaan dengan pembentukan lapisan biopasif atau inert secara pasif telah berhasil mencegah perlekatan entitas biologis termasuk bakteri (Konradi et al., 2008; Pidhatika et al., 2008, 2014). Pembentukan lapisan permukaan dual-fungsi biopasif dan bioaktif secara selektif aktif menunjukkan interaksi dengan entitas biologis, baik menonaktifkan bakteri (Pidhatika et al., 2016; Pidhatika & Macgregor, 2023; Pidhatika & Rakhmatullina, 2014) ataupun menarik sel-sel tubuh (Chen et al., 2014; Pidhatika, Zhao, & R  he, 2019; Subbiahdoss et al., 2010). Pembentukan permukaan responsif dengan lapisan tipis polimer telah berhasil menunjukkan respons stimuli eksternal seperti suhu (Ye & Pidhatika, 2010). Di dalam pengembangannya, pengujian stabilitas permukaan dalam lingkungan fisiologis (Chen et al., 2014) maupun biologis (media kultur sel) untuk memastikan fungsionalitas jangka panjang telah dilakukan (Pidhatika et al., 2012). Modifikasi permukaan perancah (scaffold) dan nanopartikel untuk aplikasi regenerasi jaringan tubuh telah terbukti meningkatkan kestabilan perancah secara signifikan (Ardhani et al., 2022; Mahmudi et al., 2024). Integrasi strategi uji biologis sejak tahap awal, termasuk

uji sel mammalia, uji biofilm bakteri, dan pengujian eks vivo atau in vivo pada hewan (Abdulrahman et al., 2024; Handajani et al., 2024) menjadi pendekatan penting untuk menjembatani kesenjangan antara performa laboratorium dan efektivitas klinis. Lebih jauh, modifikasi permukaan dilakukan dengan teknologi plasma untuk menawarkan solusi ramah lingkungan dan efisien dalam skala laboratorium maupun semi-industri (Ninan et al., 2024; Pidhatika et al., 2024; Syibyan et al., 2024; Thulaseedharakurup et al., 2025). Teknologi yang dikembangkan ini diharapkan dapat mendorong hilirisasi teknologi modifikasi permukaan biomaterial.

Naskah orasi ini memaparkan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi modifikasi permukaan biomaterial, strategi molekuler dalam pengembangannya, serta peluang pemanfaatannya untuk mendukung sektor kesehatan di Indonesia. Ketiga hal tersebut akan disampaikan pada Bab II–IV.

II. PERKEMBANGAN TEKNOLOGI MODIFIKASI PERMUKAAN BIOMATERIAL

Perkembangan teknologi modifikasi permukaan biomaterial terus mengalami kemajuan signifikan terutama dalam mengontrol interaksi material dengan lingkungan biologis, mulai dari interaksi yang pasif, aktif, responsif, hingga otonom. Pada awalnya, teknik-teknik yang digunakan dalam teknologi modifikasi permukaan tersebut terbatas pada perlakuan kimia atau fisika sederhana, namun kini telah berkembang ke metode-metode canggih dan efektif seperti perlakuan plasma.

A. Material dasar untuk biomaterial (substrat) dan parameter sifat permukaan

Perangkat medis (biomaterial) dirancang menggunakan beragam jenis material, termasuk logam, keramik, polimer, dan komposit, masing-masing dipilih berdasarkan karakteristik fungsionalnya, baik pada mass (*bulk*) maupun permukaannya (Mukherji et al., 2014; Pidhatika, Ardhani, & Prasetyanto, 2022). Dalam konteks modifikasi permukaan, material dasar ini dikenal sebagai **substrat**, yaitu medium tempat dilakukan modifikasi permukaan untuk mengoptimalkan interaksi biologis dan performa aplikatifnya. Penggunaan substrat dan aplikasi medis yang berbeda-beda membutuhkan beragam strategi dalam memodifikasi permukaan biomaterial.

Seperti yang telah dipaparkan pada Bab I, permukaan biomaterial adalah bagian pertama yang bersentuhan langsung dengan lingkungan biologis. Interaksi awal yang terjadi di permukaan menentukan serangkaian respons biologis yang

dapat mempengaruhi integrasi, biokompatibilitas, dan fungsi jangka panjang dari biomaterial tersebut. Sifat-sifat seperti energi permukaan, topografi, kekasaran, muatan listrik, dan keberadaan gugus fungsi aktif menjadi parameter penting dalam desain dan pengembangan permukaan biomaterial (Ardhani, Diana, & Pidhatika, 2022; Pidhatika et al., 2010). Energi permukaan, yang berkaitan dengan sifat hidrofilik atau hidrofobik serta muatan permukaan, berperan dalam mengontrol perlekatan protein, bakteri, dan sel secara non-spesifik. Kimia permukaan ditentukan oleh jenis dan reaktivitas gugus fungsi, yang mempengaruhi energi serta jalannya reaksi pada permukaan. Dari aspek biokimia, keberadaan reseptor atau faktor pertumbuhan pada permukaan memungkinkan terjadinya interaksi biomolekuler spesifik, seperti mekanisme “lubang kunci dan kunci” antara protein dan enzim. Sementara itu, sifat mekanik permukaan, seperti kekasaran, tekstur, elastisitas, dan modulus Young, berperan dalam mengatur perlekatan, pertumbuhan, proliferasi, dan diferensiasi sel. Seluruh parameter ini secara sinergis membentuk dasar bagi strategi modifikasi permukaan biomaterial yang efektif dan aplikatif (Ardhani, Diana, & Pidhatika, 2022; Chen et al., 2018; Mahajan & Sidhu, 2018).

B. Perkembangan Tingkat Kecerdasan Permukaan Biomaterial

Istilah “*smart biomaterials*” (biomaterial cerdas) pertama kali diperkenalkan pada tahun 2004, merujuk pada material yang dapat merespons sinyal-sinyal spesifik dari sel. Namun, istilah ini bersifat relatif terhadap konteks waktu. Biomaterial yang paling “cerdas” saat ini dapat tertinggal oleh inovasi-inovasi baru dalam beberapa dekade mendatang. Secara umum, tingkat

kecerdasan biomaterial dapat diklasifikasikan menjadi empat tingkat, yaitu biopasif, bioaktif, responsif, dan otonom (Montoya et al., 2021).

Suku Maya antara tahun 350–400 Masehi sudah menggunakan batu jadeite yang bersifat **biopasif** atau inert untuk menggantikan gigi yang hilang. Pada tingkat yang paling dasar ini, material tidak memberikan manfaat biologis tambahan, tetapi juga tidak menimbulkan reaksi merugikan pada tubuh. Material ini dirancang untuk bertahan di dalam tubuh tanpa menimbulkan inflamasi atau reaksi toksik. Meskipun terlihat sederhana, fakta bahwa material ini dapat ditoleransi oleh tubuh manusia sudah menunjukkan tingkat kecerdasan yang paling rendah. Di era yang lebih modern (1960–1970), berbagai material sintetis inert seperti 316L *stainless steel*, *zirconia*, dan *poly(methyl methacrylate)* telah digunakan untuk aplikasi tulang dan telah mendapat persetujuan *Food and Drug Administration* (Montoya et al., 2021).

Memasuki era 1980–an hingga awal 2000–an, muncul generasi biomaterial yang bersifat **bioaktif**, yang memberikan terapi satu arah. Material ini mampu mendukung regenerasi jaringan dengan meningkatkan perlekatan dan proliferasi sel, atau melepaskan senyawa antibakteri dan obat-obatan untuk mencegah infeksi. Contoh nyata adalah komposit resin gigi yang aktif melepaskan perak untuk melawan bakteri penyebab kerusakan gigi, tambalan gigi dengan pelepasan fluorida untuk mencegah karies, dan β -tricalcium phosphate yang telah didoping dengan ion logam seperti magnesium atau strontium untuk meningkatkan osteogenesis (Montoya et al., 2021).

Pada tahun 2000–an hingga pertengahan 2010–an, berkembang biomaterial **responsif** yang menunjukkan kemampuan untuk berinteraksi dengan lingkungan tubuh

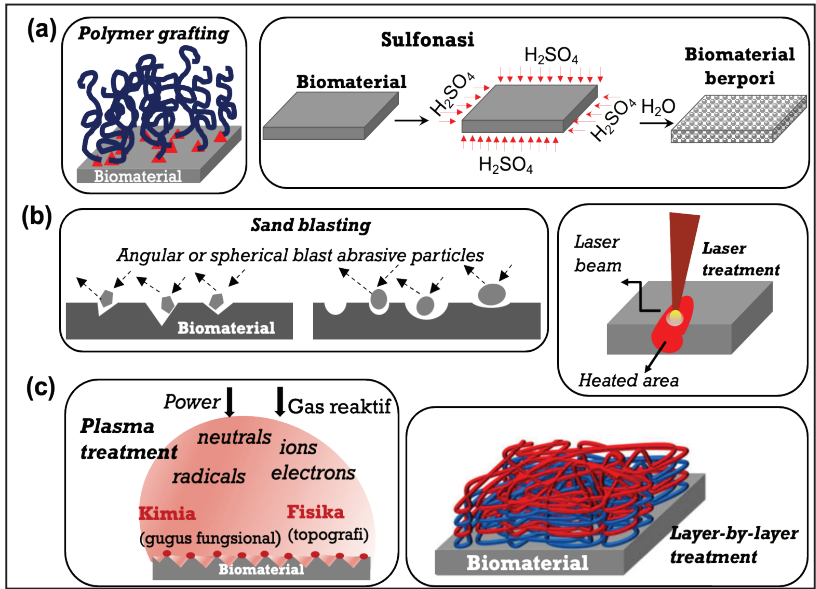
secara lebih dinamis. Material ini dapat merespons rangsangan spesifik seperti perubahan pH, enzim, suhu, atau medan magnet, sehingga dapat melepaskan agen terapeutik secara terkontrol. Sebagai contoh, hidrogel polietilen glikol (PEG) dapat dirancang untuk melepaskan faktor pertumbuhan ketika mendeteksi enzim tertentu. Selain itu, nanokomposit keramik yang responsif terhadap pH mampu melepaskan antibiotik seperti *levofloxacin* secara presisi, memberikan perlindungan yang efektif terhadap infeksi tulang (Montoya et al., 2021).

Pada tingkat kecerdasan tertinggi yang mulai dikembangkan sekitar pertengahan 2010–an, biomaterial **otonom** mampu mendeteksi, merespons, dan beradaptasi terhadap perubahan lingkungan secara mandiri. Teknologi ini dapat memberikan terapi presisi tanpa intervensi manual, menjadikannya langkah revolusioner dalam dunia biomaterial (Montoya et al., 2021). Pengembangan permukaan yang mengatur dirinya sendiri (*self-assembled surfaces*) memanfaatkan prinsip kimia supramolekuler dan interaksi non-kovalen untuk membentuk lapisan fungsional secara spontan, stabil, dan adaptif di atas permukaan biomaterial. Sistem ini mampu memperbarui atau menata ulang strukturnya secara mandiri sesuai perubahan kondisi biologis. Integrasi konsep otonom ini dengan teknologi cetak 4-dimensi (3-dimensi ditambah dengan dimensi waktu) dan kecerdasan buatan membuka peluang pengembangan permukaan biomaterial dengan kecerdasan tertinggi (Ana et al., 2025).

C. Perkembangan Teknologi Modifikasi Permukaan

Seiring meningkatnya kecerdasan permukaan biomaterial dan pemahaman mengenai pentingnya sifat permukaan dalam menentukan interaksi antara biomaterial dan sistem biologis,

teknologi modifikasi permukaan telah berkembang secara signifikan. Evolusi ini mencerminkan pergeseran dari pendekatan konvensional yang sederhana dan terbatas, menuju teknik-teknik mutakhir yang memungkinkan kontrol fungsionalitas permukaan secara presisi hingga ke tingkat molekuler. Bagian berikut menguraikan teknologi modifikasi permukaan yang mencakup metode kimia, fisika, serta kombinasi keduanya, yang telah digunakan untuk meningkatkan performa biomaterial dalam aplikasi medis. **Gambar 2.1** mengilustrasikan beberapa contoh metode pada masing-masing kategori.



Sumber: Pidhatika et al., (2022).

Gambar 2.1 Contoh metode (a) kimia, (b) fisika, dan (c) kombinasi fisika–kimia dalam teknologi modifikasi permukaan biomaterial.

1. Teknologi kimia untuk modifikasi permukaan biomaterial

Metode kimia dalam modifikasi permukaan biomaterial melibatkan reaksi kimia untuk mengubah struktur, komposisi, atau fungsi permukaan suatu material. Salah satu metode kimia paling sederhana yang telah digunakan sejak 1960–an adalah sulfonasi, yaitu teknologi yang memanfaatkan asam sulfat untuk menciptakan pori-pori berukuran mikro dan nano pada permukaan biomaterial. Pori-pori ini memungkinkan biomaterial lebih mudah “menyatu” dengan jaringan tulang, sehingga mempercepat proses penyembuhan. Contohnya adalah pada penggunaan *polyether ether ketone* (PEEK), bahan plastik khusus yang sering digunakan pada implan tulang. Setelah dimodifikasi melalui sulfonasi, PEEK dilapisi dengan bahan seperti hidroksiapatit agar lebih kompatibel dengan tulang (Pidhatika et al., 2022).

Pada era ini pula, mulai dikenal metode *self-assembly* seperti silanisasi dan *thiol monolayer* pada logam dan oksida logam. Teknik ini memanfaatkan reaksi kimia spontan untuk membentuk lapisan fungsional yang tersusun dengan teratur dan stabil. Strategi silanisasi, yang melibatkan pembentukan ikatan kovalen -Si-O-Si antara molekul silan dan gugus hidroksil pada permukaan mineral, sering digunakan untuk meningkatkan stabilitas dan biokompatibilitas biomaterial. Teknik fosfatisasi melibatkan imobilisasi molekul fosfat pada permukaan logam oksida untuk menciptakan lapisan dengan sifat yang dapat disesuaikan untuk berbagai aplikasi (Pidhatika, Ardhani, & Prasetyanto, 2022).

Memasuki era 1990–an, muncul teknologi pencangkakan (*grafting*) polimer yang menawarkan pendekatan lebih fleksibel dalam memodifikasi permukaan biomaterial. Teknik ini melibatkan penambahan polimer pada permukaan biomaterial, yang dapat dilakukan melalui dua metode utama: *grafting*

to dan *grafting from*. Dalam *grafting to*, polimer yang telah disintesis diimobilisasi pada permukaan substrat dengan gugus fungsi jangkar yang sesuai. Dalam *grafting from*, inisiator terlebih dahulu diimobilisasi pada permukaan, diikuti dengan reaksi inisiasi dan polimerisasi monomer pada permukaan. Kedua pendekatan ini memiliki keunggulan unik; *grafting to* menawarkan kontrol yang lebih baik terhadap struktur polimer, sementara *grafting from* memungkinkan pembentukan lapisan polimer dengan densitas yang lebih tinggi (Bousquet et al., 2014; Pidhatika, Ardhani, & Prasetyanto, 2022).

Pencangkakan *polydopamine* sering digunakan untuk meningkatkan stabilitas dan daya lekat permukaan biomaterial. *Polydopamine* bertindak sebagai lapisan antarmuka yang mendukung perlekatan sel dan jaringan, sekaligus memungkinkan penambahan senyawa bioaktif seperti antibiotik atau bahan yang merangsang regenerasi tulang. Pencangkakan polimer juga memberikan fleksibilitas untuk menambahkan sifat khusus seperti hidrofilisitas atau kemampuan antibakteri. Modifikasi permukaan menggunakan pencangkakan *poly (ethylene glycol)* telah digunakan untuk menciptakan permukaan anti-biofilm, yang penting untuk mencegah infeksi pada implan medis (Pidhatika et al., 2012; Subbiahdoss et al., 2010).

Mulai tahun 2000-an, dikenalkan reaksi insersi C-H yang memanfaatkan aktivasi sinar UV atau panas untuk membentuk ikatan kovalen antara gugus aktif dan gugus C-H pada permukaan material, memungkinkan fleksibilitas modifikasi pada substrat organik. Teknik reaksi radikal bebas, yang diinisiasi oleh *benzophenone* dan sinar UV, memfasilitasi pembentukan lapisan polimer yang stabil dan terikat kuat secara kovalen pada permukaan biomaterial (Pidhatika, Ardhani, & Prasetyanto, 2022; Pidhatika, Zhao, & R  he, 2019; Pidhatika et al., 2019; Kleber et al., 2017).

2. Teknologi fisika untuk modifikasi permukaan biomaterial

Modifikasi permukaan biomaterial dengan teknologi fisika seperti tekanan mekanik atau energi radiasi mengubah karakteristik permukaan tanpa mengubah struktur kimia dasar atau komposisi internal dari material tersebut. Berbeda dengan metode kimia yang melibatkan reaksi kimia dan pembentukan ikatan baru, metode fisika mengandalkan proses seperti iradiasi, pengendapan fisik, atau pembentukan pola mikro hingga nano untuk mengatur topografi, kekasaran, energi permukaan, dan sifat fungsional lainnya (Pidhatika et al., 2022). Pada tahun 2010–an, teknologi fisika seperti *sandblasting* dan *laser treatment* semakin banyak digunakan.

Proses *sandblasting* dilakukan dengan menembakkan partikel abrasif seperti Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 ke permukaan biomaterial, untuk menghasilkan kekasaran mikro hingga nano yang dapat disesuaikan melalui ukuran partikel, tekanan, sudut semprot, dan durasi perlakuan (Tang et al., 2017). Karakterisasi biologis menunjukkan bahwa respons optimal sel *osteoblast* terjadi pada permukaan komposit yang diproses menggunakan partikel abrasif.

Laser treatment merupakan metode yang dapat digunakan untuk membentuk topografi permukaan biomaterial secara presisi, mulai dari pola tak beraturan hingga pola teratur seperti alur, kisi, atau pori melingkar. Dimensi pola dapat diatur melalui fluensi laser, jumlah detak (*pulse*), dan panjang gelombang laser. Perlakuan ini meningkatkan kekasaran permukaan tanpa reaksi kimia dan dapat mengarahkan orientasi serta perlekatan sel, seperti yang ditunjukkan pada fibroblas gingiva dan sel *osteoblast* yang tumbuh sejajar mengikuti pola alur (Cordero et al., 2013; Gheisarifar et al., 2021).

3. Teknologi kombinasi fisika dan kimia

Metode kombinasi fisika dan kimia dalam modifikasi permukaan biomaterial menggabungkan prinsip-prinsip fisika (seperti energi, medan listrik, atau radiasi) dengan reaksi kimia. Sebagai contoh, modifikasi struktur topografi permukaan (fisika) disertai dengan penambahan gugus fungsi atau material bioaktif (kimia) diharapkan dapat meningkatkan performa biologis, mekanik, dan fungsional biomaterial (Pidhatika et al., 2022). Beberapa teknologi dalam kategori ini meliputi teknik plasma, *pulsed laser deposition (PLD)*, *electrospinning*, *layer-by-layer assembly*, dan cetak 3-dimensi, yang mulai berkembang bersamaan dengan berkembangnya teknologi fisika pada sekitar tahun 2010–an.

Teknik plasma adalah metode yang menggunakan gas bermuatan listrik untuk mengubah permukaan biomaterial. Meski sering dianggap sebagai modifikasi fisika karena mengubah topografi permukaan, teknologi ini juga merupakan perlakuan kimia karena plasma mengubah komposisi kimia permukaan dengan menambahkan gugus fungsi baru melalui interaksi dengan spesies reaktif dalam plasma (Ninan et al., 2024; Pidhatika et al., 2024, 2025; Syibyan et al., 2024). Gugus kimia seperti -OH atau -COOH dapat ditambahkan untuk meningkatkan daya lekat sel tubuh. Bergantung pada kondisi plasma, teknik ini juga dapat menghasilkan perubahan fisik, seperti peningkatan kekasaran permukaan, yang selanjutnya mendukung integrasi biomaterial dengan jaringan tubuh. Teknologi ini sering diterapkan pada bahan seperti titanium dan polimer inert PEEK, meningkatkan kemampuan implan untuk menyatu dengan jaringan tulang (Pidhatika et al., 2022).

Pulsed laser deposition (PLD) adalah sebuah teknik pelapisan film tipis yang presisi. Dalam metode ini, lapisan tipis biomaterial dibuat melalui ablasi satu atau lebih target material

yang diiradiasi oleh sinar laser berdaya tinggi (Namiki et al., 1986). Sinar tersebut diarahkan ke dalam ruang vakum untuk mengenai target material yang akan dilapiskan pada substrat. Teknologi ini dapat mengontrol ketebalan dan komposisi kimia permukaan. Contohnya adalah penggunaan PLD untuk melapisi titanium dengan bahan keramik bioaktif seperti hidroksiapatit, yang membantu tulang tumbuh lebih cepat di sekitar implan.

Electrospinning adalah metode yang memungkinkan pembentukan lapisan biomaterial menyerupai serat-serat kecil yang sangat mirip dengan struktur jaringan tubuh alami. Lapisan ini mendukung pertumbuhan sel dan berfungsi sebagai perancah untuk regenerasi jaringan yang rusak. Aplikasi teknologi ini meliputi pembuatan perancah bioaktif untuk rekayasa jaringan tulang dan kulit, di mana regenerasi jaringan sangat penting (Bhardwaj & Kundu, 2010).

Layer-by-layer assembly memberikan fleksibilitas untuk menambahkan lapisan material secara bertahap, menciptakan permukaan biomaterial dengan sifat yang dapat dirancang sesuai kebutuhan. Misalnya, metode ini dapat digunakan untuk menambahkan lapisan hidrogel bioaktif yang mempercepat penyatuan tulang dengan implan. Lapisan ini juga dapat mengontrol pelepasan obat, meningkatkan efisiensi pengobatan langsung pada lokasi implantasi (Richardson et al., 2015).

Cetak 3-dimensi (*3D printing*), bahkan 4-dimensi jika dikombinasikan dengan dimensi waktu (Ana et al., 2025), merupakan teknologi modifikasi permukaan yang paling mutakhir saat ini, yang menawarkan peluang untuk menciptakan biomaterial dengan desain spesifik sesuai kebutuhan pasien. Setelah biomaterial dicetak, permukaannya dapat dimodifikasi dengan teknologi plasma atau pelapisan untuk meningkatkan daya lekat dan mendukung penyembuhan. Contohnya adalah

implan tulang berbasis PEEK yang dicetak dengan desain khusus untuk mempercepat osseointegrasi dan menurunkan risiko infeksi (Wang et al., 2024).

III. PENGEMBANGAN TEKNOLOGI MODIFIKASI PERMUKAAN BIOMATERIAL

Riset dalam teknologi modifikasi permukaan selama dua dekade (2005–2025) ini merupakan integrasi keilmuan multidisipliner yang saling melengkapi. Riset dimulai dari tahap sintesis polimer melalui reaksi polimerisasi terkontrol, dilanjutkan dengan karakterisasi hasil sintesis secara komprehensif. Polimer hasil sintesis kemudian diimobilisasi ke permukaan substrat dilanjutkan dengan karakterisasi permukaan secara kimia dan fisika untuk memahami struktur, energi permukaan, dan stabilitas lapisan yang dihasilkan. Tahap berikutnya mencakup fungsionalisasi polimer dengan molekul fungsional seperti *quaternary ammonium salt* (QAS), *antimicrobial peptide* (AMP), molekul *tripeptide* RGD, asam folat, dan laminin, melalui gugus-gugus fungsi reaktif pada polimer. Pengujian kinerja permukaan terkait aplikasinya untuk biomaterial dan perangkat medis dilakukan antara lain dengan pengujian interaksi permukaan dengan entitas biologis seperti protein serum, bakteri, dan sel jaringan tubuh. Seluruh rangkaian kegiatan riset ini membutuhkan ketrampilan dan pemahaman lintas disiplin mulai dari kimia organik, kimia polimer, fisika permukaan, biokimia, hingga mikrobiologi, yang menjadi fondasi penting dalam pengembangan biomaterial modern.

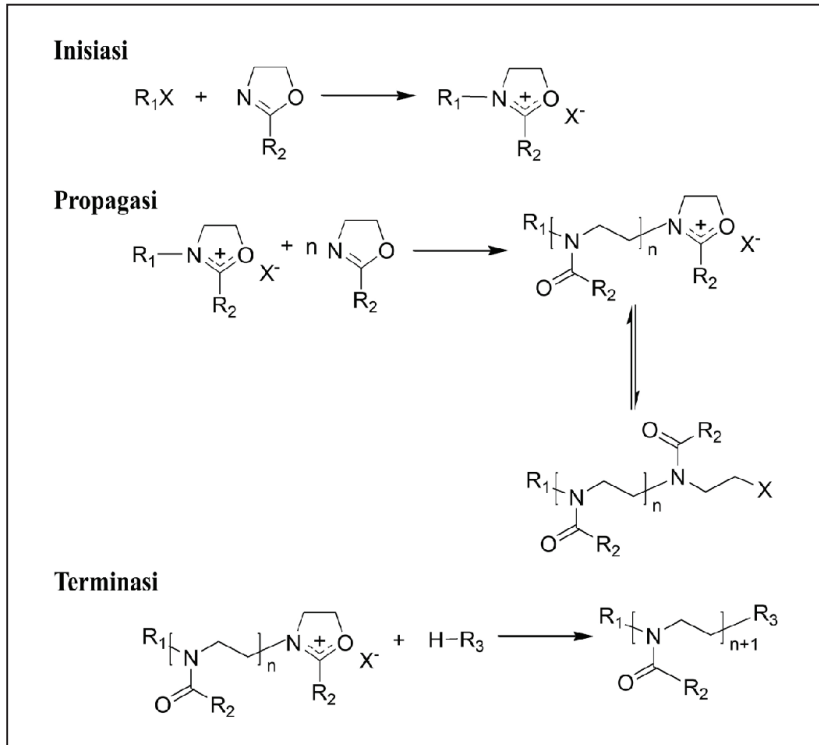
A. Sintesis polimer untuk aplikasi biomaterial medis

Perkembangan teknologi modifikasi permukaan yang telah dipaparkan pada Bab II menunjukkan bahwa modifikasi sifat-

sifat permukaan biomaterial dapat dilakukan dengan ataupun tanpa penambahan material lain ke material dasar atau substrat (Pidhatika et al., 2022). Pendekatan yang banyak dieksplorasi dalam riset ini adalah dengan penambahan **polimer sebagai lapisan tipis pada permukaan biomaterial**. Alasan pemilihan ini adalah karena sifat-sifat polimer yang mudah direkayasa (*highly tunable*) melalui proses sintesis, misalnya panjang/pendeknya rantai polimer, reaktif/ non-reaktif, dan polar/non-polar (Hoogenboom, 2007, 2009; Hoogenboom & Schlaad, 2017; Lava et al., 2015). Dalam konteks biomaterial, polimer berfungsi sebagai *versatile toolbox* (“kotak alat serbaguna”) yang memungkinkan modifikasi permukaan material secara presisi, dalam bentuk lapisan tipis (Hoogenboom, 2009; Lava et al., 2015). Sifat-sifat yang dapat dikontrol ini memungkinkan perancangan permukaan biomaterial dan alat-alat kesehatan yang lebih tepat sasaran sesuai kebutuhan aplikasinya.

Riset dalam teknologi modifikasi permukaan diawali dengan mengeksplorasi *versatility* dari polimer berbasis *oxazoline*. Strategi stoikiometri dan inkorporasi gugus kimia pada reaksi polimerisasi molekul (*2-alkyl-2-oxazoline*) (**Gambar 3.1**) (Konradi et al., 2008; Pidhatika, Ardhani, & Prasetyanto, 2022; von Erlach et al., 2011) dilakukan untuk menghasilkan (ko)polimer yang: (i) dapat diimobilisasi ke permukaan substrat biomaterial bermuatan negatif, (ii) bersifat biopasif apabila diimobilisasi ke permukaan substrat dengan densitas permukaan yang memadai, (iii) memiliki stabilitas terhadap paparan lingkungan fisiologis, dan (iv) dapat direaksikan dengan gugus fungsi lainnya untuk menginkorporasi molekul fungsional lainnya dan meningkatkan kinerja biomaterial. Dalam reaksi polimerisasi tersebut, nilai n pada rantai polimer menentukan berat molekul dan panjang rantai, yang selanjutnya mempengaruhi sifat permukaan biomaterial setelah imobilisasi. Gugus substituen R_1 , R_2 , dan R_3

dapat memengaruhi reaktivitas untuk inkorporasi gugus fungsi lainnya, hidrofobisitas, dan respons polimer terhadap stimuli seperti pH dan suhu (Hoogenboom, 2007, 2009).



Sumber: Pidhatika, Ardhani, & Prasetyanto, (2022); Rossegger et al., (2013); Verbraeken et al., (2017).

Gambar 3.1 Reaksi polimerisasi monomer *2-alkyl-2-oxazoline*, di mana nilai n , serta gugus R_1 , R_2 , dan R_3 dapat divariasikan dan disesuaikan dengan sifat polimer yang ingin diperoleh.

Penambahan gugus-gugus fungsi pada rantai polimer memungkinkan desain yang lebih kompleks dan fungsional. Gambar 3.2 menunjukkan *poly(2-methyl-2-oxazoline)* (PMOXA) yang dimodifikasi dengan gugus asetilena (-CHCH) dan asam karboksilat (-COOH), masing-masing untuk inkorporasi molekul antimikroba seperti *quaternary ammonium salt* (QAS) dan polikation seperti *poly(L-lysine)* (PLL). Kombinasi ini menghasilkan kopolimer cangkok (*graft copolymer*) PLL-g-PMOXA-QAS. Pada pH netral, PLL bermuatan positif dan dapat berperan sebagai *anchor* (jangkar) yang berinteraksi dengan permukaan substrat bermuatan negatif, melalui ikatan fisis elektrostatis. PMOXA dengan rantai polimer hidrofilik berperan sebagai lapisan biopasif yang mencegah perlekatan entitas biologis. Tidak kalah penting, QAS berperan sebagai molekul bioaktif yang bersifat menonaktifkan (*killing*) bakteri (Pidhatika, Ardhani, & Prasetyanto, 2022; Pidhatika & Rakhmatullina, 2014). Fungsionalisasi dengan molekul fungsional lainnya melalui gugus asetilena juga telah dilakukan, misalnya *mannose* untuk diagnostik dan *antimicrobial peptide* (AMP) untuk mencegah infeksi bakteri (Pidhatika & Macgregor, 2023).

Berbeda dengan polimer berbasis *oxazoline*, strategi stoikiometri dan penambahan gugus *benzophenone* pada reaksi polimerisasi (*N,N*-dimethylacrylamide) (DMAA) yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 dilakukan untuk menghasilkan (ko)polimer yang: (i) dapat diimobilisasi secara efisien ke permukaan substrat biomaterial yang kaya gugus -CH, dan (ii) dapat membentuk ikatan kovalen yang dipicu oleh aktivasi sinar UV sehingga terjadi ikatan silang (hidrogel) dengan densitas terkontrol. Gugus *benzophenone* memungkinkan pembentukan ikatan silang secara kovalen dengan molekul lain yang membawa gugus -CH melalui aktivasi sinar UV, sehingga memberikan

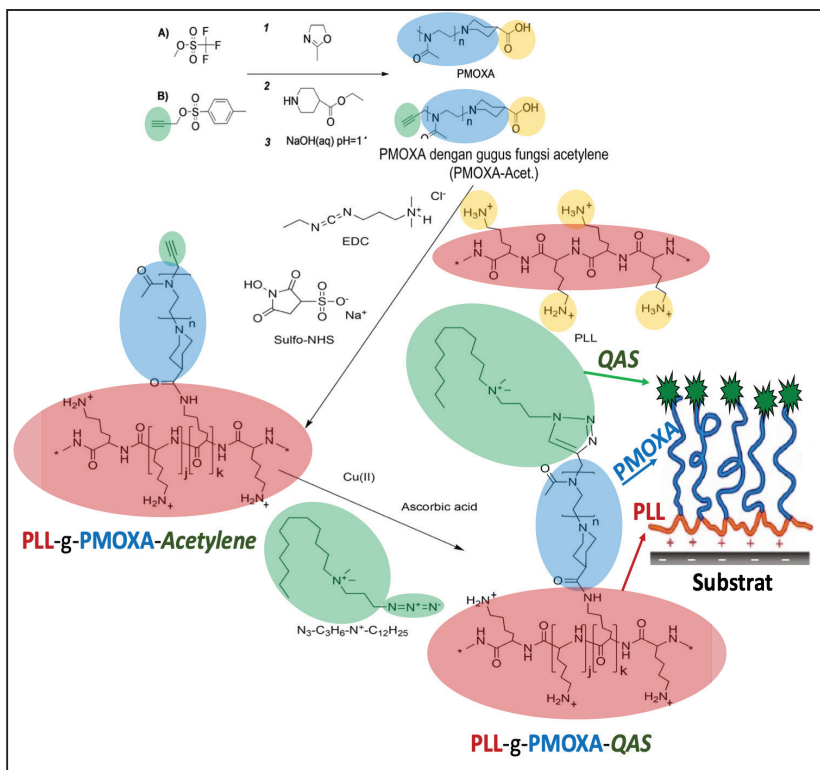
stabilitas lapisan polimer yang tinggi pada permukaan substrat (Pidhatika, Ardhani, & Prasetyanto, 2022; Pidhatika, et al., 2019). Proses ini juga memungkinkan pengaturan densitas ikatan silang yang berpengaruh pada sifat pembengkakan polimer ketika terpapar larutan berbasis air, membuatnya ideal untuk aplikasi dalam mencegah perlekatan bakteri, sekaligus sebagai sistem pelepasan obat berbasis hidrogel.

Dalam bidang modifikasi permukaan biomaterial, salah satu konsep yang menjadi perhatian adalah interaksi molekul-molekul polimer dan pembentukan konformasi tertentu pada permukaan substrat. Pemahaman tentang konformasi polimer ini penting karena menentukan performa dan stabilitas lapisan biomaterial dalam berbagai aplikasi medis. Penelitian dan inovasi yang dilakukan berfokus pada eksplorasi dua konformasi utama polimer pada permukaan biomaterial: konformasi sikat (*brush*) (Chen et al., 2014; Konradi et al., 2008; Pidhatika et al., 2008, 2012; Pidhatika & Macgregor, 2023; Pidhatika & Nalam, 2019; Pidhatika & Rakhmatullina, 2014; Subbiahdoss et al., 2010; von Erlach et al., 2011) dan konformasi jaring (*network*) (Ardhani et al., 2022; Pidhatika, Zhao, & R  he, 2019; Pidhatika, et al., 2019).

Konformasi sikat diilustrasikan seperti sikat di mana salah satu ujung dari rantai-rantai polimer terikat erat pada permukaan substrat, sedangkan ujung lainnya bebas bergerak (**Gambar 3.2**) (Ma et al., 2019; Pidhatika et al., 2010). Keunggulan utama dari konformasi sikat terletak pada kemampuannya untuk menghasilkan lapisan ultra-tipis dengan kerapatan tinggi yang memberikan perlindungan sterik terhadap perlekatan protein dan bakteri. Hal ini menjadikan konformasi sikat sangat ideal untuk aplikasi kesehatan yang menuntut sifat biopasif (*anti-biofouling*), seperti pada permukaan implan medis, kateter,

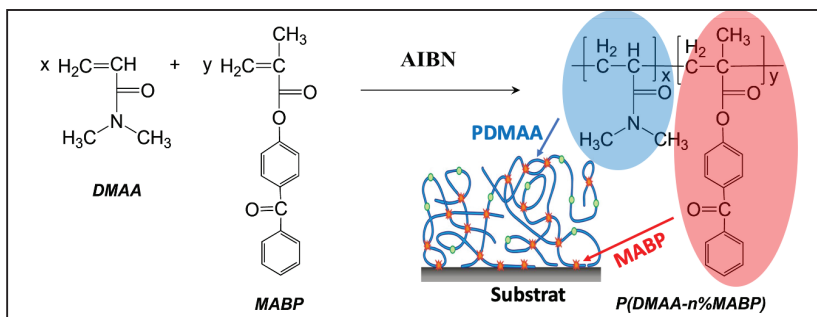
biosensor, serta sistem penghantaran obat atau terapi gen yang sensitif terhadap lingkungan biologis. Selain itu, struktur sikat memungkinkan desain permukaan yang responsif namun tetap tipis, sehingga tidak mengganggu fungsi mekanik alat kesehatan dan mendukung miniaturisasi perangkat medis berpresisi tinggi. Keunggulan ini diperkuat dengan fleksibilitas kimia yang memungkinkan modifikasi lanjut untuk menambahkan fungsi bioaktif atau diagnostik secara terkontrol (Chen et al., 2014; Konradi et al., 2008; Pidhatika et al., 2008, 2012; Pidhatika & Macgregor, 2023; Pidhatika & Nalam, 2019; Pidhatika & Rakhmatullina, 2014; Subbiahdoss et al., 2010; von Erlach et al., 2011).

Berbeda dengan konformasi sikat, konformasi jaring membentuk struktur yang menyerupai tumpukan spageti di atas piring, sebagaimana diilustrasikan pada **Gambar 3.3** (Pidhatika, et al., 2019; Zhao & Pidhatika, 2020). Konformasi jaring, yang sering disebut sebagai hidrogel, memberikan ketebalan lapisan yang lebih besar dan stabil dibandingkan dengan konformasi sikat. Hidrogel juga memiliki kapasitas penyimpanan air yang tinggi, sehingga sesuai untuk aplikasi medis yang membutuhkan kelembaban tinggi, fleksibilitas mekanik, dan pelepasan zat bioaktif secara terkontrol. Hal ini menjadikannya sangat potensial untuk digunakan dalam rekayasa jaringan, pembalut luka, sistem penghantaran obat jangka panjang, dan permukaan implan yang menyesuaikan dengan jaringan tubuh. Struktur hidrogel yang menyerupai jaringan biologis juga memberikan lingkungan mikro yang mendukung pertumbuhan dan diferensiasi sel, sehingga berkontribusi signifikan terhadap keberhasilan terapi regeneratif dan aplikasi klinis lainnya (Ardhani et al., 2022; Pidhatika, Zhao, & R  he, 2019; Pidhatika, et al., 2019).



Sumber: Pidhatika, Ardhani, & Prasetyanto, (2022); Pidhatika & Rakhmatullina, (2014).

Gambar 3.2 Reaksi polimerisasi monomer *2-methyl-2-oxazoline*, di mana jenis inisiator dapat divariasikan untuk menghasilkan rantai polimer yang memiliki a) satu gugus reaktif, yaitu -COOH (asam karboksilat), pada salah satu ujung rantai dan b) dua gugus reaktif, yaitu $\text{CH}\equiv\text{C}$ (*acetylene*) pada salah satu ujung, dan -COOH pada ujung lainnya, dilanjutkan dengan inkorporasi antimikroba QAS dan jangkar PLL pada rantai polimer, menghasilkan *PLL-g-PMOXA-QAS*.



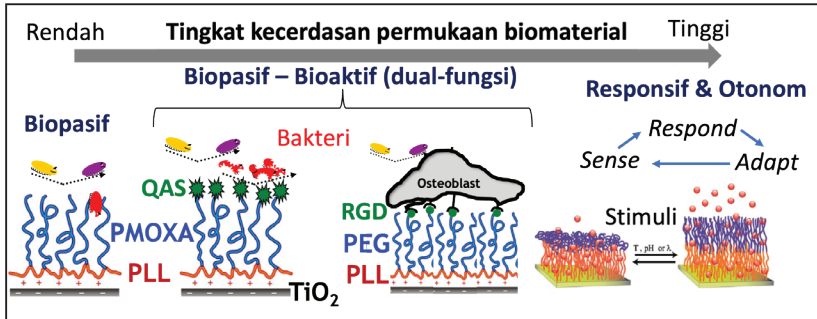
Sumber: Pidhatika, Ardhani, & Prasetyanto, (2022); Pidhatika, et al., (2019).

Gambar 3.3 Polimerisasi monomer *N,N*-dimethylacrylamide (DMAA) dan ko-monomer *methacryloyloxybenzophenone* (MABP) dengan inisiator *azobisisobutyronitrile* (AIBN) menghasilkan *poly(N,N-dimethylacrylamide) - n% methacryloyloxybenzophenone* atau $P(\text{DMAA}-n\%\text{MABP})$, dengan $n = y/(x+y)$.

B. Lapisan permukaan polimer untuk pengembangan biomaterial yang biopasif hingga responsif

Berdasarkan paparan pada Bab II, tingkat kecerdasan permukaan dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 3.4 (Montoya et al., 2021). Pada gambar tersebut, *poly(L-lysine)* (PLL) adalah salah satu contoh molekul jangkar yang digunakan untuk berikatan secara elektrostatis dengan substrat metal oksida seperti TiO_2 , Nb_2O_5 , SiO_2 . Polimer pemodifikasi permukaan seperti PMOXA dan PEG memberikan sifat inert pada permukaan, menjadikannya biokompatibel tanpa menimbulkan respons biologis yang tidak diinginkan. Molekul seperti *quaternary ammonium salt* (QAS) memberikan sifat bioaktif dengan kemampuan menonaktifkan (*killing*) bakteri, sementara RGD merupakan contoh molekul bioaktif yang dirancang untuk menarik dan mendukung perlekatan sel-sel tubuh (*attracting*). Pada tingkat responsif,

polimer seperti *poly(propyl oxazoline)* dan PNIPAM digunakan karena kemampuannya untuk merespons rangsangan lingkungan seperti suhu atau pH, memberikan fleksibilitas lebih dalam aplikasi biomaterial.



Sumber: Montoya et al., (2021).

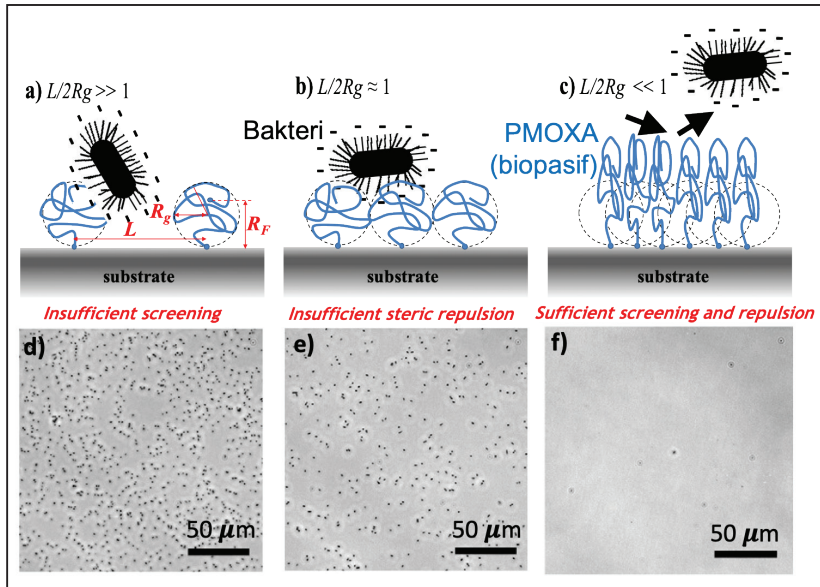
Gambar 3.4 Tingkat kecerdasan permukaan biomaterial.

1. Lapisan tipis biopasif berbasis polimer untuk perlindungan sterik biomaterial

Pengembangan lapisan biopasif telah dikembangkan (Konradi et al., 2008; Pidhatika et al., 2008), salah satunya lapisan tipis *poly(2-methyl-2-oxazoline)* (PMOXA) dengan konfigurasi sikat. PMOXA merupakan polimer yang mampu mencegah penempelan protein pada tingkat yang setara dengan *polyethylene glycol* (PEG), polimer standar yang sebelumnya banyak digunakan untuk aplikasi ini. Keunggulan PMOXA terletak pada kestabilannya yang lebih baik dibandingkan PEG dalam lingkungan fisiologis dan biologis (Chen et al., 2014; Pidhatika et al., 2012), menjadikannya pilihan yang menjanjikan untuk aplikasi jangka panjang seperti implan medis, biosensor, dan sistem penghantaran obat. Penelitian ini melibatkan desain kopolimer *poly(L-lysine)*-graft-PMOXA (PLL-g-PMOXA), di

mana rantai PMOXA diikatkan pada tulang punggung PLL. Struktur sikat yang dihasilkan dirancang untuk mengurangi perlekatan protein hingga di bawah 2 ng/cm². Hasil penelitian menunjukkan bahwa densitas pencangkokan optimal sangat penting untuk memastikan sifat anti-protein yang maksimal. Studi ini juga membandingkan performa PMOXA dengan PEG dalam kondisi identik, dan hasilnya memperlihatkan bahwa PMOXA memiliki sifat biopasif yang setara, sekaligus menawarkan potensi untuk dikembangkan lebih lanjut melalui modifikasi kimia yang terkontrol. Inovasi ini merupakan fondasi penting untuk menghasilkan permukaan biomaterial yang dapat mencegah kontaminasi bakteri sebagai proses awal pembentukan biofilm (Konradi et al., 2008; Pidhatika et al., 2008).

Kelanjutan dari penelitian ini adalah pemahaman tentang pengaruh arsitektur polimer terhadap interaksi antara permukaan biomaterial dan entitas biologis seperti protein dan bakteri (Pidhatika et al., 2010; Pidhatika & Nalam, 2019). Fokus penelitian adalah konformasi sikat dari rantai polimer yang terikat pada substrat. Variasi kerapatan pencangkokan dan panjang rantai polimer terbukti memainkan peran penting dalam menentukan sifat permukaan yang dihasilkan. Hasil studi mengungkapkan bahwa struktur sikat padat yang terbentuk dari polimer seperti PMOXA dapat memberikan perlindungan sterik yang signifikan terhadap perlekatan bakteri dan protein, bahkan dalam lingkungan biologis yang kompleks. Interaksi non-spesifik, seperti gaya elektrostatik dan hidrofobik, dapat diminimalkan melalui desain konformasi sikat yang tepat. Penelitian ini memberikan pemahaman fundamental tentang peran konformasi polimer dalam meningkatkan performa permukaan biomaterial untuk aplikasi *anti-biofouling*, seperti diilustrasikan pada **Gambar 3.5** (Pidhatika et al., 2010).



Sumber: Pidhatika et al. (2010).

Gambar 3.5 Ilustrasi interaksi antara bakteri dan permukaan biomaterial termodifikasi lapisan tipis PLL-g-PMOXA dengan densitas rantai polimer yang (a-b) kurang optimal dan (c) optimal. (d-f) Citra dari mikroskop kontras fase yang menunjukkan bahwa perlekatan bakteri dapat dicegah secara optimal pada biomaterial termodifikasi PLL-g-PMOXA dengan densitas rantai polimer yang optimal.

Pengaruh parameter-parameter desain juga dipahami secara mendalam, seperti densitas pencangkakan dan konformasi lapisan sikat terhadap kinerja permukaan biomaterial dalam mencegah perlekatan protein dan bakteri, sekaligus memberikan efek lubrikasi pada permukaan (Pidhatika et al., 2014; Pidhatika & Nalam, 2019). Dengan menggunakan analisis multivariat pada data yang diambil menggunakan alat karakterisasi *Time of Flight – Secondary Ion Mass Spectroscopy* (ToF-SIMS), hasil

penelitian berhasil memvalidasi kemampuan lapisan PMOXA dengan densitas pencangkakan optimum untuk menolak adsorpsi protein, bahkan setelah paparan ke serum manusia. Temuan ini sangat penting dalam pengembangan alat kesehatan seperti kateter, implan, dan biosensor, yang sering kali mengalami penurunan kinerja akibat *fouling* biologis. Dengan mengurangi interaksi nonspesifik tersebut, permukaan biomaterial dapat mempertahankan fungsi optimal lebih lama, mengurangi risiko infeksi, dan meningkatkan kenyamanan serta keamanan pasien.

Aspek penting lainnya adalah terkait kestabilan lapisan pemodifikasi pada permukaan yang dimodifikasi dalam kondisi lingkungan biologis yang kompleks. PMOXA menunjukkan stabilitas yang unggul dibandingkan PEG dalam lingkungan oksidatif maupun fisiologis. Studi stabilitas ini menjadi krusial karena lapisan permukaan biomaterial sering kali terpapar oksidasi akibat reaksi imunologis, seperti pelepasan radikal bebas oleh makrofag. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan berbasis PMOXA memiliki sifat biopasif yang setara dengan PEG namun lebih tahan terhadap degradasi. PMOXA mempertahankan lebih dari 80% ketebalan awalnya bahkan setelah paparan larutan oksidatif selama 336 jam, sementara PEG kehilangan hingga 40-50% ketebalannya pada kondisi yang sama. Dengan menggunakan analisis spektroskopi canggih, seperti *variable angle spectroscopic ellipsometry* (VASE), *X-ray photoelectron spectroscopy* (XPS), dan *optical waveguide lightmode spectroscopy* (OWLS), berhasil diidentifikasi bahwa degradasi PEG cenderung memicu adsorpsi protein serum lebih tinggi. Sebaliknya, lapisan PMOXA menunjukkan ketahanan luar biasa terhadap *biofouling* bahkan setelah mengalami paparan kondisi ekstrem (Chen et al., 2014; Pidhatika et al., 2012). Temuan ini memberikan kontribusi signifikan terhadap

desain biomaterial yang mendukung fungsi dan kestabilan biologis yang diinginkan.

Sifat biopasif polimer berbasis *oxazoline* (PLL-g-PMOXA) yang dikembangkan dengan rantai PMOXA sebagai pelindung sterik terhadap perlekatan protein nonspesifik selanjutnya digunakan sebagai *platform* yang mendukung proses transfeksi DNA. Lapisan ini memanfaatkan interaksi elektrostatis antara rantai PLL bermuatan positif dengan DNA bermuatan negatif, yang memungkinkan pembentukan kompleks DNA-PLL-g-PMOXA yang stabil untuk mendukung proses transfeksi. Hasil studi menunjukkan bahwa lapisan ini mampu meningkatkan efisiensi transfeksi DNA pada sel target tanpa menyebabkan toksisitas yang signifikan (von Erlach et al., 2011). Sifat biopasif dari PMOXA membantu mengurangi interaksi nonspesifik dengan protein serum, yang sering kali menjadi penghambat utama dalam transfeksi DNA yang efisien. Dengan memberikan perlindungan terhadap degradasi DNA dalam media biologis sekaligus meningkatkan pengiriman gen secara efisien ke dalam sel, lapisan PLL-g-PMOXA menawarkan solusi inovatif untuk aplikasi terapi gen.

Berbeda dengan konformasi sikat yang dipaparkan di atas, telah dikembangkan juga konsep konformasi jaring pada permukaan biomaterial, dengan mengeksplorasi potensi *poly(2-oxazoline)* untuk menciptakan lapisan biopasif yang lebih tebal dan lebih stabil terikat secara kovalen dengan substrat dibandingkan konformasi sikat. Dalam penelitian ini, rantai *poly(2-ethyl-2-oxazoline)* (PEOXA) yang telah dimodifikasi dengan gugus benzofenon digunakan untuk menghasilkan lapisan hidrogel yang melekat erat pada permukaan substrat. Dengan memanfaatkan iradiasi UV pada panjang gelombang tertentu, molekul benzofenon berfungsi sebagai pengikat silang

yang memungkinkan pembentukan jaringan polimer yang stabil secara kovalen pada permukaan biomaterial. Hasil studi menunjukkan bahwa lapisan hidrogel berbasis PEOXA mampu menghalangi adsorpsi protein secara signifikan, setara dengan hidrogel berbasis *poly(dimethylacrylamide)* (PDMAA), sistem biopasif yang sebelumnya telah tervalidasi (Kleber et al., 2017; Pidhatika, Zhao, & R  he, 2019). Hidrogel PEOXA membuka jalan untuk perancangan permukaan biomaterial dan perangkat medis dengan ketahanan tinggi terhadap *fouling* biologis, baik oleh protein serum maupun biofilm bakteri, tanpa memerlukan agen antimikroba tambahan.

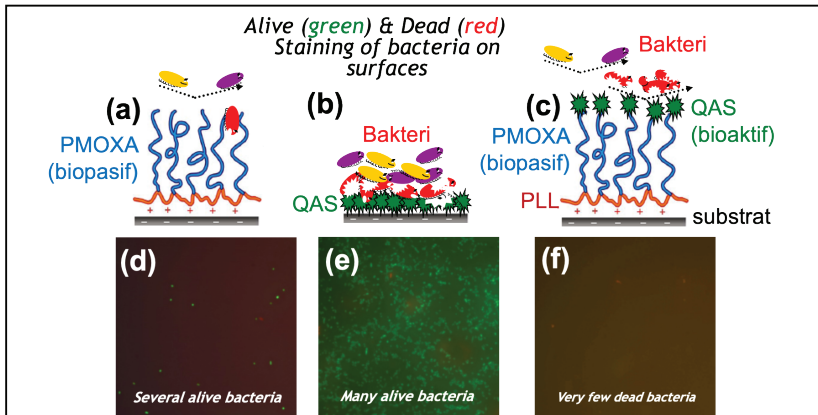
2. Lapisan polimer dual-fungsi sebagai lapisan antibakteri dan mendukung integrasi sel

Lapisan dual-fungsi dikembangkan untuk menciptakan permukaan biomaterial yang mampu mencegah kolonisasi bakteri namun berinteraksi aktif dengan entitas biologis. Strategi ini menggabungkan sifat biopasif dan bioaktif pada permukaan.

2.1 Lapisan polimer dual-fungsi sebagai lapisan antibakteri

Lapisan dual-fungsi antibakteri bertujuan untuk menciptakan permukaan biomaterial yang mampu menolak entitas yang tidak diinginkan seperti protein nonspesifik dan bakteri, dan sekaligus menonaktifkan (*killing*) bakteri yang berhasil mendekati permukaan. Pendekatan ini menggunakan sistem kopolimer pencangkakan berbasis *poly(L-lysine)-graft-poly(2-methyl-2-oxazoline)-quaternary ammonium salt* (PLL-g-PMOXA-QAS), di mana rantai PMOXA memberikan perlindungan sterik terhadap perlekatan protein dan bakteri, sementara senyawa QAS berfungsi sebagai agen bioaktif yang menonaktifkan bakteri melalui interaksi membran (Gambar 3.6). Desain ini

menghasilkan lapisan dual-fungsi, yaitu menghambat perlekatan bakteri dan mencegah kontaminasi dari residu membran bakteri mati, sehingga menjaga permukaan tetap bersih dan aman (Pidhatika & Rakhmatullina, 2014). Hasil penelitian ini relevan dalam mengatasi isu infeksi nosokomial dan resistensi bakteri terhadap antibiotik. Studi awal menunjukkan bahwa lapisan *PLL-g-PMOXA-QAS* efektif dalam menekan pembentukan biofilm sambil mempertahankan permukaan bebas kontaminasi, bahkan dalam kondisi biologis yang kompleks.



Sumber: Pidhatika & Rakhmatullina (2014)

Gambar 3.6 Ilustrasi interaksi antara bakteri dan permukaan biomaterial termodifikasi lapisan tipis (a) PLL-g-PMOXA yang bersifat biopasif, (b) PLL-g-QAS yang bersifat bioaktif, dan (c) PLL-g-PMOXA-QAS yang bersifat biopasif sekaligus bioaktif (menonaktifkan atau *killing*) terhadap bakteri. (d–f) Citra dari mikroskop fluoresensi yang menunjukkan bahwa perlekatan bakteri hidup ataupun nonaktif (mati) dapat dicegah secara optimal pada biomaterial termodifikasi PLL-g-PMOXA-QAS.

Strategi reaksi klik (*click chemistry*) berbasis polimer *oxazoline* telah menjadi dasar dalam memperluas aplikasi biomaterial untuk berbagai keperluan (Lava et al., 2015). Melalui reaksi ini, *platform* berbasis PMOXA dikembangkan untuk bersifat biopasif, sekaligus memungkinkan modifikasi lebih lanjut melalui reaksi klik antara gugus asetilena dan azida. Reaksi ini, yang memanfaatkan katalis tembaga, menawarkan ikatan kovalen yang stabil dan spesifik tanpa mengubah sifat fisik dan kimia substrat. Molekul bioaktif seperti *mannose* dan *antimicrobial peptide* (AMP) berhasil diinkorporasikan ke dalam platform ini, menciptakan permukaan dual-fungsi. *Mannose*, sebagai molekul diagnostik, memberikan kemampuan deteksi melalui interaksi dengan protein pengikat spesifik, sementara AMP memberikan aktivitas antimikroba untuk mencegah kolonisasi bakteri. Strategi ini memberikan fleksibilitas tinggi, memungkinkan penggunaan *platform* ini untuk aplikasi biosensor, implan medis, dan alat diagnostik lainnya (Pidhatika & Macgregor, 2023).

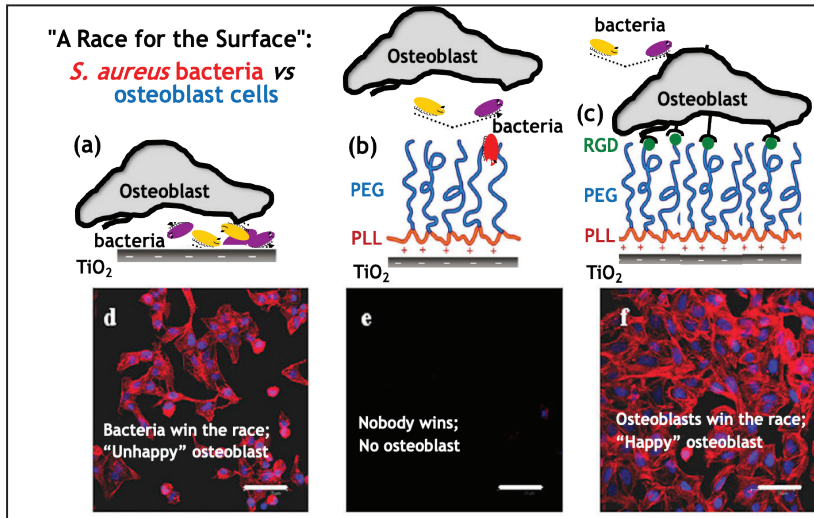
2.2 Lapisan polimer dual-fungsi untuk mendukung integrasi sel jaringan tubuh dan diagnostik

Melanjutkan pemahaman yang lebih komprehensif, pendekatan eksperimental dilakukan untuk mengeksplorasi konsep “perlombaan menuju permukaan” (*race for the surface*) antara bakteri dan sel tubuh. Kombinasi biopasif-bioaktif yang dikembangkan lebih lanjut adalah integrasi lapisan polimer sikat berbasis PEG dengan molekul bioaktif tripeptida RGD, yang secara spesifik menarik perlekatan sel-sel mamalia (**Gambar 3.7**). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada permukaan PLL-g-PEG, perlekatan bakteri *Staphylococcus epidermidis* dapat diminimalkan secara signifikan dibandingkan dengan permukaan titanium oksida tanpa modifikasi. Namun, meskipun

lapisan ini efektif dalam mencegah pembentukan biofilm, permukaan tersebut tidak sepenuhnya mendukung perlekatan dan pertumbuhan sel tubuh (Subbiahdoss et al., 2010). Untuk mengatasi tantangan ini, dikembangkan lapisan dual-fungsi biopasif dan bioaktif berbasis PLL-g-PEG yang dimodifikasi dengan peptida aktif RGD. Modifikasi ini memungkinkan perlekatan spesifik antara reseptor integrin pada sel tubuh dengan peptida RGD, sementara keberadaan lapisan PEG secara efektif menolak bakteri dari permukaan biomaterial. Dengan kombinasi ini, pertumbuhan *osteoblast* didukung secara optimal tanpa terganggu oleh kolonisasi bakteri. Dalam kondisi aliran rendah, biofilm bakteri yang terbentuk dapat dengan mudah dilepaskan dari permukaan PLL-g-PEG/PEG-RGD tanpa mengganggu sel-sel tubuh yang telah beradaptasi. Hal ini merupakan dua tantangan utama pada setiap permukaan biomaterial yang bersentuhan langsung dengan sistem biologis: *attract the “good guys”*, *repel the “bad guys”*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan dual-fungsi ini mampu menciptakan keseimbangan yang ideal antara resistensi terhadap biofilm dan dukungan terhadap integrasi jaringan. Temuan ini memperkuat pendekatan inovatif dalam desain permukaan biomaterial di sektor kesehatan, yang mencegah infeksi dan mendukung regenerasi jaringan secara simultan.

Kombinasi biopasif-bioaktif lainnya yang dieksplorasi adalah pengembangan lapisan PLL-g-PMOXA yang dimodifikasi dengan asam folat (PLL-g-PMOXA-c-FA) untuk aplikasi diagnostik, terutama dalam menargetkan sel-sel kanker dengan ekspresi reseptor folat (FR) yang tinggi. Penelitian ini menunjukkan bahwa permukaan substrat yang dilapisi PLL-g-PMOXA-c-FA mampu menarik sel kanker FR-positif, seperti HeLa dan JEG-3 dengan spesifisitas yang tinggi, namun tetap menghalangi adhesi sel FR-negatif, seperti MCF-7 dan HepG2.

Penemuan ini menegaskan interaksi spesifik antara asam folat dan reseptor folat yang diekspresikan pada membran sel kanker (Chen et al., 2015).



Sumber: Subbiahdoss et al., (2010).

Gambar 3.7 Ilustrasi "a race for the surface" antara bakteri dan sel tubuh, pada permukaan biomaterial TiO_2 (a) tanpa modifikasi, (b) termodifikasi lapisan tipis PLL-g-PEG yang bersifat biopasif, dan (c) termodifikasi lapisan tipis PLL-g-PEG-RGD yang bersifat biopasif terhadap bakteri namun bioaktif (*attracting*) terhadap sel tubuh. (d-f) Citra dari mikroskop konfokal yang menunjukkan bahwa sel tubuh melekat dan tumbuh paling baik pada permukaan termodifikasi PLL-g-PEG-RGD.

Studi lebih lanjut juga mengungkap bahwa rasio fungsi asam folat pada polimer sangat mempengaruhi efisiensi adhesi sel kanker yang ditargetkan. Sebagai bukti konsep, lapisan PLL-g-PMOXA-c-FA juga digunakan untuk memisahkan

sel-sel kanker FR-positif dari campuran dengan sel kanker FR-negatif. Dalam eksperimen ini, tingkat sensitivitas hingga ~95% dan spesifisitas ~24% berhasil dicapai, menunjukkan potensi besar aplikasi material ini dalam diagnostik dan pemisahan sel tumor sirkulasi. Strategi ini menunjukkan bahwa *platform* polimer yang dirancang dengan cermat dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan permukaan bioaktif dengan kemampuan diagnostik yang spesifik. Hal ini sejalan dengan agenda nasional deteksi kanker dan skrining.

Berbeda dengan konformasi sikat yang sebelumnya, konformasi jaring dieksplorasi menggunakan *poly(N,N-dimethylacrylamide)* (PDMAA) yang dimodifikasi dengan *benzophenone*. Melalui proses penyinaran UV, molekul *benzophenone* memfasilitasi pembentukan jaringan hidrogel biopasif yang terikat secara kovalen pada substrat, sekaligus memungkinkan penambahan molekul bioaktif, seperti laminin, pada area tertentu. Dengan demikian, permukaan biomaterial yang dihasilkan mampu menggabungkan fungsi biopasif pada *platform* polimer dan fungsi bioaktif pada lokasi-lokasi tertentu, memberikan kemampuan spesifik untuk mencegah *biofouling* sambil mendukung perlekatan dan proliferasi sel. Strategi ini menunjukkan bahwa hidrogel PDMAA dapat menciptakan lingkungan mikro yang sesuai untuk sel, di mana adhesi spesifik dimediasi oleh interaksi ligan reseptor antara laminin dan integrin sel. Dengan pengaturan densitas *benzophenone* yang tepat, stabilitas molekul bioaktif dan efisiensi perlekatan sel dapat dioptimasi (Pidhatika, et al., 2019). Hasil studi menunjukkan bahwa permukaan dual-fungsi ini mengurangi risiko infeksi akibat *biofouling*, serta berpotensi memperbaiki integrasi implan dengan jaringan karena mampu menarik sel-sel jaringan. Pendekatan ini menghadirkan inovasi yang mudah

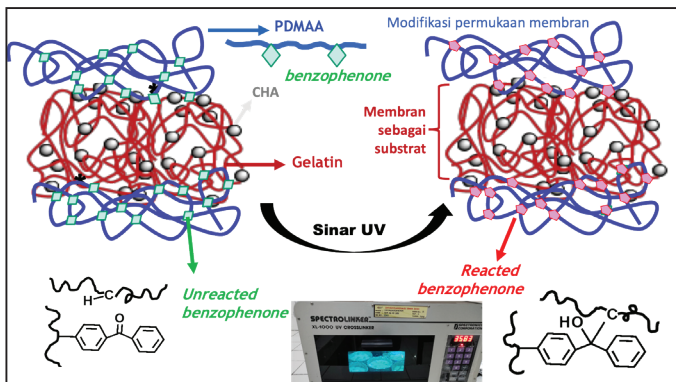
diadaptasi untuk berbagai aplikasi, mulai dari rekayasa jaringan hingga diagnostik, yang sangat penting dalam sektor kesehatan.

3. Lapisan polimer responsif untuk mendukung adaptasi dinamis terhadap lingkungan fisiologis

Pengembangan dilakukan untuk menghasilkan permukaan biomaterial yang memiliki tingkat kecerdasan lebih tinggi, yaitu responsif terhadap rangsangan lingkungan. Pendekatan ini memungkinkan biomaterial untuk berinteraksi secara pasif atau aktif dengan entitas biologis, dan secara dinamis beradaptasi terhadap perubahan kondisi, seperti suhu, pH, atau cahaya. Lapisan tipis berbasis *poly(2-isopropyl-2-oxazoline)* yang memiliki kemampuan unik untuk merespons perubahan suhu berhasil dikembangkan (Ye & Pidhatika, 2010). Lapisan ini terdehidrasi atau “menyusut” pada suhu di atas 40°C, namun terhidrasi atau “mengembang” pada suhu di bawah 40°C. Perubahan ini mempengaruhi struktur polimer di permukaan biomaterial. Saat suhu tinggi, polimer berkonformasi sikat akan “menyusut,” yang memungkinkan entitas biologis tertentu, seperti protein atau sel, menempel pada permukaan. Sebaliknya, saat suhu turun, lapisan ini kembali “mengembang” dan melepaskan entitas yang sebelumnya menempel. Sifat ini menjadikan permukaan biomaterial responsif sebagai alat yang sangat potensial untuk aplikasi medis, seperti sistem penghantaran obat atau perangkat diagnostik yang memerlukan kontrol terhadap interaksi biologis. Lapisan tersebut dapat dikembangkan lebih lanjut menjadi sistem yang otonom dengan menambahkan gugus-gugus fungsi yang responsif terhadap stimuli lain (Hoogenboom & Schlaad, 2017).

C. Lapisan tipis berbasis polimer untuk mengontrol sifat-sifat fisikokimia perancah biomedis

Polimer fotoreaktif *poly(N,N-dimethylacrylamide)* (PDMAA) dengan penambahan gugus *benzophenone* diaplikasikan untuk menghasilkan lapisan tipis hidrogel yang terikat secara kovalen pada perancah karbonat hidroksiapatit/gelatin (CHA/gelatin). Dengan paparan sinar UV, gugus *benzophenone* memediasi reaksi ikat silang dan imobilisasi hidrogel pada permukaan perancah biomedis organik, menghasilkan lapisan hidrogel dengan stabilitas dan fleksibilitas tinggi (**Gambar 3.8**) (Ardhani et al., 2022).

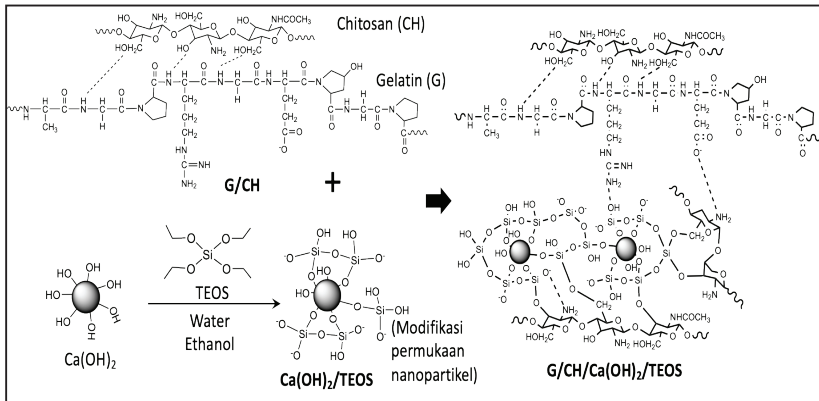


Sumber: Ardhani et al., (2022).

Gambar 3.8 Membran berbasis gelatin dan CHA termodifikasi hidrogel PDMAA pada permukaannya.

Hidrogel ini meningkatkan ketahanan perancah terhadap degradasi, serta memungkinkan kontrol atas pelepasan ion kalsium dari CHA, komponen kunci untuk stimulasi pertumbuhan tulang. Hidrogel ini juga memiliki kapasitas hidrasi tinggi untuk menciptakan lingkungan biologis yang mendukung

perlekatan dan proliferasi sel. Selain itu, integrasi CHA sebagai komponen aktif pada perancah memperkuat interaksi spesifik antara material implan dan sel osteogenik, menunjukkan potensi besar untuk aplikasi regenerasi tulang, seperti perawatan periodontitis. Teknologi ini meningkatkan sifat mekanik perancah dan mengoptimalkan fungsi bioaktifnya. Pendekatan ini menunjukkan bahwa inovasi dalam desain hidrogel dapat mengintegrasikan sifat biopasif dan bioaktif, membuka peluang dalam pengembangan perancah biomedis cerdas untuk aplikasi klinis regenerasi jaringan (Ardhani et al., 2022).



Sumber: Abdulrahman et al. (2025); Mahmudi et al., (2022, 2024).

Gambar 3.9 Membran berbasis gelatin, kitosan, dan nanopartikel Ca(OH)_2 termodifikasi molekul *tetraethyl orthosilicate* (TEOS) di permukaannya.

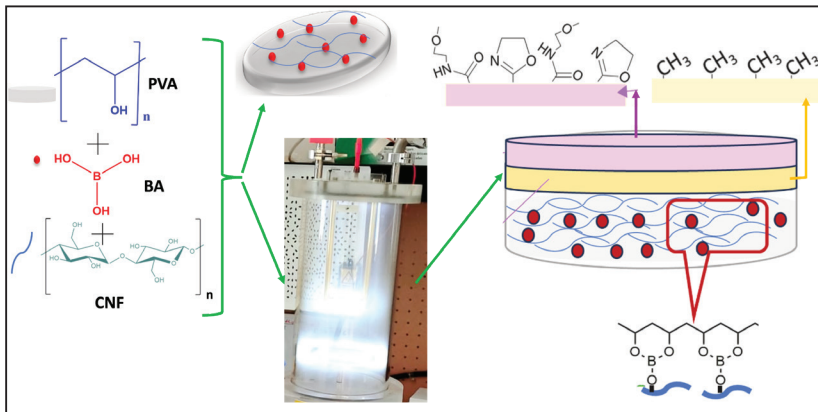
Modifikasi permukaan nanopartikel juga merupakan teknologi yang penting dalam meningkatkan sifat-sifat perancah biomedis. Sebagai contoh, perancah berbasis komposit antara matriks polimer gelatin/kitosan dan nanopartikel Ca(OH)_2

telah dikembangkan (**Gambar 3.9**) (Abdulrahman et al., 2025; Mahmudi et al., 2022, 2024). Hasil penelitian menunjukkan bahwa modifikasi permukaan nanopartikel dengan molekul silan tetraethyl orthosilicate (TEOS) meningkatkan sifat mekanis dan ketahanan degradasi komposit yang terbentuk. Peningkatan tersebut dikarenakan silan yang menjembatani ikatan antara polimer organik sebagai matriks dan nanopartikel inorganik sebagai bahan pengisi membran (Mahmudi et al., 2022, 2024). Ketahanan degradasi membran tersebut penting dalam mendukung proses pelepasan terkendali (sustained release) mineral ataupun antibiotik dari membran untuk regenerasi jaringan.

D. Lapisan tipis plasma sebagai teknologi presisi dan berkelanjutan untuk pengembangan biomaterial

Studi pustaka dilakukan terhadap teknologi plasma sebagai teknologi mutakhir untuk meningkatkan fungsi perancah biomedis (Pidhatika et al., 2025). Teknologi plasma telah dikenal sebagai metode yang efektif untuk memodifikasi permukaan biomaterial, seperti meningkatkan sifat hidrofilik, mendukung perlekatan sel, dan memperbaiki osseointegrasi. Penggunaan beragam prekursor plasma untuk menghasilkan lapisan tipis pada permukaan perancah dilakukan untuk memenuhi berbagai kebutuhan, mulai dari fungsi biopasif hingga bioaktif. Salah satunya adalah pengembangan membran komposit berbahan *poly(vinyl alcohol)* (PVA) dan *cellulose nano fiber* (CNF) dari limbah kulit bawang, yang permukaannya difungsionalisasi menggunakan lapisan tipis plasma berurutan dari prekursor *1,7-octadiene* (OD) dan *2-methyl-2-oxazoline* (MOXA). Lapisan plasma OD berfungsi membentuk permukaan hidrofobik untuk mengontrol laju pelepasan *boric acid* (BA) sebagai agen antibakteri, sementara

lapisan plasma MOXA menghasilkan permukaan hidrofilik dan biopasif yang mendukung kompatibilitas biologis. Modifikasi plasma ini menghasilkan profil pelepasan BA yang terkontrol untuk menghambat pertumbuhan *Staphylococcus aureus* dan *Pseudomonas aeruginosa*. Skema pembuatan membran PVA/CNF/BA 2025) dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Sumber: Thulaseedharakurup et al. (2025)

Gambar 3.10 Skema pembuatan membran PVA/CNF/BA sebagai membran antibakteri dan modifikasi permukaannya dengan plasma OD-MOXA.

Modifikasi permukaan juga diterapkan pada substrat berbasis bioplastik yang kerap bersentuhan dengan fluida biologis dan rekayasa permukaannya penting untuk pengembangan material bioaktif. Melalui teknologi plasma, permukaan substrat difungsionalisasi untuk meningkatkan afinitas terhadap zat warna alami (Pidhatika et al., 2024; Syibyan et al., 2024) dan untuk imobilisasi nanopartikel perak (AgNP) yang memberikan aktivitas antibakteri (Ninan et al., 2024). Rekayasa permukaan

ini menggunakan plasma berbasis udara dan *oxazoline*, menghasilkan permukaan hidrofilik dengan gugus fungsi polar yang meningkatkan adhesi molekul bioaktif yang dapat menonaktifkan bakteri (**Gambar 3.11**). Strategi ini menunjukkan bahwa substrat berbasis material terbarukan seperti bioplastik, melalui modifikasi plasma, dapat diarahkan untuk aplikasi medis seperti pembungkus luka, sistem penghantaran, atau diagnostik sekali pakai, sehingga memperluas cakupan biomaterial ke arah yang lebih berkelanjutan dan multifungsi.

Sumber: Ninan et al. (2024)

IV. PELUANG PEMANFAATAN TEKNOLOGI MODIFIKASI PERMUKAAN BIOMATERIAL PADA SEKTOR KESEHATAN DI INDONESIA

Dalam konteks pembangunan kesehatan nasional, pemerintah Indonesia telah menetapkan sejumlah kebijakan strategis yang mendorong kemandirian alat kesehatan. Kebijakan-kebijakan tersebut berorientasi pada pengurangan ketergantungan impor dan penguatan ekosistem riset dan industri lokal agar mampu menjawab tantangan masalah kesehatan masyarakat, seperti tingginya prevalensi penyakit gigi dan mulut. Di sisi lain, hasil-hasil penelitian dalam teknologi modifikasi permukaan biomaterial menawarkan solusi inovatif berupa material medis yang lebih aman, efektif, dan dapat dipersonalisasi.

A. Kebijakan nasional pada sektor kesehatan

Kebijakan Peningkatan Penggunaan Produk Dalam Negeri (P3DN) yang tertuang dalam Inpres No. 2 Tahun 2022 mendorong minimal 40% penggunaan produk lokal dalam pengadaan barang dan jasa pemerintah. Dalam konteks ini, pembekuan impor alat kesehatan yang tertuang dalam Keputusan Menkes No. HK.01.07/MENKES/1258/2022 juga memberikan ruang yang luas bagi produk biomaterial nasional untuk menggantikan produk impor, asalkan telah memiliki izin edar dan kapasitas produksi yang memadai.

Dalam konteks penyakit infeksi, penyakit gigi dan mulut merupakan salah satu masalah kesehatan masyarakat utama di Indonesia. Hasil survei Riset Kesehatan Dasar (RISKESDAS) 2018 menunjukkan bahwa prevalensi periodontitis mencapai

74% dari populasi. Maka, pengembangan membran regenerasi merupakan topik nomor 3 dalam struktur rincian kerja (*Work Breakdown Structure*) pada topik besar Implan Gigi yang termasuk dalam Prioritas Riset Nasional (PRN) 2020–2024. Dalam konteks ini, riset pengembangan permukaan biomaterial, khususnya pada membran regeneratif, memiliki peran penting dalam mendukung program nasional pengendalian penyakit gigi dan mulut.

B. Menuju kemandirian teknologi perangkat medis

Penelitian yang dilakukan selama dua dekade ini secara konsisten berfokus pada pengembangan permukaan biomaterial yang mendukung respons biologis yang diinginkan, tanpa memicu reaksi inflamasi yang merugikan. Hasil-hasil studi menunjukkan bahwa lapisan polimer dapat didesain sesuai kebutuhan pasien, untuk mendukung penyembuhan jaringan secara selektif dan mengurangi efek samping sistemik (Ardhani et al., 2022; Thulaseedharakurup et al., 2025). Kemampuan ini menunjukkan potensi besar dalam personalisasi terapi berbasis biomaterial.

Salah satu purwarupa yang telah dihasilkan berpotensi mendukung program pemerintah dalam menangani penyakit infeksi periodontitis yang membutuhkan membran regeneratif. Purwarupa tersebut berupa membran berbasis gelatin dan *carbonated hydroxyapatite* (CHA), yang dimodifikasi dengan lapisan tipis hidrogel berbasis *poly(N,N-dimethylacrylamide)* dengan densitas ikat silang yang terkontrol seperti diilustrasikan pada **Gambar 3.8** (Ardhani et al., 2022). Lapisan PDMAA pada permukaan membran memungkinkan kontrol terhadap performa membran, termasuk sifat biopasif, pelepasan mineral, serta waktu degradasinya, sehingga memungkinkan personalisasi terapi pada pasien periodontitis. Hal ini merupakan kelebihan

dibandingkan dengan produk-produk komersial lainnya. Tabel 4.1 menampilkan perbandingan antara membran yang dikembangkan dengan prinsip-prinsip modifikasi permukaan untuk meningkatkan performanya, dengan beberapa produk serupa yang komersial.

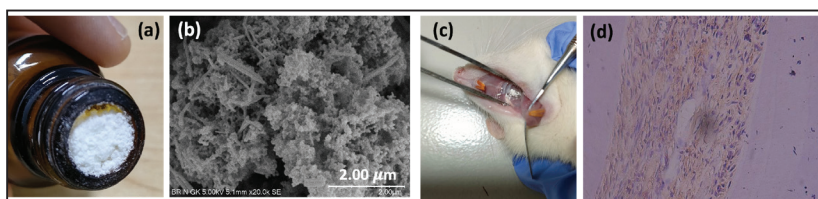
Tabel 4.1 Potensi biomaterial membran berbasis gelatin/CHA-PDMAA (pada kolom hijau) dibandingkan dengan produk-produk komersial lainnya.

					
	Gel/CHA – PDMAA (Indonesia)	Membran Perikardium Iradiasi (PT Focustindo Cemerlang Sumardi, Indonesia)	Bio-Gide® (Geistlich Pharma, Wolhusen, Switzerland)	BioMesh-S™ (Samyang corp., Korea)	Gore-tex® (W.L. Gore & Associates, Flagstaff, AZ, USA)
Asal teknologi	Hasil riset lokal	Hasil riset lokal	Impor	Impor	Impor
Bio-degradable	Ya	Ya	Ya	Ya	Tidak
Material dasar	Gelatin dari tulang sapi (halal)	Kolagen dari tulang sapi (halal)	Type 1 collagen from porcine source (non-halal)	Polyglycolide, poly (d,l-lactide-co glycolide), poly (L-lactide) copolymer	Expanded-polytetrafluoroe thylene
Mengandung amorphous carbonated hydroxyapatite (CHA)	Ya (lebih baik untuk pertumbuhan tulang)	Tidak (mengandung hydroxyapatite (HA), yang lebih kristalin)	Tidak	Tidak	Tidak

Sumber: mengumpulkan informasi dari produk komersial.

Purwarupa lainnya adalah material komposit yang mengandung mineral inorganik Ca(OH)₂ yang berikatan dengan rantai-rantai polimer organik alami (gelatin dan kitosan) melalui pengikat silang *tetraethyl orthosilicate* (TEOS) pada permukaan nanopartikel Ca(OH)₂ (Gambar 3.9), untuk aplikasi perawatan

akar gigi. Dengan mengatur densitas ikat silang antara mineral inorganik dan polimer organik melalui pengaturan konsentrasi TEOS, pelepasan mineral Ca dapat dikontrol. Purwarupa tersebut telah diuji secara in vivo pada tikus Wistar (*Rattus norvegicus*) (Abdulrahman, et al., 2025; Handajani et al., 2024). Hasil pengujian in vivo menunjukkan ekspresi nestin positif yang kuat sebagai penanda tumbuhnya sel-sel jaringan pada pulpa gigi di bawah rongga setelah perlakuan dengan komposit. Hal ini mengindikasikan potensi komposit tersebut sebagai material perawatan akar gigi (Gambar 4.1) (Handajani et al., 2024).



Sumber: Handajani et al., (2024)

Gambar 4.1 Tahapan aplikasi dan evaluasi biomaterial komposit berbasis gelatin/kitosan/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /TEOS sebagai kandidat material regeneratif pulpa gigi: **(a)** penampakan fisik purwarupa komposit dalam bentuk serbuk putih; **(b)** citra morfologi permukaan komposit menggunakan SEM; **(c)** aplikasi langsung biomaterial ke dalam saluran akar gigi tikus Wistar sebagai model in vivo; dan **(d)** hasil imunohistokimia yang menunjukkan ekspresi protein nestin yang lebih kuat dibandingkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tanpa matriks polimer.

Dengan mendorong kolaborasi antara akademisi, industri, dan pemerintah, hasil-hasil penelitian yang telah dipaparkan diharapkan dapat mendukung kemandirian teknologi biomaterial dan alat kesehatan, dan memperkuat daya saing industri alat kesehatan Indonesia.

V. KESIMPULAN

Dari perjalanan riset selama lebih dari dua dekade, satu hal yang jelas terlihat adalah bahwa keberhasilan suatu biomaterial, seperti implan, bahan penyembuh luka, atau perancah jaringan, sangat bergantung pada sifat permukaannya. Permukaan biomaterial merupakan bagian pertama dan paling penting dalam berinteraksi dengan fluida dan jaringan tubuh manusia. Hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa permukaan dapat dirancang dan dimodifikasi menjadi “pengatur lalu lintas” biologis: memilih sel mana yang dapat melekat, protein mana yang perlu dihindari, atau bahkan menonaktifkan bakteri, tanpa merusak jaringan tubuh. Permukaan dapat dibuat menjadi cerdas, selektif, dan stabil, dengan berbagai teknologi yang dikembangkan. Beberapa contoh pencapaian dari teknologi modifikasi permukaan biomaterial yang telah dikembangkan dipaparkan di bawah ini.

Salah satu tonggak utama dalam pengembangan teknologi modifikasi permukaan biomaterial adalah penggunaan *poly(2-methyl-2-oxazoline)* (PMOXA) sebagai lapisan tipis (2–20 nm) biopasif yang menunjukkan perlekatan (adsorpsi) yang sangat rendah ($<1 \text{ ng/cm}^2$) terhadap protein dari serum manusia (Konradi et al., 2008; Pidhatika et al., 2008). Tak hanya terhadap protein, permukaan PMOXA juga efektif dalam menolak perlekatan bakteri: adhesi *Staphylococcus aureus* berkurang lebih dari 99%, dibandingkan pada permukaan tanpa lapisan PMOXA. Hal ini membuktikan bahwa PMOXA merupakan kandidat unggul untuk aplikasi medis yang bebas kontaminasi biologis (Pidhatika et al., 2008). Modifikasi permukaan PMOXA dengan *quaternary ammonium salt* (QAS) menghasilkan permukaan

bioaktif antibakteri dengan eliminasi bakteri *Escherichia coli* lebih dari 99% (Pidhatika & Rakhmatullina, 2014).

Permukaan termodifikasi PMOXA menunjukkan kestabilan tinggi (Chen et al., 2014; Pidhatika et al., 2012). Setelah lebih dari 14 hari inkubasi dalam larutan fisiologis dan larutan oksidatif, lapisan polimer lain seperti *poly(ethylene glycol)* (PEG) kehilangan sekitar 40% ketebalannya dan menunjukkan peningkatan perlekatan protein hingga $\sim 150 \text{ ng/cm}^2$, sedangkan PMOXA hanya mengalami penurunan 10% dengan perlekatan protein tetap rendah ($\sim 5 \text{ ng/cm}^2$) (Chen et al., 2014).

Lapisan hidrogel dual-fungsi berpola (*patterned*) dengan ketebalan sekitar 300-800 nm berhasil disintesis dari *poly(N,N-dimethylacrylamide)* (PDMAA) dan laminin melalui teknik fotoreaksi gugus *benzophenone*. Pada lapisan tersebut, pola perlekatan sel berhasil diwujudkan: sel mammalia hanya menempel pada lokasi permukaan yang dimodifikasi dengan laminin, sementara lokasi dengan PDMAA saja tetap bebas perlekatan sel. Hal ini membuktikan kemampuan pengendalian spasial perlekatan sel yang tinggi, yang merupakan fitur krusial dalam desain *tissue interface* dan *organ-on-chips* (Pidhatika, 2019; Pidhatika, Zhao, & R  he, 2019).

Pada pengembangan perancah berbahan *carbonated hydroxyapatite* (CHA) dan gelatin, lapisan hidrogel berbasis polimer fotoreaktif PDMAA terfungsionalisasi *benzophenone* dapat mengontrol kekuatan mekanik perancah: Kekuatan tarik perancah dengan lapisan hidrogel meningkat hingga $\sim 183\%$ dibandingkan perancah tanpa lapisan hidrogel. Stabilitas terhadap degradasi dalam larutan fisiologis juga meningkat signifikan: waktu degradasi total bertambah dari 7 hari (tanpa modifikasi) menjadi >21 hari. Hal ini membuktikan bahwa modifikasi permukaan dapat mengontrol sifat-sifat mekanik

dan stabilitas perancah menyesuaikan kebutuhan jaringan target (Ardhani et al., 2022).

Modifikasi permukaan berbasis teknologi plasma pada substrat bioplastik telah terbukti meningkatkan sifat-sifat permukaan dan kinerja fungsi lanjutannya secara signifikan. Deposisi plasma dengan prekursor (*2-methyl-2-oxazoline*) (MOXA) menghasilkan lapisan tipis sekitar 20 nm dan gugus fungsi reaktif pada permukaan. Lapisan ini menurunkan nilai sudut kontak air dari $\sim 95^\circ$ menjadi $\sim 35^\circ$, mengindikasikan peningkatan hidrofilisitas yang signifikan. Sifat ini memungkinkan integrasi nanopartikel perak (AgNP) yang meningkatkan aktivitas antimikroba secara signifikan. Modifikasi plasma ini juga meningkatkan kekuatan tarik dan elongasi sebelum putus hingga masing-masing $\sim 40\%$ dan $\sim 130\%$. Dari sisi fungsionalitas biologis, viabilitas *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus* menurun drastis menjadi hanya 10-24% setelah 24 jam kontak dengan permukaan substrat termodifikasi lapisan plasma *oxazoline*-AgNP, dibandingkan kontrol. Namun, viabilitas sel mamalia NIH3T3 tetap tinggi, yaitu $>80\%$. Temuan ini menunjukkan selektivitas biologis yang tinggi, di mana permukaan mampu memberikan efek antibakteri tanpa menimbulkan efek sitotoksik terhadap sel eukariotik (Ninan et al., 2024).

Dengan demikian, modifikasi permukaan biomaterial dapat dilihat sebagai fondasi penting dalam membangun generasi baru material kesehatan: material yang tidak hanya kompatibel dengan tubuh, tetapi juga stabil, dapat bekerja secara cerdas dan selektif, untuk mendukung fungsi dan proses penyembuhan. Hal ini menjadi salah satu kunci untuk mewujudkan sistem kesehatan nasional yang mandiri, efektif, dan berdaya saing global.

VI. PENUTUP

Di tengah tantangan dunia kesehatan, kebutuhan akan biomaterial yang lebih cerdas, lebih aman, dan adaptif dengan tubuh juga semakin meningkat. Permukaan biomaterial kini bukan lagi bagian pasif dari sebuah alat medis (Pidhatika et al., 2010; Pidhatika, Zhao, & R  he, 2019), tetapi dipandang sebagai komponen aktif dan responsif yang berperan penting dalam keberhasilan interaksi antara alat medis dan tubuh (Chen et al., 2015; Pidhatika, Zhao, & R  he, 2019; Pidhatika & Macgregor, 2023). Fokus pengembangan ke depan bukan hanya menciptakan material baru, tetapi juga permukaan yang dapat merespons dan berkomunikasi dengan lingkungan biologis secara molekuler. Hal ini menuntut pendekatan yang lintas disiplin, tidak hanya dari ilmu material dan teknik, tetapi juga dari biologi, kedokteran, hingga teknologi digital dan sensorik (Ardhani, Diana, & Pidhatika, 2022; Pidhatika et al., 2025; Pidhatika et al., 2022).. Teknologi modifikasi permukaan biomaterial harus diarahkan untuk menjawab isu-isu global seperti resistensi antimikroba, regenerasi jaringan yang lebih cepat dan personal, efisiensi alat medis di era digital, serta pendekatan ramah lingkungan dan penggunaan sumber daya hayati yang terbarukan, termasuk bioplastik (Ninan et al., 2024; Pidhatika et al., 2024; Syibyan et al., 2024), dan material berbasis selulosa lainnya (Eskani et al., 2023, 2024).

Dalam konteks nasional, tantangan utama adalah membangun rantai inovasi yang utuh dari laboratorium hingga industri dan pelayanan kesehatan. Hal ini menuntut peran aktif para pemangku kepentingan: pemerintah sebagai pembuat kebijakan dan regulator, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

sebagai penghasil pengetahuan, industri sebagai mitra hilirisasi, perguruan tinggi sebagai pusat pengembangan ilmu, pendidikan vokasi sebagai pelaksana pelatihan terapan, dan masyarakat sebagai pengguna akhir. Keberhasilan jangka panjang juga sangat bergantung pada penyiapan SDM unggul yang memahami tantangan multidisiplin dan mampu menjembatani ilmu dan aplikasi.

Selain itu, transfer pengetahuan dan teknologi merupakan aspek krusial dalam memastikan keberlanjutan inovasi di bidang kesehatan. Selama lebih dari dua dekade, secara konsisten dilibatkan tim riset yang terdiri dari peneliti junior, mahasiswa sarjana, magister, hingga doktor, sebagai bagian dari komitmen untuk mencetak generasi ilmuwan masa depan yang unggul dan berdaya saing global. Proses ini menghasilkan luaran ilmiah dan teknologi, serta menjadi wahana pembelajaran langsung dan mentoring intensif bagi generasi muda Indonesia.

Aktivitas riset tidak dilakukan secara eksklusif di satu institusi, melainkan dalam jejaring lintas institusi, baik di dalam negeri maupun luar negeri. Kolaborasi riset internasional telah dijalin dengan berbagai grup riset terkemuka di Eropa (Pidhatika, Zhao, & R  he, 2019; Pidhatika et al., 2019), Amerika Serikat (Pidhatika et al., 2022; Pidhatika & Nalam, 2019), Australia (Ninan et al., 2024; Pidhatika et al., 2024), dan Asia (Thulaseedharakurup et al., 2025). Dalam kolaborasi tersebut, peneliti muda Indonesia turut terlibat aktif dalam kegiatan *joint research*, publikasi internasional, pelatihan laboratorium lanjutan, dan pertukaran ilmiah. Beberapa mahasiswa bimbingan telah berhasil melanjutkan studi dengan beasiswa kompetitif atau menjadi bagian dari proyek riset internasional. Dalam skala nasional, pelibatan mahasiswa dari berbagai universitas mitra di proyek riset berbasis program pendanaan kompetitif

seperti Riset dan Inovasi untuk Indonesia Maju (RIIM), telah memperluas jangkauan dampak dari proses alih teknologi dan transfer kompetensi. Melalui pendekatan tersebut, riset diharapkan menghasilkan inovasi dalam bidang biomaterial dan menciptakan ekosistem pengembangan talenta riset yang berkelanjutan, selaras dengan misi nasional dalam peningkatan kapasitas SDM iptek dan kemandirian teknologi dalam sektor kesehatan.

Hasil-hasil riset yang telah dilakukan memberikan pijakan yang kuat untuk pengembangan kebijakan dan regulasi yang mendukung industri alat kesehatan domestik. Standardisasi proses produksi biomaterial, peningkatan persyaratan biokompatibilitas, serta insentif untuk adopsi teknologi lokal merupakan beberapa rekomendasi strategis yang perlu dirumuskan bersama. Regulasi yang berpihak pada inovasi lokal akan memperkuat daya saing industri dalam negeri di pasar global dan mendukung pemenuhan kebutuhan domestik. Termasuk di dalamnya, insentif fiskal, percepatan sertifikasi biomaterial, dan akses pembiayaan untuk produksi yang berbasis *Good Manufacturing Practices* (GMP), harus dipertimbangkan. Sebagai contoh konkret, Pusat Kolaborasi Riset (PKR) Perancah Biomedis antara Universitas Gadjah Mada dan BRIN telah dirintis sebagai nexus antara sains dasar dan pengembangan produk medis siap-pakai. PKR ini berfokus pada perancah regeneratif yang kompatibel dengan jaringan tubuh manusia, serta menjadi model ekosistem inovasi biomaterial yang mendukung kebijakan nasional seperti Rencana Induk Riset Nasional (RIRN) dan Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN).

Dengan semangat kolaboratif, riset yang berorientasi pada kebutuhan nyata masyarakat, serta pengembangan talenta-talenta

muda di bidang sains dan teknologi, Indonesia pasti mampu menjawab tantangan ini: Tidak hanya untuk Indonesia yang sehat dan mandiri, tetapi juga untuk kontribusi nyata Indonesia di panggung ilmu pengetahuan dan teknologi dunia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Presiden Republik Indonesia Bapak Prabowo Subianto dan Presiden Republik Indonesia ke-7 Bapak Joko Widodo atas penetapan Peneliti Utama saya; Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional Dr. Laksana Tri Handoko; Wakil Kepala BRIN periode 2023-2025 Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian, S.T., M.Sc., DESD., IPU., ASEAN.Eng., Deputy Bidang Sumber Daya Manusia Iptek Prof. Edy Giri Rachman Putra, Ph.D. Ketua Majelis Pengukuhan Profesor Riset Prof. Ir. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, MSCE., Ph.D., serta Sekretaris Majelis Pengukuhan Profesor Riset Prof. Dr. Ir. Zainal Arifin, M.Sc.; Tim Penelaah Naskah Orasi Ilmiah Prof. Dr. Andri Hardiansyah, Prof. Dr. Yenny Meliana, Prof. Dr. Rike Yudianti, dan Prof. Dr. Ika Dewi Ana, serta Ketua Majelis Profesor Riset Organisasi Riset Nanoteknologi dan Material (ORNM) Prof. Dr. Nurul Taufiqu Rochman, M.Eng., dan Sekretaris Majelis Profesor Riset ORNM Prof. Dr.-Ing. Andika Widya Pramono, M.Sc.; Sekretaris Utama BRIN Nur Tri Aries Suestiningtyas, S.IP., M.A.; Kepala Organisasi Riset Nanoteknologi dan Material Prof. Dr. Ratno Nuryadi; Kepala Biro Organisasi dan Sumber Daya Manusia Ratih Retno Wulandari, S.Sos., M.Si.; Kepala Pusat Riset Teknologi Polimer Dr. Joddy Arya Laksmo beserta rekan-rekan di Kelompok Riset Polimer Fungsional; Deputy Sumber Daya Manusia Iptek Prof. Dr. Edy Giri Rachman Putra; serta Direktur Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia Dr. Zainal Arief.

Terima kasih juga kepada para pembimbing S1 hingga S3: Prof. Dr. Wahyudi Budi Sediawan (alm.), Prof. Dr. Krister Holmberg, Prof. Dr. Marcus Textor, Prof. Dr. Nicholas Spencer,

dan Dr. Rupert Konradi; para mentor pascadoktoral dan kolaborator: Prof. Dr. Jürgen Rühle, Prof. Dr. Krasimir Vasilev, dan Prof. Dr. Prathima Nalam.

Penghargaan setulusnya saya sampaikan kepada keluarga tercinta, suami Indra Perdana; anak-anak Leo, Sandra, dan Santika; Papi Yoanes Chrisostomus; Mami Lucia; mertua Mama Elisabeth dan Papa T. C. Hirnawan (alm.); kakak beserta keluarga: Mas Arantes Yossyrindra, Mbak Heti, dan Rosa; saudara kembar beserta keluarga: Bidhari Andana (Nana), Mas Bambang, dan Mita; serta ipar dan keponakan: Rm Ari, Ria, Itok, Sofi, Franz, Ansri, dan Mire.

Saya juga berterima kasih kepada Panitia Pelaksana Pengukuhan dan seluruh pihak terkait Mbak Uchi, Mbak Yuli, Mbak Sabrina; sahabat-sahabat masa kecil hingga kuliah; rekan kerja di Politeknik ATK, Politeknik STMI, dan BBKKP Kementerian Perindustrian; para guru sejak TK, SD, SMP, hingga SMA, terutama Pak Gunawan Susilowarno yang mengenalkan saya pada dunia riset; para kolaborator dan anggota tim riset Prof. Dr. Ika Dewi Ana, Dr. Retno Ardhani, Prof. Dr. Juni Handajani, Prof. Dr. Dwi Siswanta, Prof. Dr. Nuryono, Yogi, Reza, Faiza, Amel, Neethu Ninan, Poornima Vijayan, Pak Prapto, Hari Suprihatin, Anjar, Wiwien, Bayu, Wisnu Arfian, dan lain-lain; sahabat-sahabat yang selalu hadir dalam hidup saya yang dinamis Risti (Melink/Linky), Yeni (Ayen), Yanny (Laler), dan Mas Bismoko (Mas Ko); serta para dosen (tim kesebelasan) dan staf di Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia yang kompak dan selalu siap saling membantu, Pak Sutanto, Pak Imam Kambali, Prof. Anhar Antariksawan, Bu Maria Christina Prihatiningsih, Mas Rio, Mbak Dewi, Mbak Fifi, Pak Deni, Mbak Dhita, Pak Sukarman, Oksi, Taufik, Pak Diandono, Pak Bangun, Mbak Rina, Mbak Ken Fitria, Mbak Mining, Mbak Ridha, Mbak

Annisa, Mbak Rian, dan rekan lainnya; serta teman-teman pengurus PPI DIY: Prof. Gun, Prof. Lili, Prof. Budi Leksono, Pak Komandan Bikers Yayan, Mbak Rinie, Mbak Khusnul, A'a Asep, Bu Istiana, Bu Indah, Bu Tri Marwati, Pak Kur, Mas Dim.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulrahman, A. G., Endytiastuti, E., Ardhani, R., Sudarso, I. S. R., **Pidhatika, B.**, Fauzi, M. B., Susilowati, H., Kristanti, Y., & Handajani, J. (2025). Evaluating the Efficacy of Gelatin-Chitosan-Tetraethyl Orthosilicate Calcium Hydroxide Composite as a Dental Pulp Medicament on COX-2, PGP 9.5, TNF- α Expression and Neutrophil number. *F1000Research*, 13, 1258. <https://doi.org/10.12688/f1000research.156336.2>
- Ana, I. D., Vrana, N. E., Morita, A., Satria, G. A. P., & Hathroubi, S. (2025). Antibacterial surface functionalization of biomedical scaffolds: A transformation towards more adaptive, resilient regenerative therapy. *Results in Surfaces and Interfaces*, 19, 100481. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2025.100481>
- Ardhani, R., Diana, R., & **Pidhatika, B.** (2022). How Porphyromonas gingivalis Navigate the Map: The Effect of Surface Topography on the Adhesion of Porphyromonas gingivalis on Biomaterials. *Materials*, 15(14), 4988. <https://doi.org/10.3390/ma15144988>
- Ardhani, R., Suraya, T., Wulanjati, M. P., Ana, I. D., R  he, J., & **Pidhatika, B.** (2022). Photoreactive polymer and C,H-insertion reaction to tailor the properties of CHA/gelatin-based scaffold. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 27(5), 326–345. <https://doi.org/10.1080/1023666X.2022.2076012>
- Bhardwaj, N., & Kundu, S. C. (2010). Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology Advances*, 28(3), 325–347. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.01.004>
- Bousquet, A., Awada, H., Hiorns, R. C., Dagron-Lartigau, C., & Billon, L. (2014). Conjugated-polymer grafting on inorganic and organic substrates: A new trend in organic electronic materials. In

- Progress in Polymer Science* (Vol. 39, Issue 11, pp. 1847–1877). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.03.003>
- Castner, D. G., & Ratner, B. D. (2002). Biomedical surface science: Foundations to frontiers. *Surface Science*, 500(1), 28–60. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(01\)01587-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-6028(01)01587-4)
- Chen, S., Guo, Y., Liu, R., Wu, S., Fang, J., Huang, B., Li, Z., Chen, Z., & Chen, Z. (2018). Tuning surface properties of bone biomaterials to manipulate osteoblastic cell adhesion and the signaling pathways for the enhancement of early osseointegration. *Colloids and Surfaces. B, Biointerfaces*, 164, 58–69. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.01.022>
- Chen, Y., Cao, W., Zhou, J., **Pidhatika, B.**, Xiong, B., Huang, L., Tian, Q., Shu, Y., Wen, W., Hsing, I.-M., & Wu, H. (2015). Poly(l-lysine)-graft-folic acid-coupled poly(2-methyl-2-oxazoline) (PLL-g-PMOXA-c-FA): A Bioactive Copolymer for Specific Targeting to Folate Receptor-Positive Cancer Cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(4), 2919–2930. <https://doi.org/10.1021/am508399w>
- Chen, Y., **Pidhatika, B.**, von Erlach, T., Konradi, R., Textor, M., Hall, H., & Lühmann, T. (2014). Comparative assessment of the stability of nonfouling poly(2-methyl-2-oxazoline) and poly(ethylene glycol) surface films: An in vitro cell culture study. *Biointerphases*, 9(3), 031003. <https://doi.org/10.1116/1.4878461>
- Cordero, D., López-Álvarez, M., Rodríguez-Valencia, C., Serra, J., Chiussi, S., & González, P. (2013). In vitro response of pre-osteoblastic cells to laser microgrooved PEEK. *Biomedical Materials*, 8(5), 055006. <https://doi.org/10.1088/1748-6041/8/5/055006>
- Eskani, I. N., Rahayuningsih, E., Astuti, W., & **Pidhatika, B.** (2023). Low Temperature In Situ Synthesis of ZnO Nanoparticles from Electric Arc Furnace Dust (EAFD) Waste to Impart Antibacterial

- Properties on Natural Dye-Colored Batik Fabrics. *Polymers*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/polym15030746>
- Eskani, I. N., Rahayuningsih, E., Astuti, W., & **Pidhatika, B.** (2024). In situ synthesis of zinc oxide nanoparticles from electric arc furnace dust waste for functionalization of fabric: optimization with response surface methodology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1388(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1388/1/012022>
- Gad, S. C., & Gad-McDonald, S. (2015). *Biomaterials, medical devices, and combination products: Biocompatibility testing and safety assessment*. CRC Press.
- Gheisarifar, M., Thompson, G. A., Drago, C., Tabatabaei, F., & Rasoulianboroujeni, M. (2021). In vitro study of surface alterations to polyetheretherketone and titanium and their effect upon human gingival fibroblasts. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 125(1), 155–164. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2019.12.012>
- Handajani, J., Ardhani, R., Sudarso, I. S. R., **Pidhatika, B.**, Mohammed, A., & Fauzi, M. B. (2024). Evaluation of the Expression of Nestin in the Pulp after Application of Gelatin-Chitosan-Tetraethyl Orthosilicate-Calcium Hydroxide Composite. *Malaysian Journal of Medicine & Health Sciences*, 20, 29–34.
- Hoogenboom, R. (2007). Poly (2-oxazoline) s: Alive and Kicking. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 208(1), 18–25. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/macp.200600558>
- Hoogenboom, R. (2009). Poly (2-oxazoline) s: a polymer class with numerous potential applications. *Angewandte Chemie International Edition*, 48(43), 7978–7994. <https://doi.org/10.1002/anie.200901607>
- Hoogenboom, R., & Schlaad, H. (2017). Thermoresponsive poly(2-oxazoline)s, polypeptoids, and polypeptides. *Polymer Chemistry*, 8(1), 24–40. <https://doi.org/10.1039/c6py01320a>

- Kleber, C., Bruns, M., Lienkamp, K., R  he, J., & Asplund, M. (2017). An interpenetrating, microstructurable and covalently attached conducting polymer hydrogel for neural interfaces. *Acta Biomaterialia*, 58, 365–375. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actbio.2017.05.056>
- Konradi, R., **Pidhatika, B.**, Mühlebach, A., & Textor, M. (2008). Poly-2-methyl-2-oxazoline: A peptide-like polymer for protein-repellent surfaces. *Langmuir*, 24(3), 613–616. <https://doi.org/10.1021/la702917z>
- Lava, K., Verbraeken, B., & Hoogenboom, R. (2015). Poly(2-oxazoline)s and click chemistry: A versatile toolbox toward multi-functional polymers. *European Polymer Journal*, 65, 98–111. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.01.014>
- Ma, S., Zhang, X., Yu, B., & Zhou, F. (2019). Brushing up functional materials. *NPG Asia Materials*, 11(24). <https://doi.org/10.1038/s41427-019-0121-2>
- Mahajan, A., & Sidhu, S. S. (2018). Surface modification of metallic biomaterials for enhanced functionality: a review. *Materials Technology*, 33(2), 93–105. <https://doi.org/10.1080/10667857.2017.1377971>
- Mahmudi, M., Ardhani, R., **Pidhatika, B.**, Suyanta, S., Swasono, Y. A., Rudianto, R. P., & Nuryono, N. (2024). Development of a local drug delivery system for promoting the regeneration of infective bone defects: composite films with controlled properties. *Polymer Bulletin*, 81(12), 11215–11238. <https://doi.org/10.1007/s00289-024-05243-8>
- Mahmudi, Nuryono, **Pidhatika, B.**, & Suyanta. (2022). Synthesis of bioactive membranes for guided tissue regeneration (GTR): a comparative study of the effect silane-based cross-linker. *RASAYAN J.Chem*, 15(1), 102–107. <https://doi.org/10.31788/RJC.2022.1516435>

- Maudisha. (2024). *DOKTOR FTUI KEMBANGKAN BIOMATERIAL BERBASIS LOGAM DALAM NEGERI GUNA PENGEMBANGAN BONE PLATE IMPLAN TULANG* . <https://www.Ui.Ac.Id/Doktor-Ftui-Kembangkan-Biomaterial-Untuk-Bone-Plate-Implan-Tulang/>.
- Montoya, C., Du, Y., Gianforcaro, A. L., Orrego, S., Yang, M., & Lelkes, P. I. (2021). On the road to smart biomaterials for bone research: definitions, concepts, advances, and outlook. *Bone Research*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41413-020-00131-z>
- Mukherji, R., Patil, A., & Prabhune, A. (2014). Role of Extracellular Proteases in Biofilm Disruption of Gram Positive Bacteria with Special Emphasis on Staphylococcus aureus Biofilms. *Enzyme Engineering*, 04(01), 1000126. <https://doi.org/10.4172/2329-6674.1000126>
- Namiki, A., Kawai, T., & Ichige, K. (1986). Angle-resolved time-of-flight spectra of neutral particles desorbed from laser irradiated CdS. *Surface Science*, 166(1), 129–140. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0039-6028\(86\)90536-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0039-6028(86)90536-4)
- National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering. (2024). *Biomaterial Technologies: What are biomaterials?* . <https://www.nibib.nih.gov/science-education/science-topics/biomaterials>
- Ngoerah, I. G. N. G. (2023). *Akselerasi Alat Kesehatan PDN dalam Mutu dan Keselamatan Pasien Suatu Keinginan atau Kebutuhan*. https://www.Persi.or.Id/Wp-Content/Uploads/2023/11/36.K6_RSUP-Prof.Dr_.IGNG_.-Ngoerah_-Akselerasi-Alat-Kesehatan-PDN-Dalam-Mutu-Dan-Keselamatan-Pasien-Suatu-Keinginan-Atau-Kebutuhan.Pdf.
- Ninan, N., **Pidhatika, B.**, Bright, R., Kartika, B. M., Rudianto, R. P., Swasono, Y. A., Ardhani, R., & Vasilev, K. (2024). Advancing sustainable technologies: plasma-engineered bioplastics with silver nanoparticle integration. *Journal of Materials Science*, 59(20), 9003–9020. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09673-7>

- Pandiyarajan, C. K., & Genzer, J. (2019). Thermally activated one-pot, simultaneous radical and condensation reactions generate surface-anchored network layers from common polymers. *Macromolecules*, 52(2), 700–707. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.8b02194>
- Pidhatika, B.** (2019). Hemocompatibility study of surface-attached antibiofouling polymer monolayers. *Journal of Physics: Conference Series*, 1282(1), 012069. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1282/1/012069>
- Pidhatika, B.,** Ardhani, R., & Prasetyanto, E. A. (2022). *PERMUKAAN BIOMATERIAL: Strategi Modifikasi Karakterisasi dan Respon Tubuh*. UGM PRESS.
- Pidhatika, B.,** Ardhani, R., Swasono, Y. A., Anggraeni, R., Andriyanti, W., Santosa, F. A., Rudianto, R. P., Ana, I. D., & Dewi, A. H. (2025). Advancing Bone Regeneration: The Impactful Role of Plasma Technology. *Plasma Processes and Polymers*, 22(2), 2400171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ppap.202400171>
- Pidhatika, B.,** Chen, Y., Coullerez, G., Al-Bataineh, S., & Textor, M. (2014). ToF-SIMS analysis of poly(l-lysine)-graft-poly(2-methyl-2-oxazoline) ultrathin adlayers. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 406(5), 1509–1517. <https://doi.org/10.1007/s00216-013-7537-2>
- Pidhatika, B.,** & Macgregor, M. (2023). Surface “CLICK” Reaction Between Acetylene-Decorated Polymeric Platform and Azide-Decorated Compounds. *Surface Review and Letters*, 30(03), 2350016.
- Pidhatika, B.,** Möller, J., Benetti, E. M., Konradi, R., Rakhmatullina, E., Mühlebach, A., Zimmermann, R., Werner, C., Vogel, V., & Textor, M. (2010). The role of the interplay between polymer architecture and bacterial surface properties on the microbial adhesion to polyoxazoline-based ultrathin films. *Biomaterials*,

31(36), 9462–9472. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2010.08.033>

Pidhatika, B., Möller, J., Vogel, V., & Konradi, R. (2008). Nonfouling surface coatings based on poly(2-methyl-2-oxazoline). *Chimia*, 62(4), 264–269. <https://doi.org/10.2533/chimia.2008.264>

Pidhatika, B., & Nalam, P. C. (2019). Investigation of design parameters in generating antifouling and lubricating surfaces using hydrophilic polymer brushes. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(24), 47659. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.47659>

Pidhatika, B., Ninan, N., Bright, R., Palms, D., Rahmawan, Y., & Vasilev, K. (2024). Plasma-assisted surface engineering for value added in starch bioplastics: A study on enhanced surface properties and natural dye immobilization. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(12). <https://doi.org/10.1002/app.55130>

Pidhatika, B., & Rakhmatullina, E. (2014). The synthesis of polymeric dual-functional antimicrobial surface based on poly(2-methyl-2-oxazoline). *Indonesian Journal of Biotechnology*, 19(1), 12–22. <https://doi.org/10.22146/ijbiotech.8630>

Pidhatika, B., Ridwan, N. F., & Rakhmawati, A. (2016). Poly (2-methyl-2-oxazoline)(PMOXA) and antimicrobial peptide GKH17 as potential antimicrobial coatings for contact lenses. *ASEAN Engineering Journal*, 5(1), 15–24. <https://doi.org/https://doi.org/10.11113/aej.v5.15464>

Pidhatika, B., Rodenstein, M., Chen, Y., Rakhmatullina, E., Mühlebach, A., Acikgöz, C., Textor, M., & Konradi, R. (2012). Comparative stability studies of Poly(2-methyl-2-oxazoline) and Poly(ethylene glycol) brush coatings. *Biointerphases*, 7(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13758-011-0001-y>

Pidhatika, B., Widayaya, V. T., Nalam, P. C., Swasono, Y. A., & Ardhani, R. (2022). Surface Modifications of High-Performance Polymer Polyetheretherketone (PEEK) to Improve Its Biological

Performance in Dentistry. *Polymers*, 11(24). <https://doi.org/10.3390/polym14245526>

Pidhatika, B., Zhao, N., & R  he, J. (2019). Development of surface-attached thin film of non-fouling hydrogel from poly(2-oxazoline). *Journal of Polymer Research*, 26(1). <https://doi.org/10.1007/s10965-018-1677-1>

Pidhatika, B., Zhao, N., Zinggeler, M., & R  he, J. (2019). Surface-attached dual-functional hydrogel for controlled cell adhesion based on poly(N,N-dimethylacrylamide). *Journal of Polymer Research*, 26(3). <https://doi.org/10.1007/s10965-019-1728-2>

Ratner, B. D., Hoffman, A. S., Schoen, F. J., Lemons, J. E., Wagner, W. R., Sakiyama-Elbert, S. E., Zhang, G., & Yaszemski, M. J. (2020). 1.1.1 -Introduction to Biomaterials Science: An Evolving, Multidisciplinary Endeavor. In W. R. Wagner, S. E. Sakiyama-Elbert, G. Zhang, & M. J. Yaszemski (Eds.), *Biomaterials Science (Fourth Edition)* (pp. 3–19). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816137-1.00001-5>

Richardson, J. J., Bj  rnmalm, M., & Caruso, F. (2015). Technology-driven layer-by-layer assembly of nanofilms. *Science*, 348(6233), aaa2491. <https://doi.org/10.1126/science.aaa2491>

Riga, E., Saar, J., Erath, R., Hechenbichler, M., & Lienkamp, K. (2017). On the Limits of Benzophenone as Cross-Linker for Surface-Attached Polymer Hydrogels. *Polymers*, 9(12), 686. <https://doi.org/10.3390/polym9120686>

Rossegger, E., Schenk, V., & Wiesbrock, F. (2013). Design strategies for functionalized poly (2-oxazoline) s and derived materials. *Polymers*, 5(3), 956–1011. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym5030956>

Subbiahdoss, G., **Pidhatika, B.**, Coullerez, G., Charnley, M., Kuijter, R., van der Mei, H., Textor, M., & Busscher, H. (2010). Bacterial biofilm formation versus mammalian cell growth on titanium-

- based mono- and bi-functional coating. *European Cells and Materials*, 19, 205–213. <https://doi.org/10.22203/eCM.v019a20>
- Sukaryo, S. G., Purnama, A., & Hermawan, H. (2016). Structure and properties of biomaterials. In *Biomaterials and Medical Devices: a Perspective from an Emerging Country* (pp. 1–22). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14845-8_1
- Syibyan, F. L., Siswanta, D., **Pidhatika, B.**, Suprpto, Kamiya, Y., & Otomo, R. (2024). Plasma Functionalization for Enhanced Natural Dye Affinity on Bioplastics: A Novel Approach. *Plasma Processes and Polymers*. <https://doi.org/10.1002/ppap.202400184>
- Tang, X., Huang, K., Dai, J., Wu, Z., Cai, L., Yang, L., Wei, J., & Sun, H. (2017). Influences of surface treatments with abrasive paper and sand-blasting on surface morphology, hydrophilicity, mineralization and osteoblasts behaviors of n-CS/PK composite. *Scientific Reports*, 7(1), 568. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00571-4>
- Thulaseedharakurup, S., Ninan, N., **Pidhatika, B.**, Hayles, A., Alemie, M. N., Vasilev, K., & Parameswaranpillai, J. (2025). Surface functionalisation of crosslinked polyvinyl alcohol/cellulose nanofiber biocompatible composite membrane using plasma. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 41, 101461.
- Verbraeken, B., Monnery, B. D., Lava, K., & Hoogenboom, R. (2017). The chemistry of poly(2-oxazoline)s. *European Polymer Journal*, 88, 451–469. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.11.016>
- von Erlach, T., Zwicker, S., **Pidhatika, B.**, Konradi, R., Textor, M., Hall, H., & Lühmann, T. (2011). Formation and characterization of DNA-polymer-condensates based on poly(2-methyl-2-oxazoline) grafted poly(l-lysine) for non-viral delivery of therapeutic DNA. *Biomaterials*, 32(22), 5291–5303. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2011.03.080>

- Wang, Z., Yu, Z., Wang, Z., Li, S., Song, L., Xu, T., Shen, G., Wang, Y., Huang, T., Dong, X., Yang, G., & Gao, C. (2024). Surface-activated 3D-printed PEEK implant enhances anti-infection and osteogenesis. *Composites Part B: Engineering*, 273, 111258. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111258>
- Ye, L., & **Pidhatika, B.** (2010). *Investigation on PLL-g-PMOXA / PLL-g-PiPrOXA: Non-fouling Polymeric Coating for Niobium Oxide Surface*. ETH Zürich.
- Zhao, N., & **Pidhatika, B.** (2020). The preparation of dual-functional hydrogel as the surface coating of plastics in biomedical applications. *Majalah Kulit, Karet, Dan Plastik*, 35(2), 63. <https://doi.org/10.20543/mkkp.v35i2.5604>

DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

Buku Nasional

1. **Pidhatika, B.**, Ardhani, R., & Prasetyanto, E. A. (2022). *Permukaan Biomaterial: Strategi Modifikasi Karakterisasi dan Respon Tubuh*. UGM PRESS.

Jurnal Internasional

2. Thulaseedharakurup, S., Ninan, N., **Pidhatika, B.**, Hayles, A., Alemie, M. N., Vasilev, K., & Parameswaranpillai, J. (2025). Surface functionalisation of crosslinked polyvinyl alcohol/cellulose nanofiber biocompatible composite membrane using plasma. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 41, 101461. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2025.101461>
3. Abdulrahman, A. Q. G., Endytiastuti, E., Ardhani, R., Sudarso, I. S. R., **Pidhatika, B.**, Fauzi, M. B., Susilowati, H., Kristanti, Y., & Handajani, J. (2025). Evaluating the Efficacy of Gelatin-Chitosan-Tetraethyl Orthosilicate Calcium Hydroxide Composite as a Dental Pulp Medicament on COX-2, PGP 9.5, TNF- α Expression and Neutrophil number. *F1000Research*, 13, 1258. <https://doi.org/10.12688/f1000research.156336.2>
4. **Pidhatika, B.**, Ardhani, R., Swasono, Y. A., Anggraeni, R., Andriyanti, W., Santosa, F. A., Rudianto, R. P., Ana, I. D., & Dewi, A. H. (2025). Advancing Bone Regeneration: The Impactful Role of Plasma Technology. *Plasma Processes and Polymers*, 22(2), 2400171. <https://doi.org/10.1002/ppap.202400171>

5. Syibyan, F. L., Siswanta, D., **Pidhatika, B.**, Suprpto, Kamiya, Y., & Otomo, R. (2024). Plasma Functionalization for Enhanced Natural Dye Affinity on Bioplastics: A Novel Approach. *Plasma Processes and Polymers*, 21(12), 2400184. <https://doi.org/10.1002/ppap.202400184>
6. Handajani, J., Ardhani, R., Sudarso, I. S. R., **Pidhatika, B.**, Mohammed, A. Q., & Fauzi, M. B. (2024). Evaluation of the Expression of Nestin in the Pulp after Application of Gelatin-Chitosan-Tetraethyl Orthosilicate-Calcium Hydroxide Composite. *Malaysian Journal of Medicine & Health Sciences*, 20. (eISSN 2636-9346)
7. Ninan, N., **Pidhatika, B.**, Bright, R., Kartika, B. M., Rudianto, R. P., Swasono, Y. A., Ardhani, R., & Vasilev, K. (2024). Advancing sustainable technologies: plasma-engineered bioplastics with silver nanoparticle integration. *Journal of Materials Science*, 59(20), 9003-9020. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09673-7>
8. Mahmudi, M., Ardhani, R., **Pidhatika, B.**, Suyanta, S., Swasono, Y. A., Rudianto, R. P., & Nuryono, N. (2024). Development of a local drug delivery system for promoting the regeneration of infective bone defects: composite films with controlled properties. *Polymer Bulletin*, 81(12), 11215-11238. <https://doi.org/10.1007/s00289-024-05243-8>
9. **Pidhatika, B.**, Ninan, N., Bright, R., Palms, D., Rahmawan, Y., & Vasilev, K. (2024). Plasma-assisted surface engineering for value added in starch bioplastics: A study on enhanced surface properties and natural dye immobilization. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(12), e55130. <https://doi.org/10.1002/app.55130>
10. **Pidhatika, B.**, & Macgregor, M. (2023). Surface “CLICK” Reaction Between Acetylene-Decorated Polymeric Platform and Azide-Decorated Compounds. *Surface Review and Letters*, 30(03), 2350016. <https://doi.org/10.1142/S0218625X23500166>

11. Eskani, I. N., Rahayuningsih, E., Astuti, W., & **Pidhatika, B.** (2023). Low temperature in situ synthesis of ZnO nanoparticles from electric arc furnace dust (EAFD) waste to impart antibacterial properties on natural dye-colored batik fabrics. *Polymers*, 15(3), 746. <https://doi.org/10.3390/polym15030746>
12. **Pidhatika, B.**, Widyaya, V. T., Nalam, P. C., Swasono, Y. A., & Ardhani, R. (2022). Surface modifications of high-performance polymer polyetheretherketone (PEEK) to improve its biological performance in dentistry. *Polymers*, 14(24), 5526. <https://doi.org/10.3390/polym14245526>
13. Ardhani, R., Diana, R., & **Pidhatika, B.** (2022). How *Porphyromonas gingivalis* navigate the map: the effect of surface topography on the adhesion of *Porphyromonas gingivalis* on biomaterials. *Materials*, 15(14), 4988. <https://doi.org/10.3390/ma15144988>
14. Ardhani, R., Suraya, T., Wulanjati, M. P., Ana, I. D., R  he, J., & **Pidhatika, B.** (2022). Photoreactive polymer and C, H-insertion reaction to tailor the properties of CHA/gelatin-based scaffold. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 27(5), 326-345. <https://doi.org/10.1080/1023666X.2022.2076012>
15. Mahmudi, M., **Pidhatika, B.**, Suyanta, S., & Nuryono, N. (2022). Modification of Gelatin/Carbonated Hydroxyapatite Membrane With Chitosan To Improve The Tensile Strength. *Rasayan Journal of Chemistry*, 15(2). <http://dx.doi.org/10.31788/RJC.2022.1526599>
16. Mahmudi, Nuryono, **Pidhatika, B.**, & Suyanta. (2022). Synthesis of bioactive membranes for guided tissue regeneration (GTR): a comparative study of the effect silane-based cross-linker. *RASAYAN J.Chem*, 15(1), 102–107. <https://doi.org/10.31788/RJC.2022.1516435>

17. Mayasari, H., Sholeh, M., Kinasih, N., Sya'bani, M., & **Pidhatika, B.** (2020). The preparation of NBR/ENR composite for oil seal applications. *European J. of Materials Science and Engineering*, 5. <https://doi.org/10.36868/ejmse.2020.05.03.161>
18. **Pidhatika, B.**, & Nalam, P. C. (2019). Erratum: Investigation of design parameters in generating antifouling and lubricating surfaces using hydrophilic polymer brushes. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(37), 47973. <https://doi.org/10.1002/app.47973>
19. **Pidhatika, B.**, Zhao, N., & R  he, J. (2019). Development of surface-attached thin film of non-fouling hydrogel from poly (2-oxazoline). *Journal of Polymer Research*, 26(1), 21. <https://doi.org/10.1007/s10965-018-1677-1>
20. **Pidhatika, B.**, Zhao, N., Zinggeler, M., & R  he, J. (2019). Surface-attached dual-functional hydrogel for controlled cell adhesion based on poly (N, N-dimethylacrylamide). *Journal of Polymer Research*, 26(3), 69. <https://doi.org/10.1007/s10965-019-1728-2>
21. **Pidhatika, B.**, Ridwan, N. F., & Rakhmawati, A. (2016). Poly (2-methyl-2-oxazoline)(PMOXA) and antimicrobial peptide GKH17 as potential antimicrobial coatings for contact lenses. *ASEAN Engineering Journal*, 5(1), 15-24. <https://doi.org/10.11113/aej.v5.15464>
22. Chen, Y., Cao, W., Zhou, J., **Pidhatika, B.**, Xiong, B., Huang, L., Tian, Q., Shu, Y., Wen, W., Hsing, I., & Wu, H. (2015). Poly (l-lysine)-graft-folic acid-coupled poly (2-methyl-2-oxazoline) (PLL-g-PMOXA-c-FA): A Bioactive Copolymer for Specific Targeting to Folate Receptor-Positive Cancer Cells. *ACS applied materials & interfaces*, 7(4), 2919-2930. <http://dx.doi.org/10.1021/am508399w>

23. Chen, Y., **Pidhatika, B.**, von Erlach, T., Konradi, R., Textor, M., Hall, H., & Lühmann, T. (2014). Comparative assessment of the stability of nonfouling poly (2-methyl-2-oxazoline) and poly (ethylene glycol) surface films: An in vitro cell culture study. *Biointerphases*, 9(3). <https://doi.org/10.1116/1.4878461>
24. **Pidhatika, B.**, Chen, Y., Coullerez, G., Al-Bataineh, S., & Textor, M. (2014). ToF-SIMS analysis of poly (L-lysine)-graft-poly (2-methyl-2-oxazoline) ultrathin adlayers. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 406, 1509-1517. <https://doi.org/10.1007/s00216-013-7537-2>
25. **Pidhatika, B.**, Rodenstein, M., Chen, Y., Rakhmatullina, E., Mühlebach, A., Acikgöz, C., Textor, M., & Konradi, R. (2012). Comparative stability studies of poly (2-methyl-2-oxazoline) and poly (ethylene glycol) brush coatings. *Biointerphases*, 7(1). <https://doi.org/10.1007/s13758-011-0001-y>
26. von Erlach, T., Zwicker, S., **Pidhatika, B.**, Konradi, R., Textor, M., Hall, H., & Lühmann, T. (2011). Formation and characterization of DNA-polymer-condensates based on poly (2-methyl-2-oxazoline) grafted poly (L-lysine) for non-viral delivery of therapeutic DNA. *Biomaterials*, 32(22), 5291-5303. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2011.03.080>
27. **Pidhatika, B.**, Möller, J., Benetti, E. M., Konradi, R., Rakhmatullina, E., Mühlebach, A., Zimmermann, R., Warner, C., Vogel, V., & Textor, M. (2010). The role of the interplay between polymer architecture and bacterial surface properties on the microbial adhesion to polyoxazoline-based ultrathin films. *Biomaterials*, 31(36), 9462-9472. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2010.08.033>
28. Subbiahdoss, G., **Pidhatika, B.**, Coullerez, G., Charnley, M., Kuijter, R., van der Mei, H. C., Textor, M., & Busscher, H. J. (2010). Bacterial biofilm formation versus mammalian cell growth on titanium-based mono-and bi-functional coating. *European Cells and Materials*, 19, 205-2013.

29. Konradi, R., **Pidhatika, B.**, Mühlebach, A., & Textor, M. (2008). Poly-2-methyl-2-oxazoline: a peptide-like polymer for protein-repellent surfaces. *Langmuir*, 24(3), 613-616. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/la702917z>
30. **Pidhatika, B.**, Möller, J., Vogel, V., & Konradi, R. (2008). Nonfouling surface coatings based on poly (2-methyl-2-oxazoline). *Chimia*, 62(4), 264-264. <https://doi.org/10.2533/chimia.2008.264>

Jurnal Nasional

31. Irwanto, D., **Pidhatika, B.**, Nurhajati, D. W., & Harjanto, S. (2020). Mechanical properties and crystallinity of linear low density polyethylene based biocomposite film. *Majalah Kulit, Karet, dan Plastik*, 35, 93-98. <https://doi.org/10.20543/mkkip.v35i2.5624>
32. Zhao, N., & **Pidhatika, B.** (2020). The preparation of dual-functional hydrogel as the surface coating of plastics in biomedical applications. *Majalah Kulit, Karet, dan Plastik*, 35(2), 63-74. <https://doi.org/10.20543/mkkip.v35i2.5604>
33. Nurhajati, D. W., **Pidhatika, B.**, & Harjanto, S. (2019). Biodegradable plastics from linier low-density polyethylene and polysaccharide: The influence of polysaccharide and acetic acid. *Majalah Kulit, Karet, dan Plastik*, 35(1), 33-40. <https://doi.org/10.20543/mkkip.v35i1.4874>
34. Kasmudjiastuti, E., Prayitno, P., **Pidhatika, B.**, & Griyanitasari, G. (2016). Pengaruh perbedaan jumlah penambahan binder uretan dan berbagai motif embossing terhadap kualitas kulit reject. *Majalah Kulit, Karet, dan Plastik*, 32(1), 39-50. <http://dx.doi.org/10.20543/mkkip.v32i1.958>

35. Nur Fathurahman, R., **Pidhatika, B.**, Rakhmawati, A., Umniyatie, S., & Pertiwi, K. R. (2016) Aktivitas Antibakteri Berbagai Polimer Antimikroba Terhadap Bakteri yang Diisolasi dari Permukaan Lensa Kontak Secara In Vitro. *Jurnal Biologi*, 5(7), 58-62.
36. **Pidhatika, B.**, & Rakhmatullina, E. (2014). The synthesis of polymeric dual-functional antimicrobial surface based on poly (2-methyl-2-oxazoline). *Indonesian Journal of Biotechnology*, 19(1), 12-22. <https://doi.org/10.22146/ijbiotech.8630>

Prosiding Internasional

37. Eskani, I. N., Rahayuningsih, E., Astuti, W., & **Pidhatika, B.** (2024, September). In situ synthesis of zinc oxide nanoparticles from electric arc furnace dust waste for functionalization of fabric: optimization with response surface methodology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1388, No. 1, p. 012022). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1388/1/012022>
38. Eskani, I. N., Rahayuningsih, E., Astuti, W., & **Pidhatika, B.** (2024, July). In situ functionalization of ZnO nanoparticles for enhancing UV-light fastness and antibacterial activity of natural dye-colored batik fabric. *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3077, No. 1). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0203268>
39. Setyorini, I., Rochmadi, R., **Pidhatika, B.**, Virdian, S., Doloksaribu, M., & Maryani, E. (2022, March). Nanostructured silica from bagasse ash as reinforcing filler in styrene butadiene rubber: Does the mixing parameters matter?. *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2391, No. 1). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0078656>

40. Kasmudjiastuti, E., **Pidhatika, B.**, Griyanitasari, G., & Pahlawan, I. F. (2019, August). The effect of alum addition on shrinkage temperature, chemical properties, and morphology in the manufacture of vegetable-tanned leather. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 602, No. 1, p. 012044). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/602/1/012044>
41. **Pidhatika, B.** (2019, July). Hemocompatibility study of surface-attached antibiofouling polymer monolayers. *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1282, No. 1, p. 012069). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1282/1/012069>

Prosiding Nasional

42. Rakhmasari, K. D., Perdana, I., Prasetya, A., & **Pidhatika, B.** (2019, April). Nanosilika dari prekursor silika geotermal: Pengaruh konsentrasi surfaktan dan dekomposisi termal pasca sintesis. *Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan"* (p. 7).
43. **Pidhatika, B.** & Wulung, R. B. S. (2004). Model Difusi zat Warna Secang pada Kulit Tersamak. *Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses* (pp. 1-6).

Kekayaan Intelektual

Paten

44. Syibyan, F. L., **Pidhatika, B.**, Siswanta, D., & Suprpto. (2024). *Metode Modifikasi Permukaan Bioplastik Dengan Teknologi Radiasi Plasma untuk Mengontrol Perlekatannya dengan Tinta Zat Warna Alami* (No. Permohonan P00202405579). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.

45. Swasono, Y. A., **Pidhatika, B.**, Ardhani, R., Rudianto, R. P., Kartika, B. M., Suprpto, & Suprihatin, H. (2024). *Material Monomer Organik Pelapis Permukaan Membran Gelatin/CHA dan Metode Pelapisannya Menggunakan Deposisi Plasma* (No. Permohonan P00202410237). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.
46. **Pidhatika, B.**, Vasilev, K., Rahmawan, Y., & Ninan, N. (2023). *Modifikasi Permukaan Plastik Dengan Teknologi Radiasi Plasma atau Ultraviolet untuk Mengontrol Perlekatannya dengan Zat Warna Alami* (No. Permohonan P00202309777). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.
47. **Pidhatika, B.**, Ardhani, R., Ana, I. D., Susiani, E., Irwanto, D., Suraya, T., R  he, J. (2020). *Membran Periodontal Dengan Stabilitas dan Kekuatan Mekanik yang Terkontrol dan Proses Penyiapannya* (No. Permohonan P00202006540) Direktorat Jenderal

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. DATA PRIBADI

Nama Lengkap	: Dr.Sc. Bidhari Pidhatika
Tempat, Tanggal Lahir	: Jakarta, 1980
Anak ke	: 2 dari 3 bersaudara
Jenis Kelamin	: Perempuan
Nama Ayah Kandung	: Yoanes Chrisostomus
Nama Ibu Kandung	: Lucia
Nama Suami	: Prof. Dr. Indra Perdana
Jumlah Anak	: 3 (tiga)
Nama Anak	: Leonardi Khrisandra Khrisantika
Nama Unit	: Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia
Nama Organisasi	: -
Nama Instansi (BRIN)	: Badan Riset dan Inovasi Nasional
Judul Orasi	: Strategi Molekuler dalam Teknologi Permukaan Biomaterial untuk Mendukung Sektor Kesehatan Nasional
Ilmu	: Teknik Kimia
Bidang	: Material
Kepakaran	: Material polimer & Modifikasi Permukaan Material
No. SK Pangkat Terakhir	: 1831/II.2.3/KP/2024 tanggal 17 Mei 2024
No. SK Peneliti Ahli Utama	: 43/M Tahun 2024 tanggal 13 Juni 2024
Tautan scopus	: https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=23568387200
Tautan google scholar	: https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=MY0uLgsAAAAJ

B. PENDIDIKAN FORMAL

No.	Jenjang	Nama Sekolah/ PT/Universitas	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
1.	SD	Marsudirini I	Jakarta	1992
2.	SMP	Marsudirini I	Jakarta	1995
3.	SMA	Stella Duce I	Yogyakarta	1998
5.	S1	Universitas Gadjah Mada	Yogyakarta	2003
6.	S2	Chalmers University of Technology	Göteborg, Sweden	2006
7.	S3	ETH Zürich	Zürich, Switzerland	2011

C. PENDIDIKAN NONFORMAL

No.	Nama Pelatihan/Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
1.	Akta Mengajar	Jakarta, Indonesia	2007
2.	Didactic Workshop	Zurich, Switzerland	2007
3.	Seminar “Presenting- Publishing-Communicating”	Zurich, Switzerland	2008
4.	Pre-WBC symposium “Implant Infection versus Healing”	Thessing, The Netherlands	2008
5.	CCMX-Matlife Traveling Lab Workshop	Switzerland	2008
6.	Pelatihan Dasar eLearning	Yogyakarta, Indonesia	2011
7.	Workshop Penelitian dan Pengembangan Kulit, Karet, dan Plastik	Yogyakarta, Indonesia	2012

No.	Nama Pelatihan/Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
8.	Pelatihan Penyusunan SKKNI Angkatan II, Pusat Pendidikan dan Pelatihan Industri	Jakarta, Indonesia	2013
9.	Penyusunan Business Plan	Yogyakarta, Indonesia	2013
10.	Pendidikan dan Pelatihan E-Learning	Yogyakarta, Indonesia	2013
11.	Pelatihan Paten Drafting Hak Kekayaan Intelektual	Jakarta, Indonesia	2014
12.	Intellectual Property Management in Universities and Successful Tecknology Licensing (STL)	Jakarta, Indonesia	2014
13.	Pelatihan Kode Etika Peneliti, Kode Etika Publikasi Ilmiah, serta Klirens Etika Penelitian dan Publikasi Ilmiah	Yogyakarta, Indonesia	2015
14.	Pelatihan Interpretasi Data Nuclear Magnetic Resonance (NMR) dan Scanning Electron Microscopy (SEM) dan Energy Dispersive Spectrometry (EDS)	Yogyakarta, Indonesia	2015
15.	Pelatihan Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3) Balai Besar Kulit, Karet, dan Plastik	Yogyakarta, Indonesia	2015
16.	Paska doktoral	Freiburg, Germany	2016– 2018
17.	On-Job Training Audit Teknologi Industri di PT YPTI dan PT Madubaru PG-PS Madukismo	Yogyakarta, Indonesia	2021

No.	Nama Pelatihan/Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
18.	Bimbingan Teknis Auditor Teknologi	Yogyakarta, Indonesia	2021
19.	Pelatihan ISO 17020	Yogyakarta, Indonesia	2021
20.	Kunjungan riset	Adelaide, Australia	2022–2023
21.	Kunjungan riset	Buffalo, New York, USA	2024–2025

D. JABATAN STRUKTURAL

No.	Jabatan/Pekerjaan	Nama Instansi	Tahun
1.	Sekretaris Program Studi	Politeknik ATK Yogyakarta	2012–2013

E. JABATAN FUNGSIONAL

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1.	Lektor pada Akademi Teknologi Kulit, Kementerian Perindustrian	27 April 2012
2.	Lektor pada Sekolah Tinggi Manajemen Industri, Kementerian Perindustrian	20 November 2013
3.	Peneliti Muda pada Balai Besar Kulit, Karet, dan Plastik, Kementerian Perindustrian	13 Juni 2016
4.	Peneliti Muda (pengaktifan kembali setelah paska doktoral) pada Balai Besar Kulit, Karet, dan Plastik, Kementerian Perindustrian	09 Mei 2018

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
5.	Peneliti Madya pada Balai Besar Kulit, Karet, dan Plastik, Kementerian Perindustrian	04 Desember 2020
6.	Peneliti Utama pada Badan Riset dan Inovasi Nasional	25 Juni 2024

F. PENUGASAN KHUSUS NASIONAL/INTERNASIONAL

No.	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
1.			... – ...
2.			... – ...
3.			... – ...
4.			... – ...
5.			... – ...

G. KEIKUTSERTAAN DALAM KEGIATAN ILMIAH

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
1.	Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses	Penyaji	Semarang, Indonesia	2004
2.	Seminar dan Lokakarya Sehari	Peserta	Yogyakarta, Indonesia	2007
3.	Kuliah Tamu Prof. Claes Niklasson (Chalmers University of Technology Swedia)	Peserta	Yogyakarta, Indonesia	2011

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
4.	Kuliah Tamu Prof. Juliana Sutanto (ETH Züürich Switzerland)	Peserta	Yogyakarta, Indonesia	2011
5.	Achievement Motivation Training (AMT), Akademi Teknologi Kulit (ATK) Yogyakarta	Sekretaris	Yogyakarta, Indonesia	2011
6.	Seminar Teknologi II, Perhimpunan Polimer Indonesia	Peserta	Tangerang, Indonesia	2012
7.	Workshop Penelitian dan Pengembangan Kulit, Karet, dan Plastik	Peserta	Yogyakarta, Indonesia	2012
8.	Pembekalan Mahasiswa Semester Akhir Akademi Teknologi Yogyakarta	Instruktur	Yogyakarta, Indonesia	2013
9.	Seminar Nasional Energi “Revitalisasi Kebutuhan dan Ketersediaan Gas untuk Industri dan Upaya Preventif”	Peserta	Jakarta, Indonesia	2014
10.	Seminar Nasional Peningkatan Daya Saing Industri Alat Kesehatan Indonesia	Peserta	Jakarta, Indonesia	2014

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
11.	Sriwijaya International Conference on Basic and Applied Sciences	Pembicara	Jakarta Indonesia	2018
12.	Asian Science Camp, Science for Humanity	Pembicara kunci	Manado, Indonesia	2018
13.	Studium Generale	Pembicara kunci	Yogyakarta, Indonesia	2018
14.	International Symposium on Surfaces and Interfaces	Pembicara kunci	Jakarta, Indonesia	2019
15.	Webinar Series	Pembicara yang diundang	Yogyakarta, Indonesia	2020
16.	Webinar Series Tantangan dan Peluang Pengembangan Smart Biomaterials and Tissue Engineering di Indonesia	Pembicara yang diundang	Yogyakarta, Indonesia	2021
17.	Bio-TUNE	Pembicara kunci	Yogyakarta, Indonesia	2023

H. KETERLIBATAN DALAM PENGELOLAAN JURNAL ILMIAH

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/Tugas	Tahun
1.	Biofouling	Taylor & Francis Online	Reviewer	2013
2.	BioMed Research International	Hindawi Publishing Corporation	Reviewer	2014
3.	Journal of Biomaterials Science: Polymer Edition	Taylor & Francis Online	Reviewer	2014
4.	Surface and Interface Analysis	Wiley	Reviewer	2015
5.	Industrial & Engineering Chemistry Research	ACS Publications	Reviewer	2015
6.	Majalah Kulit, Karet, dan Plastik	Ministry of Industry	Editor in Chief	2015–2021
7.	Jurnal Sains Materi Indonesia	National Nuclear Energy Agency of Indonesia	Reviewer	2020
8.	Rasayan Journal of Chemistry	-	Reviewer	2020
9.	Jurnal Dinamika Penelitian Industri	Ministry of Industry	Reviewer	2022
10.	Jurnal Rekayasa Proses	Chemical Engineering Department, Gadjah Mada University	Reviewer	2023

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/Tugas	Tahun
11.	Jurnal Teknologi dan Manajemen	Ministry of Industry	Reviewer	2023
12.	International Journal of Chemistry	Department of Chemistry Gadjah Mada University	Reviewer	2024
13.	Colloids and Surfaces B: Biointerfaces	Elsevier	Reviewer	2024–sekarang
14.	Journal of Applied Polymer Science	Wiley	Reviewer	2025
15.	Journal of Prosthodontic Research	The Japan Prosthodontic Society	Reviewer	2025
16.	Scientific Reports	Nature Portfolio	Reviewer	2025

I. CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

1. Karya Tulis Ilmiah

a. Kualifikasi Karya

No	Kualifikasi Karya	Jumlah
1.	Buku Internasional	-
2.	Buku Nasional	1
3.	Bagian dari Buku Internasional	-
4.	Bagian dari Buku Nasional	-
5.	Jurnal Internasional	29
6.	Jurnal Nasional	6
7.	Prosiding Internasional	5

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

b. Kualifikasi Penulis

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Penulis Tunggal	1
2.	Bersama Penulis Lainnya	42
	Total	43

c. Kualifikasi Penulis

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Indonesia	4
2.	Bahasa Inggris	39
	Total	43

2. Kekayaan Intelektual

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

3. Kerjasama bersama Mitra

No	Kualifikasi Karya	Jumlah
1.	Transaksi Lisensi	-

J. PEMBINAAN KADER ILMIAH

Pejabat Fungsional Peneliti

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.		BRIN	Mentor CPNS	2024

Mahasiswa

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Yin Chen	ETH Zürich	Ko-supervisi mahasiswa master	2008–2009
2.	Lu Ye	ETH Zürich	Ko-supervisi mahasiswa master	2009–2010
3.	Nan Zhao	University of Freiburg	Ko-supervisi mahasiswa master	2017–2018
4.	Mahmudi	Universitas Gadjah Mada	Ko-promotor mahasiswa S3	2019–2023
5.	Istihanah Nurul Eskani	Universitas Gadjah Mada	Ko-promotor mahasiswa S3	2020–2024
6.	Faizatin Liyan Syibyan	Universitas Gadjah Mada	Ko-supervisi mahasiswa master	2022–2024
7.	Juntian Liu	University at Buffalo	Ko-supervisi mahasiswa master	2024–2025
8.	Reza Pahlevi Rudianto	BRIN	Ko-supervisi mahasiswa master	2024–sekarang
9.	Baiq Amelia Riyandari	Universitas Islam Negeri Mataram	Ko-promotor mahasiswa S3	2024–sekarang
10.	Raafi’u Bayumurthy Rashonda	Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia	Pembimbing Tugas Akhir S1 Terapan	2025

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
11.	Audito Achmad Anshorullah	Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia	Pembim- bing Tugas Akhir S1	2025
12.	Ratilla Falih	Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia	Pembim- bing Tugas Akhir S1	2025

K. ORGANISASI PROFESI ILMIAH

No.	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1.	Anggota	Indonesian Polymer Association	2011
2.	Anggota	Indonesian Young Researcher Forum	2013
3.	Pengurus bidang kerja sama	Perhimpunan Periset Indonesia (PPI) DIY	2015–2025
4.	Anggota	Humboldt Family	2016– sekarang
5.	Pengurus bidang advokasi dan kekayaan intelektual	Perhimpunan Periset Indonesia (PPI) DIY	2024–2029

L. TANDA PENGHARGAAN

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1.	L'Oreal - UNESCO National (Indonesia) Fellowship Program for Women in Science	L'Oreal Foundation	2011
2.	Satyalancana Karya Satya X Tahun	Presiden RI	2014

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
3.	Alexander von Humboldt Research Fellowship for Experienced Researcher	Alexander von Humboldt Foundation (Germany)	2016
4.	APEC - Australia Women in Research Fellowship	Australian APEC Study Center	2022
5.	Peneliti berkinerja tinggi	Organisasi Riset Nanoteknologi dan Material	2024
6.	Fulbright Visiting Scholarship	Fulbright Indonesia & IIE	2024
7.	Satyalancana Karya Satya XX Tahun	Presiden RI	2024

Penguasaan teknologi modifikasi permukaan biomaterial merupakan elemen strategis dalam mendukung transformasi sistem kesehatan nasional menuju visi Indonesia Emas 2045. Inovasi dalam bidang ini melibatkan pendekatan multidisipliner yang mencakup ilmu fisika, kimia, dan biologi molekuler, serta pengembangan permukaan biomaterial dari sifat biopasif menuju sistem bioaktif hingga responsif dan otonom. Selama dua dekade terakhir, berbagai kontribusi ilmiah telah dihasilkan bersama tim kolaboratif, baik di dalam maupun luar negeri, seperti pengembangan lapisan polimer di permukaan sebagai platform biopasif yang stabil, sistem bioaktif dual-fungsi untuk menekan infeksi dan mendukung regenerasi jaringan, hingga lapisan responsif yang mampu merespons stimuli. Berbagai teknologi berbasis kimia, fisika, dan kombinasi keduanya telah digunakan, seperti teknologi pencangkakan dan plasma. Dengan menjadikan permukaan biomaterial sebagai tempat interaksi utama dengan lingkungan biologis, strategi modifikasi ini membuka peluang besar untuk memperkuat kemandirian teknologi alat kesehatan nasional, menurunkan biaya kesehatan, dan meningkatkan kualitas hidup pasien secara berkelanjutan. Melalui penguatan ekosistem inovasi, hasil riset ini siap menjadi fondasi untuk kebijakan dan pengembangan industri biomaterial Indonesia yang tangguh, adaptif, dan berbasis sains.

