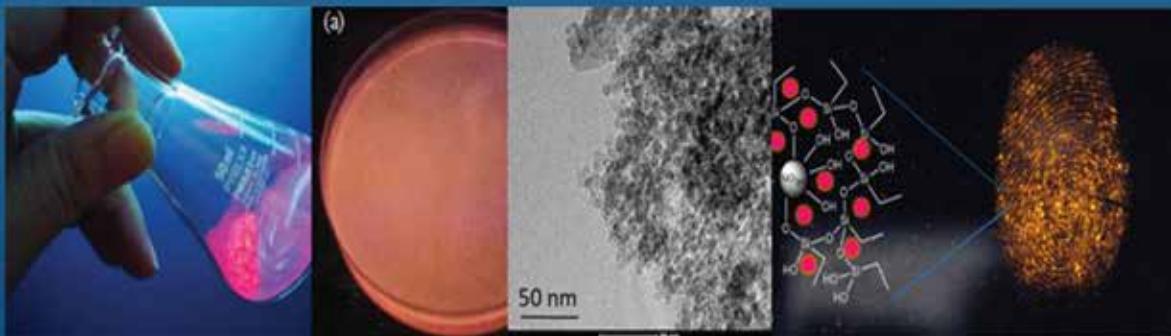


ORASI ILMIAH: RISET DAN INOVASI

NANOTEKNOLOGI DAN MODIFIKASI KIMIA SILIKA SEBAGAI SOLUSI UNTUK MATERIAL BIOSENSOR YANG BERKELANJUTAN

ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
ILMU KIMIA
BIDANG KIMIA FISIKA
KEPAKARAN NANOTEKNOLOGI DAN KIMIA MATERIAL



OLEH:
SITI NURUL AISYIYAH JENIE

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

**NANOTEKNOLOGI DAN MODIFIKASI KIMIA
SILIKA SEBAGAI SOLUSI UNTUK MATERIAL
BIOSENSOR YANG BERKELANJUTAN**

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/>



NANOTEKNOLOGI DAN MODIFIKASI KIMIA SILIKA SEBAGAI SOLUSI UNTUK MATERIAL BIOSENSOR YANG BERKELANJUTAN

**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
ILMU KIMIA
BIDANG KIMIA FISIKA
KEPAKARAN NANOTEKNOLOGI DAN KIMIA
MATERIAL**

**OLEH:
SITI NURUL AISYIYAH JENIE**

Penerbit BRIN

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

Katalog dalam Terbitan (KDT)
Nanoteknologi Dan Modifikasi Kimia Silika Sebagai Solusi Untuk Material Biosensor Yang
Berkelanjutan/Siti Nurul Aisyiyah Jenie–Jakarta: Penerbit BRIN, 2025.

viii + 108 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISSN 3090-3485

1. Nanoteknologi 2. Silika
3. Biosensor

620.5

Copy editor : Utami Dwi Astuti
Proofreader : Martinus Helmiawan
Penata Isi : Utami Dwi Astuti
Desainer Sampul : Utami Dwi Astuti

Edisi pertama : 2025



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Reposisori, 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

BIODATA RINGKAS	1
PRAKATA PENGUKUHAN	5
I. PENDAHULUAN.....	7
A. Nanoteknologi dan nanomaterial	7
B. Pentingnya riset nanomaterial untuk biosensor	9
II. PERKEMBANGAN NANOMATERIAL UNTUK BIOSENSOR	19
A. Pengertian dan latar belakang nanomaterial biosensor	19
B. Sejarah & <i>trend</i> penggunaan nanomaterial dalam biosensor	25
C. Kontribusi terkini dalam pengembangan nanomaterial untuk biosensor.....	27
III. NANOSILIKA: FABRIKASI DAN MODIFIKASI KIMIA	31
A. Nanomaterial berbasis silika	31
B. Modifikasi kimia permukaan dari silika nanopartikel	36
C. Keunggulan nanomaterial berbasis silika sebagai biosensor.....	38
D. Nanomaterial silika dari silika geothermal	42
E. Fungsionalisasi dan modifikasi nanomaterial berbasis silika geothermal untuk deteksi	46
IV. PELUANG NANOMATERIAL SILIKA GEOTHERMAL DALAM APLIKASINYA SEBAGAI MATERIAL MAJU YANG BERKELANJUTAN	51
V. KESIMPULAN.....	55
VI. PENUTUP.....	57
VII. UCAPAN TERIMA KASIH	59
DAFTAR PUSTAKA.....	65
DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH.....	75
DAFTAR PATEN	87
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	91

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Proyeksi Pertumbuhan Pasar Global Biosensor dari 2023 hingga 2033.	10
Gambar 2.	Kriteria ASSURED untuk Sebuah Biosensor Sesuai dengan Ketentuan WHO.	20
Gambar 3.	Peta Visualisasi Jaringan Penelitian Terkait Nanopartikel Silika, Modifikasi dan Aplikasinya dari Tahun 2019–2024, Analisis Bibliometric Menggunakan Vosviewer.	29
Gambar 4.	Skematik Deteksi Bakteri MRSA Menggunakan Nanopartikel Berfluoresensi Berbasis Silika Geothermal yang Telah Dimodifikasi (Sifana, Jenie, dkk. 2024).	48

BIODATA RINGKAS



Siti Nurul Aisyiyah Jenie dilahirkan di Solo, Jawa Tengah pada tanggal 16 Desember 1978 adalah anak pertama dari Bapak Prof. Umar Anggara Jenie, M.Sc., Ph.D (alm) dan Ibu Titiek Setyanti Jenie. Menikah dengan Adi Triyoga, S.E., M.T dan dikaruniai dua putri, Azzahra Bilqish Aditriyoga dan Azmina Salmaa Aditriyoga.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 2/M Tahun 2023 diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama terhitung mulai tanggal 9 Januari 2023.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional Nomor 143/I/HK/2025 tanggal 10 Juni 2025 yang bersangkutan melakukan orasi pengukuhan Profesor Riset.

Menempuh jenjang pendidikan Sekolah Dasar di Forrest Primary School (Australia) dan SD Negeri Percobaan 2 (Yogyakarta) lulus tahun 1990. Kemudian melanjutkan ke Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 5 (Yogyakarta) lulus tahun 1993 dan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 8 (Yogyakarta) lulus tahun 1996. Pendidikan Sarjana diperoleh dari Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada lulus tahun 2001, berlanjut Pascasarjana S2 Double Masters Degree bidang Teknik Kimia/Chemical Technology dari Institut Teknologi Bandung dan Rijksuniversiteit Groningen (Belanda) lulus tahun 2004. Pendidikan Pascasarjana S3 (Ph.D) bidang Materials &

Minerals Sciences diperoleh dari University of South Australia (Australia) pada tahun 2016.

Telah mengikuti berbagai pelatihan terkait kompetensi baik di tingkat nasional maupun internasional. Selanjutnya, telah dipercaya menjadi pembicara tamu (*invited speaker*) di berbagai forum ilmiah nasional maupun internasional seperti di International Virtual Course oleh Fakultas Teknologi Industri – ITB (2021), Poly-Char [Halle|Siegen] Conference oleh Siegen University, Jerman (2022) dan NanoTalk oleh Ikatan Ilmuwan Indonesia Internasional (2022). Juga telah dipercaya untuk menjadi pemakalah kunci (*keynote speaker*) di NanoBio Summerschool yang diselenggarakan oleh Siegen University, Jerman (2022), di The 8th International Symposium on Applied Chemistry (ISAC) oleh PR Kimia Maju, BRIN (2022) dan di The International Conference on Sensors Technology oleh Fakultas Teknologi Industri, ITB (2023 dan 2024).

Sejak tahun 2008 bekerja sebagai peneliti di Pusat Penelitian Kimia, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) yang sekarang menjadi Pusat Riset Kimia, Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN). Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Peneliti Ahli Muda golongan III/d tahun 2016, Peneliti Ahli Madya golongan IV/a tahun 2019 dan memperoleh jabatan Peneliti Ahli Utama golongan IV/d bidang Kimia Fisika tahun 2023.

Menghasilkan karya publikasi ilmiah internasional telah disitasi oleh lebih dari 200 dokumen dan h-index Scopus 12. Telah menghasilkan 66 karya tulis ilmiah (KTI) baik yang ditulis sendiri maupun bersama penulis lain dalam bentuk buku, jurnal dan prosiding baik nasional maupun internasional. Sebanyak 65

KTI ditulis dalam bahasa Inggris dan 1 lainnya dalam bahasa Indonesia. Serta menghasilkan sebanyak 21 Paten.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing jabatan fungsional peneliti di LIPI/BRIN, pembimbing skripsi (S-1), pembimbing tesis (S-2), pembimbing disertasi (S-3) serta penguji disertasi (S-3) di beberapa universitas dalam negeri seperti Universitas Gadjah Mada, Institut Teknologi Bandung, Universitas Indonesia, UIN Syarif Hidayatullah, Universitas Riau dan Universitas Surya.

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah sebagai pengurus di *Indonesian Society for Cancer Chemoprevention* (ISCC) dan anggota organisasi Perhimpunan Periset Indonesia (PPI), Organization for Women in Science for the Developing World (OWSD) – Indonesia National Chapter.

Memperoleh berbagai penghargaan dari dalam dan luar instansi, meliputi AusAID Australia Award untuk beasiswa doktoral tahun 2011-2015, L'Oréal-UNESCO for Women in Science Fellowship Award tahun 2017, Penghargaan untuk Publikasi terindex Thomson Reuters dari Pusat Penelitian Kimia LIPI tahun 2018, Penghargaan Peneliti Terbaik ke-3 dari Pusat Penelitian Kimia LIPI tahun 2018, Penerima Satyalancana Karya Satya X dari Presiden Republik Indonesia tahun 2018 dan Penerima Penghargaan “ASN Inspiratif Kedeputian Ilmu Pengetahuan Teknik LIPI 2021” dari LIPI tahun 2021.

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillaahirrahmaanirrahiim.

Assalaamu'alaikum warahmatullaahi wabarakaaatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua.

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

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

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya pada hari ini menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

“NANOTEKNOLOGI DAN MODIFIKASI KIMIA SILIKA SEBAGAI SOLUSI UNTUK MATERIAL BIOSENSOR YANG BERKELANJUTAN”

Pada orasi ini, akan disampaikan *state of the art* tentang inovasi dan modifikasi kimia nanosilika, terutama yang dikembangkan dari silika geothermal, sebagai alternatif solusi untuk pengembangan biosensor menggunakan material yang berkelanjutan (*sustainable materials*). Inovasi yang dihasilkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik tentang pemanfaatan dan pemberian nilai tambah silika dari mineral alam, terutama yang berasal dari Indonesia, sebagai nanomaterial yang berkelanjutan untuk diaplikasikan sebagai

platform deteksi. Dalam orasi pula akan disampaikan beberapa potensi aplikasi lain dari nanosilika di luar sebagai biosensor, beserta tantangan yang dihadapi.

Orasi riset ini akan saya sampaikan dalam tiga bagian utama. Bagian pertama adalah mengenai nanoteknologi dan nanomaterial serta peran pentingnya dalam pengembangan material biosensor. Pada bagian kedua atau inti dari orasi ini, akan saya sampaikan mengenai keunggulan silika atau nanosilika sebagai material maju dalam pengembangan biosensor. Nanosilika, baik yang berbasis prekursor komersial maupun dari mineral alam, salah satunya adalah bersumber dari silika geothermal. Pada bagian ketiga, saya akan menyampaikan potensi dan tantangan modifikasi silika geothermal menjadi nanomaterial berkelanjutan (*sustainable nanomaterials*) dalam aplikasi biosensor dan juga aplikasi lainnya. Sebagai penutup, diharapkan inovasi dan modifikasi kimia yang disampaikan dapat memberikan peluang untuk mengintegrasikan pengetahuan dan keahlian dari berbagai bidang dan memungkinkan pengembangan nanomaterial biosensor yang sustainable, lebih holistik dan efektif. Dukungan yang komprehensif dan menyeluruh dari BRIN terutama, serta para akademisi dan industri serta kebijakan dan regulasi pemerintah memainkan peranan yang sangat penting.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan nanoteknologi dalam dua dekade terakhir telah merevolusi berbagai bidang ilmu pengetahuan, termasuk bidang kesehatan, lingkungan, dan energi. Seiring dengan itu, nanomaterial material yang memiliki salah satu dimensinya pada skala nano telah menjadi komponen penting dalam berbagai aplikasi strategis. Keunikan nanomaterial terletak pada rasio luas permukaan terhadap volume yang sangat tinggi, kemampuan untuk dimodifikasi secara presisi di tingkat molekuler, serta munculnya efek kuantum yang meningkatkan performa material dalam berbagai sistem. Dalam konteks ini, nanoteknologi bukan hanya sekadar sebuah cabang ilmu pengetahuan rekayasa, tetapi juga pendekatan multidisiplin yang menjanjikan solusi inovatif dan berkelanjutan terhadap tantangan global, termasuk di bidang deteksi biomolekul dan sistem diagnostik berbasis biosensor.

A. Nanoteknologi dan nanomaterial

Konsep dasar nanoteknologi muncul pada tahun 1959 melalui kuliah yang diberikan oleh fisikawan Richard P. Feynman berjudul “There’s Plenty of Room at the Bottom”. Feynman membayangkan kemampuan untuk memanipulasi materi pada skala atom dan molekul (Devreese, 2007). Pada tahun 1985, ilmuwan Rick Smalley dan Robert Curl bersama dengan Harold Kroto menemukan struktur karbon penuh dalam ukuran nanometer yang disebut “buckyball” (C_{60}) dan *nanotube* karbon. Penemuan ini menjadi salah satu tonggak utama dalam

nanoteknologi dan membuka pintu bagi penelitian selanjutnya di bidang nanomaterial (Rafique, dkk. 2020).

Penelitian intensif mengenai nanomaterial, seperti nanopartikel oksida logam, *nanotube*, *nanowire*, dan *quantum dot*, serta nanomaterial termodifikasi, telah mengarah pada pemahaman yang lebih komprehensif mengenai sifat dan aplikasi material pada skala nanometer termasuk pengembangan material baru dengan sifat yang unik dan beragam (Haerudin, dkk. 2014). Sebagai contoh, nanoteknologi telah membawa perubahan besar dalam industri elektronik. Kemampuan untuk membuat transistor dan komponen semikonduktor yang semakin kecil telah membawa revolusi dalam inovasi perangkat elektronik. Teknologi nano telah mampu mengubah suatu komputer yang awalnya berukuran seluas ruangan dengan dimensi $12 \times 6 \times 3$ m, kemudian berkembang menjadi *Personal Computer* (PC), dan saat ini telah menjadi apa yang dikenal dengan komputer *laptop* atau komputer *notebook* dengan ukuran yang lebih kecil dan tipis seukuran 30×20 cm dengan ketebalan tidak kurang dari 2 cm dan bersifat *portable*.

Nanoteknologi juga telah digunakan untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja sel surya, baterai, dan penyimpanan energi (*energy storage systems*) yang memiliki implikasi besar dalam peralihan ke sumber energi yang lebih berkelanjutan. Terkait hal ini, berbagai material maju berbasis nano telah banyak dikembangkan, seperti bahan komposit yang lebih kuat dan lebih ringan, cat cerdas, pelapis antibakteri, penyimpan energi, sel surya, sensor gas, serta katalis heterogen (Jenie, dkk. 2017; Jenie, dkk. 2020).

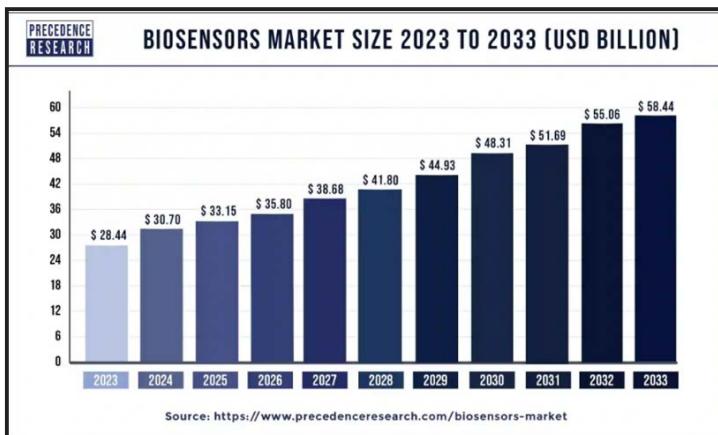
Pada bidang kesehatan, ukuran partikel yang didesain pada skala nano memberikan sifat-sifat yang berbeda dibanding material asalnya, seperti bersifat bio-kompatibel dengan

ukuran yang terkontrol sehingga mampu mengembangkan sistem penghantaran obat (*drug delivery system*) secara lebih efisien, terarah dan tepat sasaran. Dengan menggunakan ukuran partikel berskala nano, memungkinkan adanya produk teknologi nanomedisinal dimana bahan obat dapat masuk ke dalam sel dan menembus penghalang fisiologis. Ukuran yang kecil dan tepat sasaran juga memungkinkan pengurangan dosis obat dengan sangat efisien yang berakibat pada rendahnya efek samping dari obat-obatan tersebut. Senyawa bioaktif berukuran puluhan nanometer yang jauh lebih kecil dari diameter pembuluh darah kapiler (5–10 mikron), memungkinkan nanomaterial bioaktif ini diinjeksikan ke dalam pembuluh darah, yang selanjutnya dapat membersihkan lapisan-lapisan yang terdeposisi pada pembuluh darah. Perkembangan terkini, perangkat medis berukuran nano serta pengembangan sensor yang lebih sensitif dan spesifik untuk pengawasan dan deteksi dini penyakit juga telah melalui berbagai inovasi baru yang signifikan. Hal ini mendorong industri nanoteknologi untuk tumbuh secara signifikan di mana perusahaan dan lembaga atau institusi riset berfokus pada pengembangan dan aplikasi nanoteknologi dalam berbagai sektor.

B. Pentingnya riset nanomaterial untuk biosensor

Seperti terlihat pada Gambar 1, hingga tahun 2023, pasar biosensor di dunia telah mencapai USD 28.44 miliar, dan diperkirakan akan terus meningkat mencapai USD 58.44 miliar pada tahun 2033, dengan pertumbuhan per tahun atau *compound annual growth rate* (CAGR) sebesar 7.9% dari 2024 hingga 2033. Pertumbuhan yang pesat ini didominasi oleh meningkatnya kebutuhan deteksi glukosa atau diabetes dalam skala global. Kebutuhan dan permintaan akan biosensor pun

makin melonjak sejak adanya wabah pandemi COVID-19 di tahun 2020, di mana kebutuhan deteksi penyebaran virus dan pemeriksaan antibodi dalam tubuh menjadi sangat penting. Di sisi yang lain, pertumbuhan ini dibatasi oleh adanya regulasi dan kebijakan yang ketat dari berbagai negara. Di negara yang berpendapatan rendah (*low-income*) dan menengah (*middle-income*), misalnya, kebutuhan dan adaptasi teknologi biosensor yang paling mutakhir belum mendapatkan perhatian utama.



Sumber: <https://www.precedenceresearch.com/biosensors-market>

Gambar 1. Proyeksi Pertumbuhan Pasar Global Biosensor dari 2023 hingga 2033.

Dewasa ini, jenis biosensor yang mengalami pertumbuhan paling cepat di dunia adalah jenis biosensor optik dalam industri kesehatan. Biosensor ini memiliki keunggulan dibanding sistem deteksi konvensional, antara lain dalam hal kecepatan preparasi sampel dan juga dari segi sensitivitas mengenali target biomolekul yang akan dideteksi. Oleh karenanya, biosensor ini digunakan dalam aplikasi biomedis untuk deteksi dan pemantauan berbagai macam penyakit/disorder, termasuk

kadar gula darah, dan kolesterol serta pemantauan kehamilan. Biosensor optik ini juga menjadi salah satu perangkat kesehatan yang penting dalam deteksi dini kanker dan diabetes, dan yang paling relevan sekarang adalah untuk mendeteksi dan memonitor penyebaran lanjut dari virus SARS-CoV-2 dan juga pemeriksaan kadar antibodi dalam darah setelah vaksinasi.

Meskipun demikian, khusus untuk pemantauan/*screening* penyakit masih terdapat tantangan dalam mengembangkan alat yang lebih sensitif, akurat, dan efisien dalam mendeteksi penanda biologis penyakit (*biomarker*) terutama jika *biomarker* tersebut berada dalam konsentrasi yang sangat kecil di dalam tubuh. Dalam hal ini, penelitian tentang nanomaterial untuk biosensor dalam ilmu biomedis memiliki peran yang strategis dan berdampak besar. Biosensor berbasis nanomaterial merupakan perangkat deteksi yang memanfaatkan material nano untuk mendeteksi perubahan-perubahan pada tingkat molekuler, yang memungkinkan pemantauan yang sangat sensitif dan spesifik terhadap perubahan berbagai zat di dalam tubuh. Beberapa alasan mengapa riset nanomaterial untuk biosensor menjadi sangat penting dalam ilmu biomedis dapat dijabarkan sebagai berikut.

- 1) Deteksi Dini Penyakit: Dikarenakan ukurannya yang berskala nano, biosensor nanomaterial dapat mendeteksi penanda biologis atau tanda molekuler penyakit pada tahap awal, bahkan sebelum gejala-gejala klinis muncul. Hal ini memungkinkan dokter untuk membuat diagnosis yang akurat, pemberian dosis obat yang tepat serta perawatan yang lebih efektif dan penyembuhan lebih baik karena intervensi dapat dilakukan lebih dini (Dewi, dkk. 2024).
- 2) Pemantauan Real-Time: Platform deteksi berskala nano ini dapat diintegrasikan ke dalam perangkat medis atau diimplan

secara langsung ke dalam tubuh sehingga memungkinkan pengukuran yang berkelanjutan dan pemantauan secara akurat terhadap parameter biologis dalam tubuh seperti kadar gula darah, tekanan darah atau konsentrasi obat hingga tingkat antibodi dalam tubuh (Apriyani, dkk. 2023).

- 3) Spesifitas dan Sensitivitas Tinggi: Nanomaterial memiliki sifat-sifat unik yang dapat diterapkan dalam pembuatan biosensor dengan sensitivitas dan spesifitas tinggi. Ini memungkinkan deteksi molekul target dengan jumlah dan konsentrasi yang sangat kecil, yang seringkali penting dalam mendeteksi penanda biologis penyakit pada tingkat awal atau dalam sampel dengan konsentrasi yang sangat rendah (Jenie, dkk. 2014).
- 4) Pengembangan Obat Baru yang Lebih Efisien: Nano-biosensor dapat digunakan untuk mengobservasi respons tubuh terhadap obat secara mendalam, membantu dalam penyesuaian dosis obat dalam tubuh serta memastikan bahwa pengobatan dilakukan secara tepat sasaran (Licha, dkk. 2005). Hal-hal tersebut dapat menjadi dasar informasi untuk pengembangan jenis-jenis obat baru yang memiliki afinitas, selektivitas dan efikasi yang tinggi.
- 5) Pemantauan Proses Biologis: Biosensor berbasis nanomaterial dapat digunakan untuk pemantauan proses biologis di tingkat molekuler. Hal ini termasuk pemahaman lebih mendalam tentang interaksi antar sel, deteksi perubahan genetik, dan pemantauan berbagai jalur biologis, yang semuanya dapat memberikan wawasan berharga dalam pengembangan terapi dan pemahaman penyakit (Hasanah, dkk. 2023; Nurkhailiza, dkk. 2023).
- 6) Teknologi Point-of-Care: Penggunaan nanomaterial dalam biosensor juga dapat mendukung pengembangan teknologi

point-of-care, di mana diagnosis dan pemantauan dapat dilakukan secara langsung pada pasien di tempat perawatan tanpa perlu pengiriman sampel ke laboratorium eksternal. Pendekatan *point-of-care* ini mencakup *lab-on-chip*, *lateral flow assay* dan strip test elektrokimia (Das, dkk. 2021; Madhurantakam, dkk. 2022).

- 7) Pengurangan Biaya dan Waktu Preparasi: Teknologi biosensor nanomaterial juga dapat membantu dalam mengurangi biaya dan waktu diagnostik, terutama saat preparasi sampel serta dapat memberikan hasil dengan cepat dan memungkinkan pengobatan yang lebih tepat waktu (Wulandari, dkk. 2023).

Selain di bidang medis dan klinis, biosensor berbasis nanomaterial juga memiliki peran signifikan di sektor pangan dan lingkungan untuk memantau kualitas makanan dan lingkungan (Kartika, dkk. 2021). Perangkat ini dapat mendeteksi kontaminan dan patogen potensial sehingga sangat diperlukan untuk mencegah penyakit yang disebabkan oleh makanan atau air yang tercemar. Dengan berbagai manfaat yang luas ini, riset biosensor berbasis nanomaterial membuka peluang untuk inovasi yang dapat meningkatkan perawatan kesehatan, kualitas hidup, dan harapan hidup. Selain itu juga menciptakan peluang riset dan pengembangan yang luas dalam bidang ilmu biomedis, fisika, kimia, dan teknologi nanomaterial.

Di Indonesia sendiri, pemerintah telah mencanangkan Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional (RPJPN) 2025–2045, yang bertujuan untuk mewujudkan visi Indonesia Emas 2045, yaitu mewujudkan Negara Kesatuan Republik Indonesia yang Bersatu, Berdaulat, Maju, dan Berkelanjutan. Dalam hal ini RPJPN mencakup berbagai aspek pembangunan, termasuk pembangunan manusia, penguatan ekonomi, pemerataan

pembangunan, peningkatan infrastruktur, dan kelestarian lingkungan. Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2025–2029 merupakan tahap awal dari RPJPN 2025–2045, sehingga memiliki peran penting dalam pencapaian target diatas. Riset mengenai pengembangan dan inovasi nanomaterial untuk biosensor, terutama di bidang medis, memiliki posisi yang strategis karena mendukung beberapa poin RPJMN 2025–2029 sebagai berikut.

1) Mendukung Peningkatan Kesehatan Masyarakat

Riset dan pengembangan biosensor berbasis nanomaterial berkontribusi besar dalam transformasi sistem kesehatan nasional, terutama dalam peningkatan layanan kesehatan primer. Dengan kemampuan deteksi yang cepat, akurat, dan sensitif, biosensor memungkinkan diagnosis dini penyakit menular seperti TBC, HIV, maupun penyakit tidak menular seperti kanker dan diabetes. Teknologi ini sangat bermanfaat untuk diterapkan di fasilitas layanan kesehatan dasar dan di wilayah terpencil, mendukung upaya pemerintah dalam memperluas akses layanan kesehatan yang merata dan berkualitas. Ini sejalan dengan arah RPJMN 2025–2029 yang menempatkan transformasi layanan kesehatan sebagai prioritas utama.

2) Mendukung Kemandirian dan Ketahanan Industri Kesehatan Nasional

Pemanfaatan sumber daya lokal dalam pengembangan nanomaterial untuk biosensor mencerminkan langkah nyata menuju kemandirian teknologi dalam negeri. Riset ini mendukung upaya substitusi impor, khususnya dalam bidang alat diagnostik medis yang selama ini sangat tergantung pada produk luar negeri. Dengan memperkuat kemampuan produksi nasional dari hulu ke hilir, inovasi ini menjadi bagian dari strategi pemerintah dalam membangun industri farmasi dan

alat kesehatan yang tangguh dan mandiri, sesuai dengan arah kebijakan RPJMN yang menekankan pentingnya ketahanan sektor kesehatan sebagai bagian dari ketahanan nasional.

3) Mendorong Hilirisasi Riset dan Inovasi

Nanomaterial untuk biosensor merupakan contoh konkret dari riset terapan yang berpotensi tinggi untuk dihilirisasi. Proses transformasi dari laboratorium ke produk komersial menunjukkan bahwa riset ini bukan hanya menciptakan pengetahuan baru, tetapi juga membuka peluang ekonomi dan industri baru. Melalui kolaborasi lintas sektor—antara dunia akademis, industri, dan pemerintah—hasil riset dapat diterjemahkan menjadi produk inovatif yang menyentuh masyarakat luas. Ini sejalan dengan RPJMN 2025–2029 yang menekankan pentingnya penguatan ekosistem inovasi dan percepatan hilirisasi teknologi untuk mendukung pembangunan nasional berbasis ilmu pengetahuan dan teknologi.

4) Mendukung Pembangunan Ilmu Pengetahuan Teknologi Nasional

RPJMN 2025–2029 menekankan pentingnya sains dan teknologi sebagai fondasi utama dalam menghadapi tantangan masa depan. Dalam hal ini, riset nanoteknologi untuk biosensor berada pada posisi strategis sebagai bagian dari teknologi prioritas nasional. Melalui riset-riset semacam ini, Indonesia dapat membangun kapasitas teknologi secara mandiri, menciptakan solusi berbasis sains untuk masalah nyata, dan memperkuat posisi sebagai negara dengan kemampuan inovasi tinggi. Dengan dukungan kebijakan dan pembiayaan riset yang terarah, pengembangan

biosensor menjadi bagian penting dalam peta jalan kedaulatan ilmu pengetahuan dan teknologi Indonesia.

Dengan kata lain, penelitian nanomaterial biosensor tidak hanya relevan dengan beberapa prioritas dalam RPJMN 2025–2045, tetapi juga dapat menjadi pendorong penting dalam mencapai tujuan pembangunan nasional Indonesia dalam bidang kesehatan, keamanan, pangan, lingkungan, teknologi, dan industri.

Penelitian dan pengembangan tentang biosensor yang didasarkan pada inovasi nanomaterial juga mendukung pencapaian target Agenda 2030 untuk Tujuan Pembangunan Berkelaanjutan (*the 2030 Agenda for Sustainable Development Goals* atau SDGs), yaitu SDGs ke-3, 7, 8, dan 9. SDGs bertujuan untuk menjamin kehidupan yang sehat dan mendorong kesejahteraan bagi semua orang di segala usia. Dalam hal ini, penelitian biosensor terutama dengan menggunakan nanomaterial berkontribusi dalam mempromosikan kesejahteraan melalui intervensi perawatan kesehatan yang tepat waktu dengan memungkinkan deteksi yang cepat dan sensitif. Inovasi perangkat portabel untuk diagnostik *point-of-care* yang mengintegrasikan nanobiosensor juga memungkinkan perawatan kesehatan yang dapat diakses oleh semua orang. Selanjutnya, tujuan poin SDGs nomor 7 tentang energi bersih dan terjangkau. Biosensor juga mampu menyediakan data *real time* tentang pembangkitan, penyimpanan, dan pemanfaatan energi misalnya sebagai pendekripsi polutan dari pembakaran bahan bakar fosil untuk memantau emisi dari pembangkit listrik.

Di sisi lain, penelitian mengenai biosensor secara langsung mendukung poin SDGs nomor 8 dengan meningkatkan produktivitas, memastikan kualitas, menciptakan lapangan kerja, dan mendorong pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan. Sebagai contoh, biosensor dapat dijadikan perangkat untuk

kontrol kualitas dalam produksi pangan melalui pemantauan kontaminan, dan keberadaan patogen. Penelitian, pengembangan, dan komersialisasi biosensor menciptakan peluang kerja dan memungkinkan pemanfaatan sumber daya yang efisien untuk memastikan pertumbuhan ekonomi. Pada akhirnya, tujuan SDGs nomor 9 untuk mendorong inovasi di industri dapat diwujudkan dengan memajukan penelitian biosensor berbasis nanoteknologi. Penelitian biosensor juga pada akhirnya dapat menjamin adanya infrastruktur yang tangguh.

Urgensi nanosilika sebagai material biosensor menjadi relevan ketika dikaitkan dengan tren global dan kebutuhan akan pengembangan biosensor yang berkelanjutan (*sustainable*). Meskipun regulasi pemerintah dan komitmen terhadap Sustainable Development Goals (SDGs) menjadi landasan penting, hal tersebut belum cukup untuk mendorong kemajuan teknologi secara signifikan tanpa didukung riset dan inovasi yang intensif. Dalam dua dekade terakhir, riset mengenai nanomaterial sebagai platform biosensor menunjukkan peningkatan tajam, termasuk nanosilika yang memiliki keunggulan dan keunikan dalam sifat fisiokimiawinya. Selain itu, nanosilika bersifat biokompatibel, tidak beracun, dan stabil secara kimia maupun termal, menjadikannya cocok untuk aplikasi biomedis. Kemampuan nanosilika untuk dimodifikasi secara kimia juga memungkinkan penyesuaian permukaannya agar sesuai dengan target deteksi tertentu. Dengan karakteristik ini, nanosilika mampu meningkatkan performa biosensor dalam hal deteksi biomolekul pada konsentrasi yang sangat rendah, mempercepat respons sensor, serta meningkatkan akurasi dan ketahanan sensor dalam berbagai kondisi lingkungan.

Untuk mendorong pemanfaatan nanosilika secara optimal dalam teknologi biosensor perlu adanya sinergi antara lembaga

riset, akademisi, dan industri. Beberapa negara maju telah memulai langkah ini dengan membentuk ekosistem inovasi yang mendukung pengembangan nanoteknologi yang berkelanjutan. Sayangnya, di Indonesia, kolaborasi semacam ini masih terbatas. Padahal, dengan potensi silika yang besar, kolaborasi lintas sektor sangat diperlukan untuk mendorong pemanfaatan material ini dalam menciptakan biosensor yang efektif, ramah lingkungan, dan sesuai dengan kebutuhan pasar serta regulasi nasional dan global. Oleh karenanya, orasi ini ditujukan untuk memberikan solusi nyata terhadap permasalahan nasional, dengan menekankan pada pemenuhan kebutuhan riset dan inovasi nanomaterial yang berkelanjutan serta aplikasinya sebagai biosensor unggulan di bidang kesehatan, keamanan pangan, dan pelestarian lingkungan hidup.

II. PERKEMBANGAN NANOMATERIAL UNTUK BIOSENSOR

Integrasi pendekatan nanoteknologi ke dalam biosensor sangat menjanjikan untuk meningkatkan performa analitik dari sistem diagnostik. Partikel nano mampu meningkatkan rasio signal-to-noise, mempercepat waktu respons, dan selanjutnya dapat diaplikasikan dalam sistem multipleks. Material yang berukuran nano memiliki kelebihan diantaranya rasio luas permukaan per satuan volume yang tinggi dan ukuran yang tunable (atau dapat diatur sesuai aplikasi), sehingga pada akhirnya dapat menghasilkan material yang efektif dan optimal untuk biosensor yang memiliki sensitivitas dan spesifikasi yang tinggi, mudah dan murah untuk difabrikasi, serta memiliki stabilitas yang tinggi (Shandilya, dkk. 2019).

A. Pengertian dan latar belakang nanomaterial biosensor

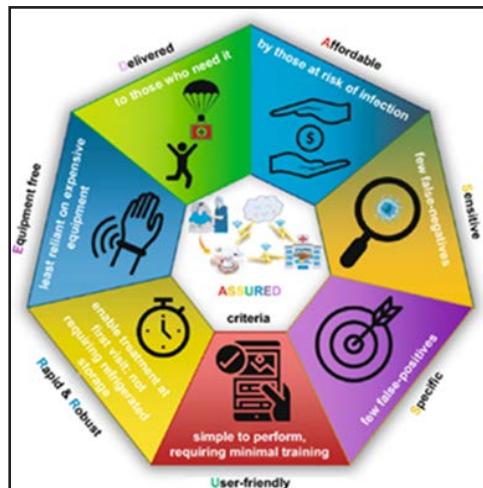
Secara resmi, *International Union of Pure and Applied Chemistry*, (IUPAC) 1999, telah mendefinisikan biosensor sebagai berikut (Jenie, dkk. 2016),

“Biosensor adalah sebuah alat atau perangkat, yang mampu memberikan informasi analitik secara kuantitatif maupun semi kuantitatif melalui sinyal elektrik, termal, maupun optik melalui reaksi biokimia yang selektif menggunakan enzim, sistem imun (seperti antigen dan antibodi), jaringan, organ, ataupun sel secara utuh untuk mendeteksi adanya senyawa kimia.”

Biosensor mampu mendeteksi berbagai biomolekul pada sebuah sampel dengan mengubah sinyal fisik atau kimia suatu sampel menjadi sinyal optik, elektrokimia, termometrik,

piezoelektrik, ataupun magnetik. Untuk itu, perangkat ini diharapkan mampu mendeteksi secara akurat dan cepat, serta memenuhi semua kriteria ASSURED yang telah ditentukan oleh WHO, yang merupakan singkatan dari *Affordable, Sensitive, Specific, User-friendly, Rapid and Robust, Equipment-free, and Deliverable to end-users* (Das, dkk. 2021; Madhurantakam, dkk. 2022), seperti yang terlihat di Gambar 2.

Secara umum, kriteria ASSURED mencakup tiga karakteristik utama, yaitu akurasi, aksesibilitas, dan keterjangkauan. Karena tidak ada pengujian atau sistem deteksi yang ideal, maka *trade-off* antara akurasi, aksesibilitas, dan keterjangkauan perlu dipertimbangkan sehingga diperoleh biosensor yang optimal sesuai kebutuhan.



Sumber: Das, dkk. 2021

Gambar 2. Kriteria ASSURED untuk Sebuah Biosensor Sesuai dengan Ketentuan WHO.

Berikut merupakan penjelasan lengkap faktor – faktor dalam ASSURED:

Affordable (Terjangkau) – Dalam hal ini, alat diagnostik harus terjangkau secara ekonomis dan sesuai dengan anggaran kesehatan di berbagai tingkat pelayanan kesehatan, terutama dalam lingkungan dengan sumber daya yang terbatas. Selain itu, biaya pengadaan, pengoperasian, dan perawatan alat seharusnya seekonomis mungkin dan menyesuaikan dengan pendapatan daerah dimana alat diagnostik itu dituju.

Sensitive (Sensitif) – Di mana perangkat diagnostik harus dapat mendeteksi target atau penyakit dengan tingkat sensitivitas yang tinggi. Kemampuan untuk mendeteksi sampel analit dalam konsentrasi yang serendah-rendahnya, yang dikuantitatifkan sebagai *Limit-of-Detection (LoD)* atau limit deteksi, menjadi salah satu karakteristik yang sangat penting untuk sebuah biosensor.

Specific (Spesifik) – Perangkat diagnostik harus spesifik dalam mengidentifikasi target atau penyakit tertentu dalam sampel tanpa ada gangguan dari pengotor. Spesifisitas ini ditunjukkan dengan menghindari adanya nilai *false positive* (positif palsu) atau *false negative* (negative palsu) yang dapat menyebabkan diagnosis yang salah.

User-friendly (Mudah Digunakan) – Perangkat diagnostik harus dapat digunakan dengan mudah oleh petugas kesehatan ataupun masyarakat awam tanpa adanya pelatihan khusus. Hal ini ditandai dengan adanya instruksi penggunaan alat yang jelas dan mudah dipahami.

Rapid and Robust (Cepat dan Tangguh) – Perangkat diagnostik dapat dikategorikan cepat jika hasil uji dapat terbaca dalam 15–60 menit setelah alat kontak dengan sampel. Sebuah

biosensor dikatakan tangguh jika memiliki kemampuan untuk tahan terhadap kondisi lingkungan yang beragam seperti suhu, kelembaban, penundaan waktu, dan tekanan mekanis tanpa memerlukan kondisi penyimpanan tambahan.

Equipment-free (Bebas Perlengkapan) – Idealnya sebuah perangkat diagnostik tidak memerlukan peralatan atau perlengkapan khusus, mahal ataupun rumit yang tidak dapat dijangkau oleh penggunanya. Pengoperasian alat juga sebaiknya tidak bergantung pada peralatan listrik, terutama untuk pemakaian di daerah-daerah terpencil.

Deliverable to end-users (Dapat Dikirim ke Pengguna) – Proses pemilihan, pengadaan, pengiriman, penyimpanan, pendistribusian, dan pengiriman alat dan reagen harus dipastikan terjangkau oleh para pengguna, terutama di daerah yang memiliki tingkat pelayanan kesehatan yang minim atau rendah. Selain itu, logistik pengiriman juga harus dengan mudah untuk diimplementasikan.

Biosensor berbasis nanomaterial dapat diklasifikasikan menjadi dua, yang pertama, berdasarkan mekanisme sinyal transduser yang mengubah pengenalan target menjadi sinyal yang dapat dideteksi secara fisik dan yang kedua, berdasarkan elemen pengenal biologisnya (*biorecognition element*) seperti enzim, aptamer, DNA, antibodi (Mayer, dkk. 2019). Dalam klasifikasi pertama berdasarkan sinyal transdusernya, biosensor dapat disubklasifikasikan lagi berdasar interaksi target molekul dengan pengenal biologis yang selanjutnya menghasilkan jenis sinyal yang berbeda. Subklasifikasi ini meliputi biosensor elektromia, di mana sinyal yang dihasilkan berdasar reaksi elektrokimia yang terjadi (Dewi, dkk. 2024; Hanifah, dkk. 2024); biosensor optik, dimana sinyal yang dihasilkan dari absorpsi atau perpendaran (*luminescence*) cahaya, spektroskopi

ataupun refraksi; biosensor *mass-sensitive*, di mana sinyal yang dihasilkan bergantung pada perubahan massa saat mendeteksi target molekul menggunakan kantilever berdimensi mikro atau nano; dan yang terakhir adalah biosensor kalorimetri dimana sinyal dihasilkan karena ada perubahan panas saat interaksi biologis dengan target molekul terjadi.

Klasifikasi kedua untuk sebuah biosensor adalah berdasar unsur pengenal biologisnya, dimana selanjutnya dapat disubklasifikasikan lagi menjadi biosensor enzimatik (sebagai contoh strip test kehamilan), imunosensor dengan unsur pengenal biologis berupa antibodi, biosensor berbasis DNA/RNA, dan biosensor sel utuh yang mengenali target berupa sel secara keseluruhan (Shandilya, dkk. 2019). Perkembangan terkini, terlebih setelah adanya wabah pandemi COVID-19, subklasifikasi ini bertambah dengan adanya biosensor antigen dan biosensor *small proteins* (protein sederhana).

Komponen pengenalan target biasanya menggunakan molekul biologi yang dikonjugasikan pada permukaan nanopartikel. Terdapat beberapa pendekatan dan strategi untuk konjugasi biomolekul ini melalui reaksi kimia permukaan (*surface chemistry*) dimana distribusi, konformasi dan susunan biomolekul ini dapat dikontrol di permukaan luar dari nanomaterial. Reaksi kimia permukaan yang dapat menghasilkan *interface* nanomaterial dan biomolekul dapat dibagi menjadi dua, yang pertama yaitu fungsionalisasi permukaan melalui ikatan kovalen dengan molekul *crosslinker* (pengikat silang). Penggunaan *linker* (pengikat) menghasilkan jarak antara biomolekul dan permukaan nanopartikel, sehingga menghindari terjadinya denaturasi biomolekul atau interaksi biomolekul-nanomaterial yang tidak diinginkan (Jenie, dkk. 2016). Yang kedua, yaitu immobilisasi biomolekul melalui ikatan non-

kovalen dengan memanfaatkan sifat hidrofilik atau hidrofobik dari permukaan nanomaterial (Shandilya, dkk. 2019).

Beberapa contoh untuk reaksi kimia permukaan yang umum diaplikasikan untuk immobilisasi biomolekul pada nanomaterial antara lain melalui reaksi kimia berbasis thiol (*thiol chemistry*), dimana dalam reaksi ini terjadi interaksi kuat antara senyawa thiol dan permukaan nanomaterial logam mulia, seperti partikel nano emas, sehingga terbentuk *self-assembled monolayers* (Yüce, dkk. 2017). Monolayer ini kemudian dapat bereaksi dengan berbagai macam senyawa yang memiliki gugus fungsi alkil (seperti asam karboksilat) yang mengakibatkan permukaan nanomaterial menjadi hidrofilik. Contoh senyawa yang digunakan dalam *thiol chemistry* ini antara lain 11-mercaptoundecanoic acid, 1,6-hexanedithiol dan 4-aminothiophenol. Reaksi kimia permukaan yang lain adalah melalui konjugasi avidin-biotin, di mana konjugasi ini termasuk yang paling banyak digunakan dalam bioteknologi serta memiliki ikatan non-kovalen yang paling kuat (Jenie, dkk. 2014). Avidin biasanya tersedia dalam dua bentuk yaitu streptavidin dan neutravidin, di mana keduanya dapat berkonjugasi dengan molekul biotin. Biomolekul avidin dapat dimodifikasi ke permukaan nanomaterial melalui interaksi elektrostatis, ikatan van der Walls, ikatan hidrogen maupun interaksi tumpukan π - π (π - π stacking interactions). Reaksi π -effect terjadi karena adanya interaksi yang kuat antara electron π dari dua molekul aromatik yang berada pada jarak yang sangat dekat (*close proximity*). Interaksi tumpukan π - π umumnya terdapat pada berbagai proses biologi seperti tumpukan nucleobase, ikatan enzyme-ligan, ikatan protein-DNA atau RNA dan ikatan struktur aromatik pada permukaan nanopartikel. Partikel nano yang paling banyak menggunakan interaksi tumpukan π - π dalam modifikasi permukaannya adalah nanomaterial yang berbasis karbon, sehingga pada akhirnya

diperoleh sistem biosensor nano yang murah dan tangguh (Shandilya, dkk. 2019; Yüce, dkk. 2017).

Berbagai pendekatan kimia permukaan tersebut menunjukkan betapa pentingnya desain dan pemilihan strategi modifikasi permukaan dalam mendukung performa biosensor berbasis nanomaterial. Untuk memahami sejauh mana teknologi ini berkembang dan mengapa nanomaterial menjadi pusat perhatian dalam pengembangan biosensor modern, penting untuk meninjau kembali sejarah dan tren penggunaannya dalam bidang ini.

B. Sejarah & *trend* penggunaan nanomaterial dalam biosensor

Awal pengembangan biosensor dimulai pada tahun 1960-an dengan penemuan elektroda enzim yang memungkinkan deteksi glukosa dalam darah. Penemuan ini menjadi salah satu jenis biosensor pertama yang digunakan secara luas dalam aplikasi biomedis (Luong, dkk. 2008; Reshetilov, dkk. 2008). Sejak saat itu, biosensor telah menjadi alat penting dalam analisis biokimia dan kedokteran. Pengembangan biosensor dalam bidang biomedis ini diaplikasikan untuk mendeteksi penyakit (misalnya kanker) atau manajemen/perawatan penyakit (misalnya diabetes) menggunakan penanda biologis spesifik tertentu seperti asam lemak dan glukosa hingga makromolekul seperti enzim dan asam nukleat (Airyn, dkk. 2024; Jenie, dkk. 2016). Tantangan saat ini adalah penanda biologis umumnya berada pada konsentrasi yang sangat kecil dalam tubuh. Sebagai contoh, *prostate-specific antigen* (PSA), sebuah penanda biologis untuk kanker prostat, memiliki konsentrasi normal dalam serum darah hanya sebesar 23 pM (0,6 ng/mL). Oleh karenanya, untuk dapat mendeteksi adanya kenaikan biomarker konsentrasi rendah ini, terutama

pada stadium awal terbentuknya penyakit, diperlukan biosensor dengan sensitivitas dan selektivitas yang tinggi (Reshetilov, dkk. 2008).

Metode konvensional untuk mendiagnosis suatu penyakit, sebagai contoh kanker, meliputi *X-Ray*, tomography, *magnetic resonance imaging* – MRI, *ultrasound*, dan pencitraan optik (*optical imaging*). Akan tetapi, metode diagnosis ini memiliki keterbatasan dan kelemahan seperti ketidakmampuan untuk mendeteksi pada stadium awal terbentuknya penyakit, ketidakmampuan untuk membedakan antara tumor biasa dan yang ganas, adanya positif palsu (*false positive*), ketidakmampuan mendeteksi tumor saat memasuki fase metastase, dosis tinggi radiasi pada tubuh, resolusi spasial yang terbatas untuk pencitraan gambar, dan adanya komplikasi dari hasil analisis yang ada.

Penggunaan nanomaterial dalam biosensor pertama kali muncul pada awal tahun 2000-an, yakni nanopartikel emas dan perak yang digunakan untuk meningkatkan sensitivitas deteksi. Hal ini kemudian diikuti dengan aplikasi *nanotube* karbon, *graphene* dan *quantum dots* dalam pengembangan biosensor nanomaterial (Widyasari, dkk. 2023). Kelebihan utama penggunaan material berskala nano terletak pada luas permukaan per satuan volume yang besar, yang memfasilitasi interaksi yang kuat dengan molekul target dan meningkatkan sensitivitas deteksi. Pencapaian penting dalam sejarah penggunaan nanomaterial dalam biosensor mencakup penemuan nanopartikel logam, seperti emas dan perak, yang dapat memberikan sinyal optik atau elektronik yang dapat diukur responnya terhadap perubahan lingkungan biologis (Andreani, dkk. 2022; Hasanah, dkk. 2023).

Pada tahap selanjutnya, nanomaterial menjadi kunci dalam pengembangan biosensor untuk aplikasi medis. Penggunaannya

berkembang dalam mendeteksi penyakit pada tingkat molekuler seperti kanker yang memungkinkan diagnosis dini dan diabetes untuk pemantauan dan perawatan yang lebih efisien. Di luar aplikasi medis, penggunaan nanomaterial dalam biosensor juga meluas ke bidang pemantauan lingkungan dan keamanan pangan, di mana teknologi ini mampu mendeteksi polutan atau kontaminan dengan sensitivitas tinggi dan waktu respon yang cepat.

Peran strategis nanomaterial dalam berbagai sektor ini menunjukkan potensinya sebagai fondasi utama dalam pengembangan teknologi biosensor masa depan. Oleh karena itu, penting untuk menyoroti berbagai kontribusi dan terobosan terkini yang telah dicapai dalam pengembangan nanomaterial untuk aplikasi biosensor.

C. Kontribusi terkini dalam pengembangan nanomaterial untuk biosensor

Inovasi menggunakan nanoteknologi dan nanomaterial telah mengubah paradigma cara pengembangan dan penggunaan biosensor. Nanomaterial konduktif seperti *nanotube* karbon dan *graphene* juga digunakan sebagai elektroda untuk meningkatkan konduktivitas dan permukaan deteksi sehingga terjadi peningkatan signifikan dalam sensitifitas dan respons biosensor (Wicaksono, dkk. 2018). Nanomaterial dengan sifat optik yang unik, seperti *quantum dots*, digunakan dalam biosensor optik untuk deteksi molekul (Airyn, dkk. 2024). *Quantum dots* memungkinkan fluoresensi yang kuat dan spesifik untuk deteksi target biomolekuler. Penggunaan nanomaterial dalam biosensor telah membawa perubahan signifikan dalam aplikasi medis dan klinis, yakni digunakan dalam diagnosa penyakit, pemantauan kadar obat, dan deteksi biomolekul penting dalam cairan tubuh. Penggunaan nanomaterial dalam biosensor juga telah memungkinkan deteksi molekul biologis yang lebih cepat,

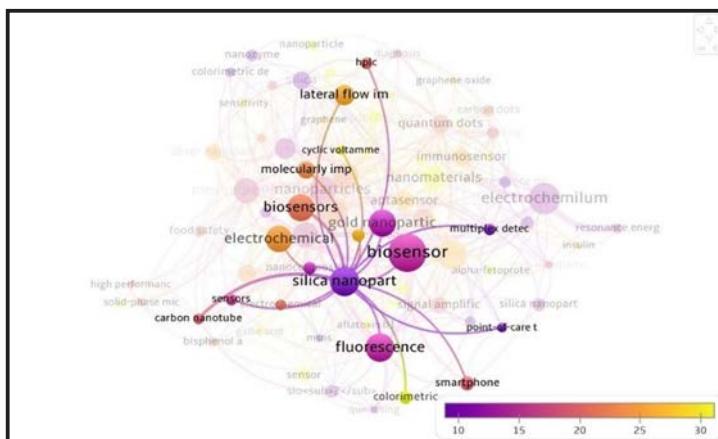
sensitif, dan spesifik. Hal ini telah mengubah cara diagnosis medis dilakukan, membantu pemantauan kesehatan yang lebih baik, dan meningkatkan kontrol kualitas dalam berbagai industri.

Saat ini, dengan berkembangnya sistem digital dan *Internet-of-Things (IoT)*, pengembangan biosensor yang dapat diintegrasikan dengan ponsel pintar juga memungkinkan pemantauan kesehatan mandiri dan cepat untuk berbagai parameter, seperti kadar glukosa dan deteksi penyakit menular (Mayer, dkk. 2019). Perkembangan biosensor berbasis nanomaterial juga digunakan dalam aplikasi pemantauan lingkungan untuk deteksi polutan, logam berat, dan kontaminan lainnya di air dan udara. Dalam bidang ketahanan dan keamanan pangan, nanomaterial biosensor juga digunakan untuk deteksi kontaminan sehingga berguna untuk pengawasan kualitas pangan dan deteksi cepat kontaminasi yang berpotensi berbahaya. Bahkan, saat ini pendekatan nanobiosensor sebagai deteksi yang cepat dan akurat digunakan dalam penentuan autentifikasi kehalalan suatu produk pangan.

Riset tentang biosensor sendiri telah meningkat tajam seiring dengan tingginya permintaan untuk sistem deteksi yang murah, cepat, dan sensitif di berbagai bidang. Dari tahun 1984 hingga 1997, jumlah publikasi ilmiah terkait biosensor mencapai 6000 dan jumlah paten mencapai 600 menurut laporan komersil oleh Fuji Keizai (Fuji-Keizai, 2004). Seiring dengan perkembangan nanoteknologi, dan selanjutnya nanobioteknologi, jumlah publikasi dan paten ini terus bertambah. Hingga awal tahun 2000-an, R&D terkait biosensor telah menghasilkan lebih dari 6000 publikasi dan 1100 paten. Aplikasi biosensor tidak lagi hanya digunakan dalam bidang biokimia dan medis, tetapi telah meluas sebagai alat untuk pemantauan di lokasi (*monitoring in-situ*) di bidang lainnya seperti teknologi pangan, lingkungan,

pertahanan keamanan serta proses kimia dan biologis (Fuji-Keizai, 2004; Luong, dkk. 2008).

Analisis bibliometrik menggunakan *software* seperti VOSviewer memberikan wawasan berharga tentang trend penelitian beserta aplikasinya (Gambar 3). Data yang diambil untuk analisis berasal dari 1318 artikel dan review yang terdata di Scopus dari tahun 2019 hingga 2024, dan menyoroti penelitian yang terkait nanopartikel silika beserta karakterisasinya dan aplikasinya untuk biosensor. Sitas dari masing-masing keyword di publikasi berada di atas 10, untuk area subyek kimia (*chemistry*), ilmu material (*material science*) dan teknik kimia (*chemical engineering*) dan terlihat bahwa penelitian tentang silika atau nanopartikel silika berkaitan erat dengan sifatnya yang fluorescence dan juga aplikasinya untuk mendeteksi (terlihat dari keyword *limit-of detection*). Dengan demikian terlihat bahwa trend penelitian ke arah sistem deteksi berbasis nanopartikel silika sangat signifikan.



Gambar 3. Peta Visualisasi Jaringan Penelitian Terkait Nanopartikel Silika, Modifikasi dan Aplikasinya dari Tahun 2019–2024, Analisis Bibliometric Menggunakan Vosviewer.

III. NANOSILIKA: FABRIKASI DAN MODIFIKASI KIMIA

Salah satu nanomaterial yang sangat menjanjikan adalah nanosilika—partikel SiO₂ berukuran kurang dari 100 nm, memiliki sifat fisik, kimia, mekanik dan optik yang unggul seperti *surface area* serta porositas tinggi, bersifat biokompatibel dan biodegradable. Struktur ini bisa dimodifikasi secara kimia dan imobilisasi biomolekul menjadikannya sangat fleksibel sebagai nanomaterial untuk biosensor.

A. Nanomaterial berbasis silika

Silika adalah senyawa yang terdiri dari silikon dan oksigen yang tersedia melimpah di kerak bumi dan telah digunakan dalam berbagai aplikasi selama berabad-abad. Penggunaan silika sebagai bahan dasar sebuah nanomaterial dapat dibagi dua antara lain dari sumber yang komersial dan dari sumber alami. Prekursor komersial antara lain dari tetraethyl orthosilicate (TEOS) atau tetramethyl orthosilicate (TMOS) untuk membuat nanopartikel silika (Douroumis, dkk., 2012), atau dapat juga dari wafer silicon untuk membuat *porous silicon thin film* yang porinya berukuran skala nano (Jane, dkk. 2009). Nanopartikel silika telah ditemukan di awal tahun 1930-an, melalui metode sol-gel yang melingkupi reaksi hidrolisis dan kondensasi dari prekursor silika. Dua dekade kemudian, material silikon berpori (*porous silicon*) mendapatkan perhatian besar dikarenakan sifat-sifat unggul dari material tersebut beserta metode fabrikasinya

yang relatif mudah dan cepat dibanding material berpori lainnya seperti alumina atau germanium berpori (Jenie, dkk. 2016).

Perkursor silika dari alam dapat berasal dari mineral yang melimpah di kerak bumi, terbentuk dari hasil pelapukan batuan yang mengandung kuarsa dan *feldspar*. Silika sering ditemukan sebagai bahan dasar dalam pembuatan kaca, keramik, beton, mortar, batu pasir dan silikon. Nanopartikel silika dapat disintesis dari berbagai sumber bahan baku yang terdapat di alam seperti pasir pantai, sekam padi, limbah panas bumi (*geothermal*), ampas tebu, dan lain-lain. Kandungan silika di ampas tebu sekitar 55,5%–70%, pada pasir laut mencapai 55,3–99,87% (Ismail, dkk. 2020), sedangkan pada pasir limbah geothermal sebesar 77,77% (Jenie, dkk. 2018).

Nanopartikel silika terdiri dari oksida logam amorf koloid yang dapat diproduksi melalui metode sol-gel dan memiliki diameter antara 50–300 nm dengan sifat fisik, kimia, optik, dan mekanik yang dapat disesuaikan. Partikel berskala nano ini telah digunakan dalam bidang kedokteran, superkapasitor, baterai, serat optik, dan bahkan material beton dikarenakan memiliki beberapa kelebihan diantaranya, luas permukaan besar, ketahanan panas yang baik, dan kekuatan mekanik yang tinggi (Douroumis, dkk. 2012). Dalam bidang biomedis, silika berperan sebagai bahan yang tidak beracun (*non-toxic*), biokompatibel, dan dapat terurai (*biodegradable*), yang dapat difungsikan menjadi berbagai macam kegunaan dalam skala nano, salah satunya sebagai *nanocarriers* dan biosensor nano (Shandilya, dkk. 2019). Nanopartikel silika adalah nanopartikel yang paling umum digunakan dalam biosensor elektrokimia maupun optik akibat fitur uniknya berupa ukuran monodispersi, struktur yang seragam, biokompatibilitas yang baik, dan kemampuan mengikat biomolekul secara kovalen pada permukaan. Silika

nanowires juga banyak digunakan untuk aplikasi diagnostik (Douroumis, dkk. 2012). Nanomaterial berbasis silika juga dapat dikompositkan dengan material lain untuk meningkatkan performanya sebagai platform biosensor, contohnya *molecular sieves* silika mesopori/alumina atau mesopori silika-oksida grafen yang terkonjugasi partikel nano emas untuk deteksi berbasis kolorimetri (Wu, dkk. 2013).

Pembuatan nanomaterial dari silika memerlukan pemahaman yang mendalam tentang disiplin ilmu kimia, fisika dan ilmu material serta teknik karakterisasi dan potensi aplikasinya. Proses fabrikasi ini dapat disesuaikan berdasarkan jenis nanomaterial silika yang diinginkan dan aplikasi spesifiknya. Pembuatan nanomaterial dari silika, terutama yang bersumber dari alam, melibatkan serangkaian langkah yang mencakup ekstraksi, pemurnian dan pengolahan silika untuk menghasilkan partikel atau struktur dalam skala nanometer. Langkah pertama yakni mengisolasi silika dari sumbernya, dimana hal ini berpengaruh terhadap jenis proses ekstraksinya. Misalnya, jika menggunakan pasir kuarsa maka perlu menggiling dan mencuci pasir untuk menghilangkan kontaminan lainnya. Silika yang diekstrak sering mengandung kontaminan seperti logam atau mineral lainnya, sehingga diperlukan langkah pemurnian sebelum diolah lebih lanjut. Proses pemurnian melibatkan penggunaan kimia, seperti pengendapan, filtrasi, atau perlakuan asam. Setelah pemurnian, silika perlu dihaluskan, salah satunya dengan proses penggilingan mekanis (*mechanical milling*), untuk menghasilkan silika dengan ukuran partikel yang lebih kecil.

Tahapselanjutnyasetelah isolasi dan pemurnian adalah sintesis nanomaterial berbasis silika menggunakan pendekatan kimiawi (*bottom-up*). Terdapat beberapa metode untuk mensintesis silika menjadi nanomaterial, seperti: metode *sol-gel* (Kajihara, 2013),

kopresipitasi (Syauqi, dkk. 2023) dan metode dengan templating surfaktan (Untoro, dkk. 2020). Metode *sol-gel* merupakan salah satu metode yang umum dan *well-proven* untuk memfabrikasi nanomaterial silika. Proses *sol-gel* melibatkan pengubahan monomer dalam larutan menjadi larutan koloid (yang disebut “sol”). Sol ini kemudian secara bertahap berkembang menjadi sistem dua fase seperti gel yang mengandung fase cair dan padat. Pendekatan metode *sol-gel* menawarkan keuntungan seperti kontrol yang baik atas komposisi kimia, bahkan dengan jumlah dopan yang kecil. Teknik ini juga hemat biaya dan dapat dilakukan pada suhu rendah yang menghasilkan beragam material. Awal mula munculnya proses kimia *sol-gel* dapat ditelusuri kembali ke pertengahan tahun 1800-an (Kajihara, 2013). Para ilmuwan mengamati bahwa ketika TEOS terkena udara, senyawa ini mulai membentuk gel. Pembentukan gel ini didorong oleh kelembaban atmosfer yang menyebabkan hidrolisis silikon alkoksida dan diikuti kondensasi. Pada tahun 1960-an, para peneliti kemudian mengembangkan proses *sol-gel* dengan tujuan khusus untuk memproduksi kaca curah (*bulk glasses*) pada suhu rendah—di bawah 1000°C. Proses ini merupakan terobosan baru dari metode peleburan lama yang biasanya memerlukan suhu tungku yang jauh lebih tinggi (lebih dari 1400°C). Teknik *sol-gel* menawarkan rute alternatif yang memungkinkan terciptanya bahan kaca tanpa memerlukan panas yang ekstrem. Kemudian, pada tahun 1968, sebuah kelompok yang dipimpin oleh Stöber—pelopor di bidang ini—mencapai tonggak sejarah yang signifikan (Kim, dkk. 2017). Mereka adalah orang pertama yang mensintesis nanopartikel silika menggunakan metode *sol-gel* melalui hidrolisis dan kondensasi TEOS dalam media etanol yang dikatalisis oleh amonia. Hingga kini, meski mengalami beberapa modifikasi, namun pada umumnya reaksi *sol-gel* terdiri dari 2 reaksi utama, yakni

reaksi hidrolisis dan kondensasi. Dalam proses *sol-gel*, silika terlarut dalam pelarut organik atau anorganik untuk membentuk *sol*. Kemudian, dengan bantuan asam, fase sol dari silika akan mengalami hidrolisis yang dilanjutkan dengan kondensasi, dan berubah menjadi fase *gel*. Dalam fase *gel* inilah nanomaterial dan struktur pori dari nanomaterial terbentuk. Struktur dan bentuk pori dapat diatur dengan menggunakan surfaktan sebagai *template*. Metode kedua, yakni kopresipitasi melibatkan pengendapan silika dari larutan menggunakan reagen kimia tertentu sehingga menghasilkan nanomaterial silika dengan berbagai bentuk dan ukuran. Dalam proses templating dengan surfaktan, silika perkursor seperti TEOS dan berbagai organo alkoksilan direaksikan dalam kondisi basa dengan surfaktan CTAB (cetyltrimethylammonium bromide) dalam konsentrasi rendah (Douroumis, dkk. 2012). Setelah nanomaterial silika terbentuk, perlu dilakukan karakterisasi, meliputi ukuran partikel, morfologi, struktur kristal, dan sifat fisik dan kimia lainnya dengan menggunakan berbagai teknik analitik seperti mikroskopi, spektroskopi, dan analisis termal.

Hingga saat ini, sintesis nanomaterial berbasis silika masih terus diteliti dan dilakukan di lembaga riset, universitas maupun industri di dunia termasuk di Indonesia. Sintesis nanomaterial silika memiliki rute sintesis yang cenderung lebih *straightforward*, cepat dan sederhana, jika dibandingkan dengan nanomaterial lain seperti graphene dan oksida lainnya seperti alumina dan germanium. Dengan memahami rute sintesisnya dari perkusor komersial serta karakterisasi dari nanomaterial yang dihasilkan, maka pengembangan nanosilika kedepannya

yang memanfaatkan bahan atau mineral alam Indonesia dapat dilakukan.

B. Modifikasi kimia permukaan dari silika nanopartikel

Silika nanopartikel pada umumnya memiliki gugus hidroksil (-OH) di permukaannya. Terbentuknya spesies Si-OH (silanol) telah dianggap sebagai metoda paling sesuai untuk menurunkan hidrofobisitas dari permukaan nanopartikel. Karakteristik dari nanosilika ini menjadi penting, dikarenakan aplikasi biosensor biasanya dilakukan dalam media air atau dalam larutan yang memiliki pH netral (Qhobosheane, dkk. 2001). Gugus silanol dapat terbentuk melalui reaksi oksidasi kimia maupun reaksi termal. Oksidasi menggunakan ozon pada suhu ruang yang telah ditunjukkan dalam beberapa studi, mampu membentuk lapisan *siloxane* (Si-O-Si) pada permukaan nanomaterial. Lapisan ini selanjutnya mampu membuat permukaan nanosilika menjadi reaktif dan mudah untuk diimobilisasi dengan biomolekul yang sesuai. Metoda oksidasi termal atau *thermal annealing* pada suhu kurang dari 600 °C juga mampu menghasilkan lapisan yang stabil pada permukaan nanosilika. Akan tetapi, reaktivitas dari permukaan yang mengalami oksidasi termal terbukti lebih rendah daripada yang dioksidasikan dengan ozon, hal ini disebabkan oleh densitas dari gugus silanol bebas di permukaan jauh lebih rendah (Jane, dkk. 2009; Jenie, dkk. 2016).

Reaksi oksidasi dan pembentukan ikatan Si-O umumnya diikuti dengan reaksi silanisasi pada permukaan nanosilika. Pada reaksi ini, terjadi modifikasi permukaan silika dengan *silane* dengan berbagai macam *terminal moiety* (gugus fungsi di ujungnya). *Silane*, sebagai *coupling agent*, dapat menghasilkan ikatan yang stabil antara permukaan nanosilika dengan molekul organik yang akan dikonjugasikan. Keunggulan lain dari

reaksi silanisasi adalah dapat menurunkan hidrofobisitas dari permukaan nanosilika sehingga meningkatkan kestabilannya dalam media cair. *Silane* yang paling umum digunakan adalah aminopropyl triethoxy silane (APTES) dimana senyawa ini memberikan gugus fungsi amine di permukaan nanomaterial silika. *Silane* yang lain juga telah dilaporkan dalam beberapa studi untuk memberikan gugus fungsi aktif di permukaan silanol nanosilika, antara lain isosianat-, chloro- atau iodosilane (Jenie, dkk. 2017).

Reaksi permukaan lainnya yang umum digunakan adalah reaksi hidrosiliasi, di mana terjadi reaksi nukleofilik antara gugus alkena atau alkuna di permukaan nanosilika yang memiliki gugus Si-H atau silika hidrida (Jenie, dkk. 2014). Gugus fungsi ini biasa terdapat pada permukaan silika berpori yang telah *di-etching (freshly etched porous silicon)* atau permukaan nanosilika yang diperoleh dari mineral alam. Reaksi hidrosiliasi ini dilakukan pada suhu tinggi (sekitar 120 °C) dan dalam kondisi *inert* untuk menghindari adanya uap air atau oksigen yang dapat menghambat terjadinya reaksi. Reaksi ini menghasilkan permukaan nanosilika dengan ikatan Si-C yang stabil dan gugus fungsi yang berbeda-beda seperti asam karboksilat, ester dan alkil halida (Jenie, dkk. 2015).

Dari uraian diatas, terlihat bahwa permukaan nanomaterial silika dapat dimodifikasi dengan mudah dan dimanipulasi gugus fungsionalnya sehingga dapat dikonjugasikan dengan molekul atau biomolekul lainnya. Sifat ini menjadi krusial dalam aplikasi lebih lanjut nanosilika menjadi *advanced functional material*, seperti adsorben dengan daya jerap tinggi, katalis heterogen

yang selektif maupun sebagai platform deteksi/biosensor dengan performa analitik yang unggul.

C. Keunggulan nanomaterial berbasis silika sebagai biosensor

Secara global, tren pengembangan biosensor mengarah pada miniaturisasi, peningkatan sensitivitas dan selektivitas, serta kemampuan deteksi multiparameter secara real-time. Ada penekanan kuat pada pengembangan biosensor yang portabel dan mudah digunakan di lapangan, mengurangi ketergantungan pada laboratorium terpusat yang mahal dan memakan waktu. Lebih lanjut, isu keberlanjutan menjadi perhatian utama. Ini mencakup penggunaan material yang ramah lingkungan, proses produksi yang efisien, dan biaya yang terjangkau agar dapat diakses secara luas. Nanomaterial berbasis silika menawarkan berbagai keunggulan yang menjadikannya kandidat ideal untuk material biosensor.

Penggunaan nanopartikel silika sebagai biosensor telah mengalami kemajuan yang signifikan. Pada tahun 1997, para peneliti menyempurnakan metode sintesis Stöber untuk menciptakan silika mesopori sub-mikrometer yang teratur, yang disebut sebagai MCM-411. Meskipun pada saat itu belum secara khusus menjadi biosensor, hal ini menandai langkah penting dalam pengembangan bahan berbasis silika. Selanjutnya, penggunaan MCM-41 pertama yang dilaporkan sebagai sistem penghantaran obat terjadi pada tahun 2001 ketika digunakan sebagai *nanocarrier* untuk ibuprofen. Sejak saat itu, pemanfaatan nanopartikel silika sebagai biosensing semakin berkembang karena sifatnya yang unik.

Seperti disebutkan diatas, silika memiliki sejumlah keunggulan antara lain stabilitas kimia dan porositas yang tinggi,

kemampuan fungsionalisasi permukaan, biokompatibilitas, kemudahan pembuatan, sifat optik, kekuatan mekanik, dan kemampuan sensor multianalit yang membuatnya sangat sesuai dalam pengembangan biosensor (Qhobosheane, dkk. 2001). Secara khusus, nanopartikel silika kini telah diaplikasikan dalam biosensing karena sifatnya yang khas antara lain:

- 1) Ikatan kovalen yang stabil: silika dapat difungsikan dengan pengenal biologis (*biorecognition element*) seperti antibodi atau aptamer melalui ikatan kovalen yang stabil,
- 2) Luas permukaan yang besar: luas permukaannya yang tinggi memungkinkan imobilisasi biomolekul secara efisien, dan
- 3) Biokompatibilitas: silika secara umum bersifat biokompatibel sehingga dapat digunakan bersama dengan organisme hidup dan jaringan tanpa menimbulkan reaksi toksik yang signifikan. Dalam konteks biosensor medis, hal ini sangat penting untuk menghindari efek samping yang merugikan pada pasien.

Silika termasuk material yang sangat stabil secara kimia sehingga tahan terhadap perubahan kimia yang dapat terjadi dalam berbagai kondisi lingkungan. Dalam konteks aplikasi sebagai biosensor, stabilitas kimia ini penting untuk menjaga kehandalan dan ketahanan sensor. Silika juga memiliki struktur pori yang sangat teratur yang dapat disesuaikan ukurannya secara tepat. Dengan adanya pori-pori ini, nanomaterial silika memiliki luas permukaan per satuan volume yang besar, sehingga meningkatkan area permukaan yang berkonjugasi dengan penanda biologis dan selanjutnya meningkatkan interaksi dengan molekul target dalam sampel, yang selanjutnya, meningkatkan sensitivitas deteksi. Seperti dijelaskan sebelumnya, silika dapat difungsionalisasi dengan berbagai gugus kimia atau lapisan permukaan sehingga memungkinkan

pengembangan biosensor untuk menggabungkan senyawa yang dapat mengenali biomolekul target dengan lebih efisien, seperti antibodi, molekul aptamer, enzim maupun biomolekul atau molekul kimia lainnya. Kemampuan ini meningkatkan selektivitas deteksi. Pada umumnya, silika dianggap sebagai bahan yang relatif biokompatibel sehingga

Nanomaterial berbasis silika dapat dibuat dalam berbagai bentuk, yang umumnya dibagi berdasarkan dimensinya, yakni dimensi nol (*zero-dimensional*), seperti nanopartikel silika (Douroumis, dkk. 2012); dimensi satu (*one-dimensional*) seperti *nanorods* dan *nanowires*; dimensi dua (*two-dimensional*) seperti *thin-film* atau lapisan tipis (Jenie, dkk. 2014) ; dan nanosilika dimensi tiga (*three-dimensional*) yang mencakup nanomaterial *core-shell* ataupun *nanoarray* berbasis silika. Mengingat proses pembuatannya yang relatif sederhana, seperti dijelaskan diatas, memungkinkan nanomaterial berbasis silika ini untuk diproduksi dalam skala yang lebih besar, dari skala *pilot* hingga skala industri. Hal ini yang membuat silika menjadi alternatif yang lebih ekonomis untuk pengembangan material biosensor.

Beberapa bentuk nanomaterial silika dapat memiliki sifat optik yang dapat dimanfaatkan untuk mendeteksi perubahan warna atau perubahan sinyal fluoresensi atau fosforesensi dalam sampel biologis akibat konfigurasi material yang berbeda. Sebagai contoh, meskipun silika dan silikon memiliki unsur dasar yang sama, susunannya—baik dalam jaringan tetrahedral (silika) maupun bentuk kristal/amorf (silikon)—menghasilkan sifat material yang berbeda. Dalam penelitian kami sebelumnya, rongga mikro dalam *thin film* silikon berpori (*porous silicon microcavity, pSiMC*) dapat digunakan sebagai platform biosensing optik untuk mendeteksi enzim *l-lactate dehidrogenase* (LDH), enzim yang ditemukan di berbagai jaringan tubuh. Peningkatan

LDH merupakan indikasi kondisi patologis dan kerusakan sel tertentu. Rongga mikro silikon diketahui meningkatkan pendaran cahaya sehingga memungkinkan deteksi LDH yang sensitif (Jenie, dkk. 2015). Pengembangan sukses lainnya dari rongga mikro silikon berpori (pSiMC) yang difungsikan dengan probe oksigen singlet luminescent ($^1\text{O}_2$) yang disebut Eu-A, sebuah probe berbasis kompleks Europium, membuka jalan bagi aplikasi dalam deteksi spesies oksigen reaktif dan diagnostik biomedis (Jenie, dkk. 2017; Jenie, dkk. 2017).

Struktur nanomaterial silika juga memiliki kekuatan mekanik yang baik. Hal ini penting dalam aplikasi biosensor yang memerlukan manipulasi dan perlakuan fisik pada biosensor tanpa merusak material itu sendiri. Terlebih lagi, silika dapat difungsionalisasi permukaannya untuk mendeteksi berbagai analit (zat atau senyawa yang diuji) dalam satu waktu dalam sebuah *array* dalam skala nano maupun mikro. Hal ini berguna dalam situasi di mana diperlukan analisis multiparameter. Dengan kombinasi karakteristik-karakteristik ini, silika berskala nano merupakan bahan yang sangat menarik dan berpotensi untuk pengembangan biosensor dalam berbagai aplikasi, termasuk diagnostik medis, pengawasan lingkungan, keamanan dan ketahanan pangan, pengawasan kesehatan, dan penelitian ilmiah (Shandilya, dkk. 2019).

Dengan sifat-sifat unggul diatas, tantangan selanjutnya adalah bagaimana mendapatkan nanomaterial silika yang lebih ekonomis dan terjangkau. *Sustainability* atau keberlanjutan dari sintesis dan modifikasi suatu nanomaterial silika menjadi penting dalam aplikasinya lebih lanjut. Nanomaterial silika yang berasal dari alam, baik itu biomassa maupun mineral alam saat ini menjadi pilihan menarik mengingat ketersediaannya yang

melimpah di Indonesia dan proses sintesisnya yang lebih ramah lingkungan, mudah dan murah.

D. Nanomaterial silika dari silika geothermal

Geothermal atau panas bumi merupakan salah satu sumber daya alam yang mengandung silika dalam bentuk mineral seperti silika amorf atau terlarut dalam air panas (*brine*). Pembuatan nanomaterial dari silika *geothermal* melibatkan beberapa tahapan untuk mengekstraksi silika dari sumber geothermal dan mengubahnya menjadi bentuk nanomaterial yang diinginkan serta memerlukan pemahaman yang mendalam tentang kimia material, kimia permukaan, teknik karakterisasi, dan potensi aplikasinya. Seiring dengan perkembangan teknologi, penggunaan nanomaterial dari sumber geothermal juga dapat menjadi solusi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan untuk memanfaatkan sumber daya geothermal yang tersedia (Jenie, dkk. 2018; Kusumastuti, dkk. 2017). Tahapan dalam pembuatan nanomaterial dari silika *geothermal*, meliputi ekstraksi, pemurnian dan modifikasi silika. Silika dapat diekstrak dari air panas geothermal atau dari endapan mineral yang terbentuk ketika air tersebut mendingin. Proses ekstraksi bergantung pada sifat silika dalam sumber *geothermal*. Ekstraksi umumnya melibatkan penggunaan air panas untuk melarutkan silika atau pengendapan silika dari larutan *geothermal* yang kaya akan mineral. Silika yang diekstrak selanjutnya perlu dimurnikan untuk menghilangkan kontaminan dan mineral-mineral lain, contohnya lithium (Maulidia, dkk. 2023; Sutijan, dkk. 2023; Tangkas, dkk. 2023). Proses pemurnian melibatkan cara fisis dan kimiawi seperti pengendapan, filtrasi, atau penggunaan asam. Setelah silika dimurnikan, langkah selanjutnya adalah mengubahnya menjadi bentuk nanomaterial yang diinginkan.

Proses ini dapat mencakup penggilingan mekanis, sintesis kimia, atau metode fisika tertentu seperti sol-gel, kopresipitasi atau deposisi uap kimia (*chemical vapour deposition - CVD*). Penggunaan sumber daya *geothermal* untuk pengembangan nanomaterial silika merupakan solusi pengembangan nanomaterial yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Selanjutnya, nanomaterial silika dari sumber *geothermal* dapat digunakan dalam berbagai aplikasi seperti di bidang biomedis, dalam industri katalisis, optoelektronik dan material komposit dan konstruksi (Petrus, dkk. 2021; Petrus, dkk. 2022).

Indonesia memiliki keunggulan strategis dalam pemanfaatan silika *geothermal*, baik dari aspek kuantitas maupun kualitas, dibandingkan banyak negara lain di dunia. Dari sisi kuantitas, deposit silika scaling di Indonesia sangat melimpah. Lokasi utama pembangkit listrik tenaga panas bumi seperti Dieng, Lahendong, Kamojang, dan Wayang Windu menghasilkan brine *geothermal* yang kaya akan kandungan silika. Secara spesifik, hasil studi dari berbagai sumber, termasuk *The Behavior of Silica in Geothermal Brine from Dieng Geothermal Power Plant*, Indonesia, menunjukkan bahwa konsentrasi silika di brine PLTP Dieng berkisar antara 1100 hingga 1400 mg/L. Angka ini jauh lebih tinggi dibandingkan rata-rata konsentrasi silika dalam brine *geothermal* di tingkat global, yang umumnya hanya berada pada kisaran 500 hingga 1000 mg/L. Dengan demikian, konsentrasi silika *geothermal* Indonesia, khususnya di Dieng, mencapai dua hingga dua setengah kali lebih tinggi daripada standar dunia.

Dari aspek kualitas, silika *geothermal* Indonesia menunjukkan keunggulan yang sangat menonjol. Berdasarkan hasil penelitian dari PT Geo Dipa Energi dan UGM Geothermal Research Group, diketahui bahwa silika yang dihasilkan dari endapan *geothermal* di Indonesia memiliki tingkat kemurnian sangat tinggi, yakni

antara 90 hingga 98 persen silika amorf (SiO_2). Tingkat kontaminasi logam berat dalam endapan silika Indonesia juga relatif rendah, sehingga lebih memudahkan proses pengolahan menjadi produk nanosilika. Hal ini menjadi pembeda utama dibandingkan dengan silika geothermal dari negara-negara lain seperti Filipina atau Kenya, di mana kandungan logam berat yang lebih tinggi menuntut proses purifikasi tambahan yang lebih kompleks dan mahal.

Dalam riset kami sebelumnya, dengan berkolaborasi dengan Tim *Mineral Processing* dari Departemen Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada dan PT Geodipa Energi, kami telah berhasil mensintesis nanopartikel berbasis silika *geothermal* melalui proses *sol-gel* yang termodifikasi. Endapan silika *geothermal* yang telah dikeringkan direaksikan dengan basa kuat, natrium hidroksida (NaOH), kemudian ditambahkan asam kuat asam klorida (HCl) untuk membentuk gel pada kondisi asam ($\text{pH } 5$). Nanopartikel yang diperoleh memiliki luas area spesifik yang cukup tinggi dan ukuran pori yang mudah dibentuk (Silvia, dkk. 2022). Hasil analisis kimia permukaan menggunakan *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) dan *X-ray Diffraction* (XRD) menunjukkan adanya gugus silanol dan siloksan, serta berada dalam fase kristalin. Hal ini sangat kontras berbeda dengan bahan bakunya yang berada dalam fase amorf, dan menunjukkan bahwa dalam kondisi reaksi yang tidak ekstrim (suhu dan tekanan atmosferis), kristal nanosilika dapat terbentuk (Jenie, dkk. 2018; Kusumastuti, dkk. 2017). Hasil ini menjadi dasar pengembangan nanosilika dari silika *geothermal* selanjutnya, di mana nanosilika kami modifikasi dengan pewarna organik, agar bersifat *fluorescence*. Tujuannya adalah agar *fluorescence silica nanoparticle* (FSNP) dapat digunakan dalam aplikasi bioimaging dan selanjutnya digunakan sebagai platform deteksi optik. Dalam penelitian kami, FSNP telah

berhasil kami sintesis dari silika *geothermal* melalui metode *solv-gel* untuk kemudian dimodifikasi menggunakan Rhodamine 6G (R-6G) sebagai pewarna fluoresensnya sehingga dapat menjadi transduser optik. Hasil analisis menunjukkan bahwa FSNP memiliki luas area spesifik yang tinggi dan berukuran sekitar 5–10 nm. Adanya interaksi antara pewarna R-6G dan permukaan nanopartikel silika melalui ikatan hidrogen mengakibatkan FSNP memiliki emisi fluoresensi yang lebih tinggi hingga 2 kaliya dibanding pewarna R-6G dalam larutan (Jenie, dkk. 2020; Jenie, dkk. 2019; Untoro, dkk. 2020). Nanopartikel silika berfluoresensi tinggi ini kemudian diaplikasikan sebagai serbuk sidik jari berfluoresensi, yang performanya lebih sensitif dan kontras daripada serbuk sidik jari bubuk hitam yang umum digunakan (Jenie, dkk. 2020). Selain itu, dari hasil analisis kimia permukaan dari FSNP, nanosilika ini dapat difungsionalisasi lebih lanjut dengan biomolekul untuk menghasil *platform* deteksi dengan sifat intrinsik yang superior.

Dari hasil riset dan pengembangan grup riset kami diatas, terbukti bahwa silika yang berasal dari lumpur atau endapan geothermal dapat disintesis menjadi material silika berskala nano secara mudah dan murah. Karakterisasi kimia dan fisika dari nanomaterial silika yang dihasilkan juga sama bahkan lebih unggul dari nanosilika yang berasal dari perkusor komersial. Nanomaterial berbasis silika geothermal terbukti telah memiliki gugus aktif, terutama silanol, di permukaannya tanpa ada perlakuan/reaksi di permukaannya. Dengan adanya gugus aktif tersebut, nanosilika berbasis geothermal dapat langsung dikonjugasikan dengan molekul atau biomolekul tertentu sehingga dapat diaplikasikan sebagai perangkat deteksi atau biosensor. Hal ini membuktikan bahwa sintesis nanosilika berbasis geothermal lebih efisien dibanding yang komersial sehingga dapat mengurangi ketergantungan terhadap import

bahan kimia dan perkursor dari luar. Selain itu, pengembangan riset nanomaterial dari silika geothermal diharapkan dapat memanfaatkan dan memberikan nilai tambah terhadap limbah atau endapan geothermal di Indonesia.

E. Fungsionalisasi dan modifikasi nanomaterial berbasis silika geothermal untuk deteksi

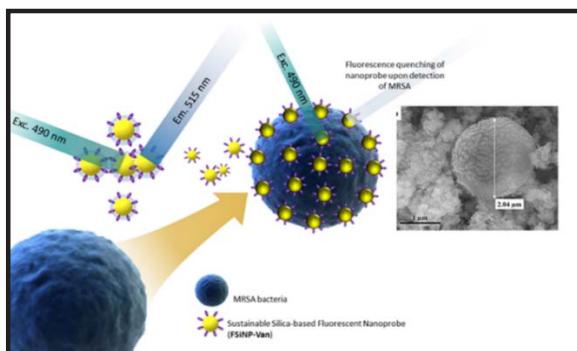
Fungsionalisasi nanomaterial merupakan langkah kunci dalam pengembangan biosensor untuk deteksi spesifik molekul target. Fungsionalisasi mengacu pada penambahan senyawa atau gugus fungsional ke permukaan nanomaterial untuk memungkinkan interaksi yang selektif dengan molekul target tertentu. Dalam konteks nanomaterial biosensor dari silika, fungsionalisasi dilakukan untuk meningkatkan sensitivitas dan spesifisitas deteksi (Qhobosheane, dkk. 2001).

Metode fungsionalisasi atau modifikasi kimia permukaan nanosilika secara umum telah kami jelaskan di atas. Untuk nanopartikel silika yang berasal dari silika geothermal, hingga saat ini belum banyak diteliti untuk dipelajari reaksi kimia permukaannya, terlebih lagi sebagai *platform* deteksi yang sensitif dan spesifik. Hal inilah yang menjadikan *breakthrough* dari hasil penelitian kami mensintesis dan memodifikasi nanomaterial berbasis silika geothermal. Hasil analisis kimia permukaan menunjukkan bahwa nanopartikel silika (SiNP) dan juga FSNP memiliki gugus fungsi aktif silanol, siloksan bahkan silika hidrida di permukaannya. Dengan demikian, FSNP dapat dimodifikasi lebih lanjut dengan molekul penanda biologis untuk mendeteksi sampel sasaran. Sebagai contoh, yang telah kami kembangkan adalah imobilisasi permukaan FSNP yang telah dimodifikasi dengan antibodi bakteri *Escherichia coli* (*E.coli*) yang digunakan untuk mendeteksi bakteri *E.coli*.

Grup riset kami telah berhasil memodifikasi permukaan FSNP melalui dua pendekatan reaksi kimia permukaan, yaitu melalui reaksi silanisasi dan hidrosililasi (Jenie, dkk. 2021; Widyasari, dkk. 2021; Widyasari, dkk. 2022). Reaksi silanisasi dilakukan dengan menggunakan APTES sebagai *crosslinker*, sementara pada reaksi hidrosililasi menggunakan N-hydrosuccinimida yang digabungkan dengan *N-Ethyl-N'-(3-dimethylaminopropyl) carbodiimide hydrochloride* (EDC/NHS). Hasil analisis dari FTIR, spektroskopi fluoresensi, dan uji fotostabilitas menunjukkan bahwa nanopartikel yang dimodifikasi dengan EDC/NHS menunjukkan hasil yang optimum untuk kemudian dikonjugasikan dengan antibodi *E.coli*. Nanopartikel silika berfluoresensi yang telah diimobilisasi dengan antibodi, FSNP-Ab2, kemudian diaplikasikan untuk mendeteksi bakteri *E.coli* dengan memanfaatkan fenomena *fluorescence-quenching*, dan diperoleh area linier deteksi dari 10^2 hingga 10^7 CFU/mL dengan limit deteksi sebesar 1.6×10^2 CFU/mL. Selektivitas dari FSNP-Ab2 sebagai biosensor terbukti selektif hanya terhadap *E.coli*, dan bukan bakteri gram negatif lainnya seperti *P. aeruginosa* dan *S. typhimurium* (Widyasari, dkk. 2022).

Selanjutnya, bekerjasama dengan Grup Riset Advanced Functional Material, Fakultas Teknologi Industri – ITB, kami juga mengembangkan silika nanopartikel berfluoresensi berbasis silika *geothermal* untuk deteksi bakteri yang resisten terhadap antibiotik yaitu *Methicillin Resistant Staphylococcus Aureus (MRSA)* seperti terlihat di Gambar 4 (Sifana, dkk. 2024). Berbeda dengan pengembangan sebelumnya, dalam riset ini digunakan *fluorescein-5-isothiocyanate* (FITC) sebagai pewarna fluoresensinya, sehingga terbentuk silika nanopartikel berfluoresensi yang diberi kode FSiNP (Sifana, dkk. 2022). Metode ini mengikuti studi kami sebelumnya dimana SiNP dari *geothermal* dapat dimodifikasi dengan berbagai macam

pewarna fluoresensi. Selanjutnya, FSiNP diimobilisasi dengan vankomisin melalui rekasi hidrosililasi dan konjugasi EDC/NHS. Vankomisin merupakan salah satu molekul penanda untuk mengenali adanya MRSA. *Nanoprobe* yang dihasilkan mampu mengenali keberadaan MRSA dalam cairan buffer hanya dalam waktu 20 menit dengan kisaran konsentrasi bakteri dari 10 hingga 10^6 CFU/mL. Limit deteksi dari *nanoprobe* FSiNP-Van terhitung pada 1 CFU/mL (Sifana, dkk. 2022; Sifana, dkk. 2024). Hal ini menjadi dasar *proof-of-concept* bahwa nanomaterial silika berfluoresensi dari silika geothermal mampu diaplikasikan sebagai *platform* deteksi yang sensitif dan selektif, salah satu contohnya untuk deteksi antibodi COVID-19 (Apriyani, dkk. 2023).



Gambar 4. Skematik Deteksi Bakteri MRSA Menggunakan Nanopartikel Berfluoresensi Berbasis Silika Geothermal yang Telah Dimodifikasi (Sifana, Jenie, dkk. 2024).

Dengan pembuktian konsep di atas, pengembangan selanjutnya adalah memodifikasinya dengan nanopartikel magnetik untuk menghasilkan nanomaterial silika yang bersifat dua fungsi (*bi-functional*) yaitu fluoresensi dan magnetik

(Elmaria, dkk. 2024; Maulana, dkk. 2023). Nanopartikel berbasis silika *geothermal* yang dimodifikasi dengan sifat magnetik telah berhasil disintesis, di mana diperoleh nanopartikel silika yang bersifat paramagnetik lunak atau ferromagnetik (Elmaria, dkk. 2021; Fitri, dkk. 2019). Tujuan dari ditambahkannya sifat magnetik yaitu agar nanomaterial yang telah berikatan dengan molekul target dapat dipisahkan dari yang tidak berikatan, sehingga spesifitas dan sensitivitasnya dapat ditingkatkan. Pemisahan menggunakan medan magnet pun merupakan metode alternatif yang lebih murah dan mudah daripada pemisahan menggunakan sentrifugasi (Shandilya, dkk. 2019). Hal ini telah dilakukan dalam grup riset kami, terutama sebagai salah satu alternatif jawaban untuk memantau/*screening* pandemi COVID-19 di tahun 2020. *Nanoprobe* silika *geothermal* yang bersifat fluoresensi dan magnetik didesain sedemikian hingga mampu mendeteksi antigen COVID-19 dengan limit deteksi hingga 2 fg/mL. *Nanoprobe* ini juga memberikan respons deteksi yang cepat dalam 30 menit dengan rentang linier konsentrasi dari 10^{-6} hingga 10^{-2} $\mu\text{g}/\text{mL}$, yang menunjukkan bahwa *nanoprobe* yang berhasil kami sintesis dapat diaplikasikan pada konsentrasi yang luas (Maulana, dkk. 2024).

Mengingat performa nanopartikel silika dari silika *geothermal* tersebut di atas yang cukup menjanjikan untuk dimodifikasi, diimobilisasi dengan biomolekul dan menjadi platform deteksi yang sensitive dan selektif, maka selanjutnya kami berkolaborasi dengan kelompok riset dari Siegen University (Jerman) dan Koc University (Turki) dengan mengaplikasikan SiNP magnetik berfluoresensi untuk mendeteksi strain DNA dari bakteri MRSA. Pendekatan untuk mendeteksi DNA menggunakan SiNP berfluoresensi ini juga kami kembangkan untuk mengembangkan biosensor kontaminan halal atau DNA *porcine* dalam makanan, baik makanan segar maupun olahan.

Kegiatan yang terakhir ini merupakan kegiatan riset kolaboratif antara Pusat Riset Kimia Maju, Pusat Riset Teknologi Pangan dan Pertanian, dan Fakultas Peternakan – UGM. Sinergi antara periset BRIN dengan akademisi di perguruan tinggi, baik di dalam maupun luar negeri, diharapkan mampu meningkatkan daya saing dan kemandirian bangsa melalui riset dan pengembangan nanosilika dari limbah geothermal.

Dari uraian diatas, dapat ditarik kesimpulan bahwa urgensi pengembangan material ini sebagai biosensor menjadi semakin strategis, terutama dalam konteks keberlanjutan dan pemanfaatan sumber daya lokal. Silika *geothermal* merupakan produk hasil samping dari proses eksploitasi panas bumi yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal. Dengan mengolah limbah ini menjadi nanosilika, tidak hanya diperoleh material berpotensi tinggi untuk aplikasi biosensor, tetapi juga tercapai tujuan ekonomi sirkular dan pengurangan dampak lingkungan. Dalam konteks ini, sinergi antara lembaga riset, akademisi, dan industri menjadi semakin penting untuk mengembangkan teknologi ekstraksi dan pemrosesan nanosilika geothermal agar memenuhi standar kualitas biosensor. Negara-negara maju telah memulai kolaborasi serupa untuk memanfaatkan sumber daya alam secara efisien, namun di Indonesia, upaya ini masih terbatas. Padahal, Indonesia memiliki potensi panas bumi yang besar, sehingga peluang untuk menghasilkan nanosilika dari sumber geothermal sangat menjanjikan. Pengembangan ini akan mendukung agenda SDGs, mendorong inovasi berbasis potensi lokal, serta menguatkan posisi Indonesia dalam kancah riset dan industri biosensor global.

IV. PELUANG NANOMATERIAL SILIKA GEOTHERMAL DALAM APLIKASINYA SEBAGAI MATERIAL MAJU YANG BERKELANJUTAN

Silika geothermal di Indonesia tidak hanya melimpah dalam jumlah, tetapi juga memiliki sifat fisis dan kimia yang sangat unggul, sehingga memiliki potensi yang besar untuk berbagai aplikasi industri. Dari sudut pandang efisiensi ekonomi, pemanfaatan scaling silika geothermal membawa dampak positif ganda. Selain mengurangi biaya operasional akibat pengendapan silika dalam sistem perpipaan geothermal, yang dalam proyek skala besar dapat mencapai ratusan ribu dolar Amerika Serikat per tahun, pengolahan scaling menjadi produk turunan juga membuka peluang nilai tambah ekonomi baru. Dengan demikian, tidak hanya mengurangi beban pemeliharaan fasilitas geothermal, tetapi juga menciptakan sumber pendapatan baru dari produk berbasis silika.

Berikut adalah beberapa contoh aplikasi potensial nanomaterial berbasis silika *geothermal* dalam berbagai bidang termasuk sebagai *platform biosensor* atau sistem deteksi,

1) Biosensor

Nanomaterial berbasis silika *geothermal* merupakan bahan yang menjanjikan dalam pengembangan biosensor berkelanjutan yang unggul. Nanopartikel silika *geothermal* memiliki luas permukaan per satuan volume yang tinggi serta gugus fungsi aktif dipermukaannya yang memungkinkan fungsionalisasi dengan biomolekul, seperti antibodi atau enzim, untuk mendeteksi target spesifik. Selanjutnya, nanomaterial berbasis silika *geothermal* dapat dimodifikasi dengan *dye* organik sehingga bersifat

fluoresensi dan selanjutnya dapat diaplikasikan dalam bidang forensik maupun pencitraan biologis (Jenie, dkk. 2020; Jenie, dkk. 2019; Untoro, dkk. 2020). Sebagai biosensor, nanopartikel silika *geothermal* yang berfluoresensi dapat menjadi platform deteksi yang stabil, sensitif dan spesifik. Terlebih lagi, karena terbuat dari perkusor yang berupa limbah, maka biosensor pun bersifat ekonomis dan ramah lingkungan. Modifikasi nanomaterial berbasis silika *geothermal* telah menghasilkan biosensor untuk mendeteksi adanya bakteri, virus, antibodi maupun protein kecil lainnya (Apriyani, dkk. 2023; Maulana, dkk. 2024; Sifana, dkk. 2024).

2) Energi Terbarukan

Nanomaterial berbasis silika *geothermal* dapat digunakan dalam pengembangan teknologi energi terbarukan, terutama dalam konteks sebagai material katalis heterogen untuk menghasilkan energi terbarukan. Beberapa penelitian telah memanfaatkan silika *geothermal*, sebagai katalis pendukung dikarenakan sifatnya yang memiliki luas permukaan yang tinggi (Elmaria, dkk. 2021). Pengembangan selanjutnya adalah memodifikasi silika *geothermal* hingga berstruktur nano dan memiliki sifat intrinsik untuk reaksi katalitik yang efisien, seperti sifat magnetik, sifat asam atau basa, dan memiliki kestabilan termal yang tinggi (Elmaria, dkk. 2024). Selain itu, nanosilika dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi konversi panas menjadi energi listrik dapat membantu mengoptimalkan kinerja pembangkit listrik panas bumi.

3) Pupuk slow-release

Banyak negara agraris termasuk Indonesia memanfaatkan pupuk organik seperti urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) akibat kandungan unsur penting yaitu nitrogen untuk pertumbuhan tanaman. Namun, nitrogen dapat dengan mudah hilang akibat penyiraman tanaman,

pelepasan senyawa amonia ke udara, atau dengan perubahan menjadi senyawa sampah lainnya yang tidak dikonsumsi oleh tanaman. Silika dapat digunakan untuk bahan enkapsulasi dengan memodifikasi pupuk urea untuk meningkatkan efisiensi pemupukan. Silika *geothermal* memiliki kandungan silika yang tinggi sehingga pemanfaatan silika mesopori yang diperoleh dari limbah panas bumi untuk enkapsulasi urea dapat meningkatkan efektivitas laju pelepasan (*slow release*) dari pupuk (Jenie, dkk. 2018).

4) Purifikasi Air dan Tanah

Nanomaterial silika *geothermal* memiliki luas permukaan per satuan volume yang sangat tinggi (Jenie, dkk. 2018) serta sifat adsorpsi nanomaterial dapat dimanfaatkan dalam bidang lingkungan, seperti purifikasi air dan tanah. Nanomaterial berbasis silika *geothermal* dapat digunakan sebagai bahan superadsorben untuk menangkap dan menghilangkan kontaminan dari air tanah atau limbah cair industri, memberikan solusi ramah lingkungan untuk masalah polusi.

5) Material Bangunan dan Konstruksi

Penggunaan nanomaterial dalam bidang konstruksi dapat meningkatkan sifat mekanik dan termal dari material bangunan. Nanomaterial berbasis silika *geothermal* dapat diintegrasikan ke dalam beton atau bahan konstruksi lainnya untuk meningkatkan daya tahan terhadap suhu ekstrem, kekuatan mekanik dan memberikan isolasi termal yang lebih baik (Petrus, dkk. 2021).

Secara keseluruhan, Indonesia memiliki kekayaan sumber daya *geothermal* yang tidak hanya potensial sebagai sumber energi terbarukan, tetapi juga menyimpan nilai ekonomi strategis dalam bentuk silika yang dapat diekstraksi dari cairan panas bumi (brine) maupun endapan dalam sistem perpipaan. Silika

geothermal di Indonesia memiliki volume, konsentrasi, dan kualitas yang sangat kompetitif di tingkat global. Berdasarkan analisis nilai ekonomi, potensi pendapatan dari silika geothermal Indonesia mencapai sekitar USD 51,45 juta per tahun pada skenario harga rendah, USD 169,05 juta per tahun pada skenario harga tinggi, dan sekitar USD 110,25 juta per tahun berdasarkan harga rata-rata pasar. Angka ini secara signifikan melampaui nilai komoditas lain yang juga terdapat dalam brine, seperti lithium (rata-rata USD 20,37 juta per tahun), natrium, kalium, boron, dan kalsium.

Selain nilai ekonominya yang besar, kualitas silika geothermal Indonesia tergolong tinggi, sehingga memungkinkan produksi nanosilika dilakukan secara lebih efisien tanpa memerlukan proses pemurnian tambahan yang mahal. Hal ini memberikan keunggulan kompetitif dalam pengembangan material maju berbasis nanosilika, khususnya untuk aplikasi strategis seperti biosensor, katalis, adsorben, hingga material konstruksi.

Dengan dukungan kebijakan nasional yang progresif, sinergi antara lembaga riset, akademisi, dan pelaku industri, serta arah global menuju industri berkelanjutan dan ramah lingkungan, Indonesia memiliki peluang besar untuk menempati posisi penting dalam rantai nilai industri nanomaterial global. Pengembangan industri silika geothermal nasional tidak hanya dapat mengurangi ketergantungan pada impor material fungsional, tetapi juga mendorong pertumbuhan ekonomi hijau dan menciptakan nilai tambah dari sumber daya alam dalam negeri secara berkelanjutan.

V. KESIMPULAN

Nanomaterial berbasis silika telah menjadi salah satu platform paling menjanjikan yang telah membuka peluang besar dalam menciptakan biosensor yang lebih sensitif, selektif, dan berkelanjutan. Silika sebagai bahan dasar nanomaterial memiliki keunggulan fisis dan kimia seperti luas permukaan yang tinggi, kestabilan termal, keberadaan gugus fungsional aktif, serta sifat biokompatibel dan *biodegradable*, yang menjadikannya kandidat ideal sebagai transduser dalam sistem biosensor. Di era yang menuntut deteksi biomolekul atau molekul kimia secara cepat, akurat, dan ekonomis, kebutuhan akan material biosensor yang efisien dan ramah lingkungan menjadi sangat mendesak. Integrasi nanoteknologi dan modifikasi kimia permukaan silika menjadi pendekatan strategis untuk menjawab tantangan tersebut.

Rekam jejak riset kami menawarkan pendekatan inovatif dengan memanfaatkan endapan geothermal sebagai sumber nanosilika, yang tidak hanya mengurangi beban limbah industri panas bumi, tetapi juga menghasilkan material baru yang fungsional dan berkelanjutan. Proses sintesis yang digunakan, seperti metode *sol-gel*, terbukti sederhana, terkontrol, dan memiliki reproducibility tinggi. Nanosilika geothermal yang dihasilkan menunjukkan karakteristik morfologi dan kimia yang setara dengan nanosilika dari prekursor komersial, sekaligus menurunkan biaya produksi secara signifikan.

Lebih jauh, modifikasi kimia nanosilika geothermal dengan dye organik baik secara fisik (adsorpsi) maupun kimia (kovalen) telah berhasil menghasilkan nanosilika berfluoresensi. Material

ini telah kami aplikasikan dalam berbagai platform biosensor optik dan bioimaging, serta dalam bidang forensik untuk deteksi sidik jari laten. Kinerja biosensor yang dikembangkan menunjukkan sensitivitas tinggi dalam mendeteksi bakteri, antigen, dan antibodi. Selain itu, karena sifat permukaan yang aktif, nanosilika ini memiliki potensi untuk dimodifikasi lebih lanjut dengan sifat fungsional lain, seperti sifat magnetik, guna meningkatkan selektivitas sistem deteksi.

Hasil riset ini menunjukkan bahwa nanoteknologi dan modifikasi kimia silika dapat menjadi solusi konkret dalam menyediakan material biosensor yang berkelanjutan. Material ini tidak hanya murah dan mudah diproduksi, tetapi juga kompatibel secara biologis dan ramah lingkungan. Selain itu, pendekatan ini memberi nilai tambah pada limbah industri, sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular dan pembangunan berkelanjutan.

Namun demikian, tantangan yang perlu dijawab di masa depan meliputi optimalisasi skala produksi, peningkatan kestabilan material dalam lingkungan biologis yang kompleks, serta integrasi dengan sistem mikrofluidik dan elektronik untuk aplikasi *point-of-care diagnostics*.

Ke depan, nanosilika geothermal memiliki potensi besar untuk dikembangkan tidak hanya dalam bidang kesehatan dan lingkungan, tetapi juga di sektor energi sebagai katalis heterogen, di pertanian sebagai pengantar pupuk atau superadsorben, serta di industri konstruksi sebagai material aditif yang memperbaiki performa dan efisiensi material bangunan.

Dengan demikian, riset ini menegaskan bahwa penggabungan nanoteknologi dan modifikasi kimia silika berbasis limbah geothermal merupakan langkah strategis dan solutif dalam menjawab kebutuhan akan material biosensor yang tidak hanya unggul secara teknis, tetapi juga mendukung prinsip keberlanjutan secara menyeluruh.

VI. PENUTUP

Dari paparan diatas, dapat dilihat bahwa nanoteknologi dan modifikasi kimia silika bukan sekadar wacana ilmiah, melainkan solusi nyata yang dapat menjawab tantangan bangsa—khususnya dalam menyediakan material biosensor yang unggul, murah, dan berkelanjutan. Melalui pendekatan ini, kita tidak hanya mentransformasi limbah menjadi sumber daya strategis, tetapi juga berkontribusi langsung pada terwujudnya kemandirian teknologi nasional. Sebagai seorang peneliti, saya memiliki harapan besar bahwa riset-riset seperti ini tidak berhenti di laboratorium. Saya percaya bahwa inovasi yang lahir dari tanah air—yang berbasis pada sumber daya lokal dan menjawab kebutuhan nasional—harus mendapatkan dukungan penuh untuk bisa berkembang, dikomersialisasi, dan memberi manfaat dan dampak nyata bagi masyarakat.

Dalam hal ini, saya memandang Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) sebagai pilar penting yang dapat memperkuat ekosistem riset di Indonesia. BRIN memiliki peran strategis untuk menjembatani dunia riset dengan industri, mendukung kolaborasi lintas disiplin, serta memastikan bahwa hasil-hasil penelitian tidak berhenti sebagai karya tulis ilmiah atau laporan, tetapi menjelma menjadi produk inovatif yang memperkuat daya saing bangsa. Saya pribadi berharap BRIN terus memberikan ruang yang luas bagi riset-riset berbasis solusi lokal, mempercepat proses hilirisasi, serta menjadi rumah besar bagi para peneliti yang tidak hanya berpikir untuk hari ini, tetapi merancang masa depan Indonesia.

Karena pada akhirnya, bangsa yang besar adalah bangsa yang mampu memanfaatkan ilmunya sendiri untuk menyelesaikan tantangannya sendiri.

VII. UCAPAN TERIMA KASIH

Pertama-tama saya ingin menyampaikan puji syukur kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya dan atas izin-Nya, saya dapat menyampaikan orasi ini.

Terima kasih saya haturkan kepada Presiden Republik Indonesia Jenderal TNI (Purn) Prabowo Subianto dan Presiden Republik Indonesia ke-7 Ir. H. Joko Widodo atas amanat dan penugasan saya sebagai Peneliti Ahli Utama di BRIN.

Penghargaan dan ucapan terima kasih disampaikan kepada Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Dr. Laksana Tri Handoko; Wakil Kepala BRIN, Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian, S.T., M.Sc., DESD., ASEAN Eng, Ketua Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Prof. Dr. Ir. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, MSCE., Ph.D; Sekretaris Majelis Profesor Riset Prof. Dr. Ir. Zainal Arifin, M.Sc., Tim Penelaah Naskah Orasi Ilmiah, Prof. Dr. Ratno Nuryadi, Prof. Dr. Yenny Meliana, Prof. Dr. Isnaeni, M.Sc, dan Prof. Himawan Tri Bayu Murti Petrus, S.T., M.E., D.Eng; Kepala Organisasi Riset Nanoteknologi & Material BRIN, Prof. Dr. Ratno Nuryadi; Kepala Pusat Riset Kimia BRIN, Prof. Dr. Yenny Meliana, sehingga naskah orasi ini layak disampaikan pada sidang pengukuhan ini.

Sebuah quote dari peraih Nobel Prize bidang Kimia 2018, Frances H. Arnold, “*No one is guaranteed an easy life, but we can make it easier for others*”. Tidak ada jaminan hidup kita akan mudah, tetapi kita dapat mempermudah urusan orang lain. Untuk itu pada kesempatan ini ijinkan saya berterima kasih kepada pihak-pihak yang, atas ijin Allah SWT, telah mempermudah urusan saya dari sejak menjadi CPNS Lembaga

Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) hingga dapat menyampaikan orasi ini.

Terima kasih kepada para team administratif sejak saya menjadi CPNS di LIPI hingga sekarang menjadi periset di BRIN, tim yang berada di Kepegawaian Pusat Penelitian Kimia LIPI, di BOSDM LIPI hingga di BOSDM BRIN. Terima kasih juga saya ucapan ke rekan-rekan di Pusat Pembinaan, Pendidikan dan Pelatihan (Pusbindiklat) LIPI serta Direktorat Pengembangan Jabatan Fungsional dan Pengembangan Profesi (DPJFPP) BRIN.

Perjalanan riset saya tidak mungkin seperti ini tanpa bantuan kolega sesama periset dari berbagai disiplin ilmu. Terima kasih saya ucapan kepada kolega sesama LIPI/BRIN, Dr. Marissa Angelina dan Dr. Rizna Triana Dewi dari PR Bahan Baku Obat & Obat Tradisional BRIN, Dr. Robeth V. Manurung dari PR Elektronika BRIN dan Dr. Ni Luh Wulan Septiani dari PR Material Maju. Juga saya ucapan terima kasih kepada kolaborator saya Prof Brian Yuliarto dari Fakultas Teknologi Industri ITB beserta Advanced Functional Materials (AFM) Research Group. Terima kasih atas segala urun rembug dan juga diskusi-diskusi bermanfaat tentang material maju untuk biosensor. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada team di Fakultas Peternakan UGM, Fakultas Farmasi UGM, Departemen Kimia UGM, team di Monash University-Australia, Siegen University –Jerman dan Koc University – Turki. Saya juga ucapan terima kasih tak hingga kepada mahasiswa-mahasiswa bimbingan saya dari S1 hingga S3, semoga ilmu yang didapatkan membawa keberkahan dan manfaat.

Kepada kolaborator saya, yang telah menemani pasang surutnya saya berkarir sebagai peneliti, team Think-Tank Babak Bundhas: Prof. Himawan Tri Bayu Murti Petrus dan Dr. Yuni Kusumastuti dari Departemen Teknik Kimia UGM, Prof. Ferian

Anggara dari Departemen Teknik Geologi UGM dan Prof. Widi Astuti dari PR Teknologi Pertambangan BRIN, *maturnuwun sanget*. Terima kasih telah berbagi visi yang sama mengenai riset dan bagaimana memajukan riset di Indonesia. Mari kita lanjutkan kolaborasi ini dalam karya nyata yang berdampak.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada para kolega peneliti/periset di Pusat Penelitian Kimia LIPI hingga menjadi Pusat Riset Kimia BRIN, terutama kepada team di Bidang Teknologi Proses & Katalis PP Kimia LIPI, Kelompok Penelitian Catalysis & Process Technology LIPI, Kelompok Penelitian Kimia Material dan Katalisis LIPI/BRIN, Kelompok Penelitian Kimia Permukaan & Nanopartikel BRIN hingga Kelompok Penelitian Kimia Zat Padat (Solid State Chemistry Research Group) BRIN dimana saya bernaung sekarang. Secara khusus ijinkan saya ucapkan terima kasih kepada Sudiyarmanto, Ph.D, Deliana Dahnum, Ph.D, Luthfiana Nurul Hidayati, M.Sc and last but not least Fauzan Aulia, ST dan Anis Kristiani, M. Eng. Terima kasih sudah menemani dan mendukung saya *from the get go*. Kesempatan menjadi lebih dari sekedar kolega riset, saya anggap sebagai sebuah *privilege* yang selalu saya syukuri. Semoga Allah SWT selalu mudahkan urusan teman-teman dalam berkarya dan berkarir.

Kepada teman-teman dan guru-guru sekolah saya dari Forrest School (Australia), SD Negeri Percobaan 2 Yogyakarta, SMP Negeri 5 Yogyakarta dan SMA Negeri 8 Yogyakarta, terima kasih sudah membentuk saya yang sekarang. Terima kasih juga untuk teman-teman kuliah dan dosen-dosen saya di Departemen Teknik Kimia UGM, Departemen Teknik Kimia ITB, Faculty of Chemical Technologie RuG Groningen (Belanda) dan University of South Australia (Australia). Ijinkan juga saya mengucapkan terima kasih secara khusus kepada Prof. Nicolas Hans Voelcker,

pembimbing Ph.D saya, yang menjadi mentor sekaligus *role model* bagi saya.

Terima kasih saya ucapan kepada kedua orang tua yang telah mendoakan dan mendidik saya selama ini Ibu Titiek Setyanti Jenie dan almarhum Bapak Prof. Umar Anggara Jenie. Kepada Mama, terima kasih untuk selalu mengajarkan bagaimana bersabar, bersyukur dan selaluikhlas menerima keadaan apapun. Kepada Papa, terima kasih telah menjadi inspirasi saya sejak kecil untuk berkarya di bidang akademis. Kata-kata Papa untuk ‘selalu mencintai ilmu, karena ilmu itu yang akan menghidupimu’ akan selalu menjadi prinsip hidup saya. Semoga Mama dan (alm) Papa bangga dengan pencapaian anakmu ini. Terima kasih kepada mertua saya almarhumah Ibu Suwasti dan almarhum Bapak Prof. Adhi Susanto yang senantiasa mendukung perjalanan hidup saya. Kepada Bapak Anto, terima kasih sudah memberikan contoh nyata mengenai sifat rendah hati. Untuk kakak-kakak dan adik-adik saya, mas Dani Adhipta, mba Fenti Sofiani, mas Agus Suyitno Nino Loekman, mba Inda Presanti Loekman, Yazdi Ibrahim Jenie, Elly Mulyani Jenie, Firman Idris dan Iffat Lamya Jenie, terima kasih atas semua dukungan dan supportnya. Ucapan terima kasih juga saya haturkan kepada Keluarga besar Nahar Jenie, Keluarga besar Kasidjan Haknyomursito, Keluarga besar Soempono Djojowadono dan Keluarga besar SA Soedibyo atas semua doa dan pangestunya.

Terakhir, penghargaan dan terima kasih yang tak hingga kepada suami saya tercinta, Bapak Adi Triyoga, MT yang selama lebih dari 15 tahun telah mendampingi *through thick and thin*. Terima kasih untuk selalu mendoakan, merestui dan mengijinkan saya untuk berkarir sebagai seorang peneliti. Juga kepada my beloved princesses, Zahra dan Salma. *Thank you.*

InsyaAllah Bapak, kakak dan adek selalu mendapat keberkahan dan berlimpah kebaikan dari Allah SWT. Amiin.

Sebagai penutup, terima kasih saya sampaikan kepada panitia penyelenggara Orasi Pengukuhan Profesor Riset dan seluruh undangan, sehingga acara ini dapat terselenggara dengan baik, lancar penuh hikmat. Dan dengan mengucapkan alhamdulillah, saya akhiri orasi ilmiah ini. Terima kasih atas perhatian para hadirin semua dan mohon maaf atas kekurangan dan kekhilafan dalam menyampaikan orasi ilmiah ini.

Semoga Allah SWT selalu melimpahkan taufiq dan hidayah-Nya kepada kita semua, Aamin ya rabbal alamiin.

DAFTAR PUSTAKA

- Airyin, A. E., Apriyani, F., Petrus, H. T. B. M., Angelina, M., Kristiani, A., Pambudi, F. I., & **Aisyiyah Jenie, S. N.** (2024). Preliminary Study on the Modification of Quantum Dots/Geothermal Silica Nanocomposites with Breast Cancer Antibody (MUC-1). *Journal of Physics: Conference Series*, 2705(1), 012014. doi:10.1088/1742-6596/2705/1/012014
- Andreani, A. S., Tachrim, Z. P., Kunarti, E. S., Hashimoto, T., Hayashita, T., **Jenie, S. N. A.**, & Santosa, S. J. (2022). The effect of α -cyclodextrin and β -cyclodextrin as stabilizing agents on the size of gold nanoparticles. *AIP Conference Proceedings*, 2493(1). doi:10.1063/5.0109954
- Apriyani, F., Julyansyah, D., Angelina, M., Randy, A., Manurung, R. V., Yuliarto, B., & **Jenie, S. N. A.** (2023). Preliminary Study of Modified Fluorescent Silica Nanoparticles for the Detection of IgY Antibody. *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*, 35, 19-24. doi:10.4028/p-axmy8o
- Das, B., Franco, J. L., Logan, N., Balasubramanian, P., Kim, M. I., & Cao, C. (2021). Nanozymes in Point-of-Care Diagnosis: An Emerging Futuristic Approach for Biosensing. *Nano-Micro Letters*, 13(1), 193. doi:10.1007/s40820-021-00717-0
- Devreese, J. T. (2007). Importance of Nanosensors: Feynman's Vision and the Birth of Nanotechnology. *MRS Bulletin*, 32(9), 718-725. doi:10.1557/mrs2007.147
- Dewi, K. K., Septiani, N. L. W., Wustoni, S., Nugraha, **Jenie, S. N. A.**, Manurung, R. V., & Yuliarto, B. (2024). One-Dimensional HKUST-1-Decorated Glassy Carbon Electrode for the Sensitive

Electrochemical Immunosensor of NS1 Dengue Virus Serotype-3. ACS Omega, 9(1), 1454-1462. doi:10.1021/acsomega.3c07856

Douroumis, D., Onyesom, I., Maniruzzaman, M., & Mitchell, J. (2012). Mesoporous silica nanoparticles in nanotechnology. Critical Reviews in Biotechnology, 48(September 2011), 1-17. doi:10.3109/07388551.2012.685860

Elmaria, F. A., Aulia, F., Hidayati, L. N., Kristiani, A., Sudiyarmanto, Kusumastuti, Y., **Jenie, S. N. A.**, & Petrus, H. T. M. B. (2024). Facile synthesis of magnetic-fluorescent iron oxide-geothermal silica core/shell nanocomposites via modified sol-gel method. Journal of Sol-Gel Science and Technology. doi:10.1007/s10971-024-06318-8

Elmaria, F. A., & **Jenie, S. N. A.** (2021). Magnetic Nanoparticles Based on Natural Silica as A Methyl Ester Forming Acid Catalyst. Indonesian Journal of Applied Chemistry, 23(2), 49-54. doi:10.14203/inajac.v23i2.473

Fitri, W. A., Sururoh, L., & **Jenie, S. N. A.** (2019). The effect of calcination temperature on the synthesis of magnetic silica nanoparticles from geothermal sludge. AIP Conference Proceedings, 2175(1). doi:10.1063/1.5134644

Fuji-Keizai. (2004). *Biosensor Market, R&D Applications & Commercial Implication: W.S. & Worldwide*. Retrieved from <https://books.google.com.au/books?id=qo9VYgEACAAJ>

Haerudin, Pramono, A. W., Kusuma, D. S., **Jenie, A.**, Voelcker, N. H., & Gibson, C. (2014). Preparation and Characterization of Chitosan/Montmorillonite (MMT) Nanocomposite Systems. International Journal of Technology, 1(1), 291-319. doi:<https://doi.org/10.14716/ijtech.v1i1.33>

Hanifah, N., Septiani, N. L. W., Nugraha, N., **Jenie, S. N. A.**, & Yuliarto, B. (2024). Zeolitic imidazolate framework 8 (ZIF-8) as sensing material for electrochemical detection of dopamine. AIP Conference Proceedings, 3073(1). doi:10.1063/5.0199393

- Hasanah, N., Manurung, R. V., **Jenie, S. N. A.**, Indriyati, Prasty, M. E., & Andreani, A. S. (2023). The effect of size control of Gold Nanoparticles Stabilized with α -cyclodextrin and β -cyclodextrin and their antibacterial activities. *Materials Chemistry and Physics*, 302, 127762. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127762>
- Ismail, A., Widyaningtyas, A. L., Susanto, B. H., & Nasikin, M. (2020). Facile Synthesis Silica Nanoparticles from Indonesia Silica Sand and their Physico-Chemical Properties. *Key Engineering Materials*, 862, 35-39. doi:[10.4028/www.scientific.net/KEM.862.35](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.862.35)
- Jane, A., Dronov, R., Hodges, A., & Voelcker, N. H. (2009). Porous silicon biosensors on the advance. *Trends in Biotechnology*, 27(4), 230-239. doi:[10.1016/j.tibtech.2008.12.004](https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2008.12.004)
- Jenie, A. S. N.**, Krismastuti, F. S. H., Ningrum, Y. P., Kristiani, A., Yunianti, M. D., Astuti, W., & Petrus, H. T. B. M. (2020). Geothermal silica-based fluorescent nanoparticles for the visualization of latent fingerprints. *Materials Express*, 10(2), 258-266. doi:[10.1166/mex.2020.1551](https://doi.org/10.1166/mex.2020.1551)
- Jenie, S. N. A.**, Du, Z., McInnes, S. J. P., Ung, P., Graham, B., Plush, S. E., & Voelcker, N. H. (2014). Biomolecule detection in porous silicon based microcavities via europium luminescence enhancement. *Journal of Materials Chemistry B*, 2, 7694-7703. doi:[10.1039/C4TB01409J](https://doi.org/10.1039/C4TB01409J)
- Jenie, S. N. A.**, Ghaisani, A., Ningrum, Y. P., Kristiani, A., Aulia, F., & Petrus, H. T. B. M. (2018). Preparation of silica nanoparticles from geothermal sludge via sol-gel method. *AIP Conference Proceedings*, 2026(1), 020008. doi:[10.1063/1.5064968](https://doi.org/10.1063/1.5064968)
- Jenie, S. N. A.**, Hickey, S. M., Du, Z., Sebben, D., Brooks, D. A., Voelcker, N. H., & Plush, S. E. (2017). A europium-based ‘off-on’ colourimetric detector of singlet oxygen. *Inorganica Chimica Acta*, 462, 236-240. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ica.2017.03.043>

- Jenie, S. N. A.**, Krismastuti, F. S. H., Kusumastuti, Y., Petrus, H. T. B. M., & Kristiani, A. (2019). Preparation of Fluorescent Nanoparticles Based on Natural Silica for Bioimaging. In J. Imanishi (Ed.), *Toward the Future of Asia: My Proposal* (Vol. 4, pp. 107-113). Japan: The Japan Times.
- Jenie, S. N. A.**, Kristiani, A., Kustomo, Simanungkalit, S., & Mansur, D. (2017). Preparation of nanobiochar as magnetic solid acid catalyst by pyrolysis-carbonization from oil palm empty fruit bunches. AIP Conference Proceedings, 1904(1). doi:10.1063/1.5011875
- Jenie, S. N. A.**, Kristiani, A., Sudiyarmanto, Khaerudini, D. S., & Takeishi, K. (2020). Sulfonated magnetic nanobiochar as heterogeneous acid catalyst for esterification reaction. Journal of Environmental Chemical Engineering, 8(4), 103912. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103912>
- Jenie, S. N. A.**, Kusumastuti, Y., Krismastuti, F. S. H., Untoro, Y. M., Dewi, R. T., Udin, L. Z., & Artanti, N. (2021). Rapid Fluorescence Quenching Detection of Escherichia coli Using Natural Silica-Based Nanoparticles. Sensors, 21(3). doi:10.3390/s21030881
- Jenie, S. N. A.**, Pace, S., Sciacca, B., Brooks, R. D., Plush, S. E., & Voelcker, N. H. (2014). Lanthanide Luminescence Enhancements in Porous Silicon Resonant Microcavities. ACS Applied Materials & Interfaces, 6(15), 12012-12021. doi:10.1021/am500983r
- Jenie, S. N. A.**, Plush, S. E., & Voelcker, N. H. (2016). Recent Advances on Luminescent Enhancement-Based Porous Silicon Biosensors. Pharmaceutical research, 33(10), 2314–2336. doi:10.1007/s11095-016-1889-1
- Jenie, S. N. A.**, Plush, S. E., & Voelcker, N. H. (2017). Singlet Oxygen Detection on a Nanostructured Porous Silicon Thin Film via Photonic Luminescence Enhancements. Langmuir, 8606-8613. doi:10.1021/acs.langmuir.7b00522
- Jenie, S. N. A.**, Prieto-Simon, B., & Voelcker, N. H. (2015). Development of l-lactate dehydrogenase biosensor based on

porous silicon resonant microcavities as fluorescence enhancers. Biosensors and Bioelectronics, 74, 637-643. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.bios.2015.07.025>

Kajihara, K. (2013). Recent advances in sol–gel synthesis of monolithic silica and silica-based glasses. Journal of Asian Ceramic Societies, 1(2), 121-133. doi:10.1016/j.jascer.2013.04.002

Kartika, A. E., Setiyanto, H., Manurung, R. V., **Jenie, S. N. A.**, & Saraswaty, V. (2021). Silver Nanoparticles Coupled with Graphene Nanoplatelets Modified Screen-Printed Carbon Electrodes for Rhodamine B Detection in Food Products. ACS Omega, 6(47), 31477-31484. doi:10.1021/acsomega.1c03414

Kim, T. G., An, G. S., Han, J. S., Hur, J. U., Park, B. G., & Choi, S. C. (2017). Synthesis of size controlled spherical silica nanoparticles via sol-gel process within hydrophilic solvent. Journal of the Korean Ceramic Society, 54(1), 49-54. doi:10.4191/kcers.2017.54.1.10

Kusumastuti, Y., Petrus, H. T. B. M., Yohana, F., Buwono, A. T., & Zaqina, R. B. (2017). Synthesis and characterization of biocomposites based on chitosan and geothermal silica. AIP Conference Proceedings, 1823(1), 020127-020121-020126. doi:10.1063/1.4978200

Licha, K., & Olbrich, C. (2005). Optical imaging in drug discovery and diagnostic applications. Advanced Drug Delivery Reviews, 57(8), 1087-1108. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.addr.2005.01.021>

Luong, J. H. T., Male, K. B., & Glennon, J. D. (2008). Biosensor technology: Technology push versus market pull. Biotechnology Advances, 26(5), 492-500. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.05.007>

Madhurantakam, S., Muthukumar, S., & Prasad, S. (2022). Emerging Electrochemical Biosensing Trends for Rapid Diagnosis of COVID-19 Biomarkers as Point-of-Care Platforms: A Critical

Review. ACS Omega, 7(15), 12467-12473. doi:10.1021/acsomega.2c00638

Maulana, M. Y., Raissa, R., Nurrudin, A., Andreani, A. S., Angelina, M., Septiani, N. L. W., Yuliarto, B., & **Jenie, S. N. A.** (2024). An ultra-sensitive SARS-CoV-2 antigen optical biosensor based on angiotensin converting enzyme 2 (ACE-2) functionalized magnetic-fluorescent silica nanoparticles. Nanotechnology, 35(20), 205702. doi:10.1088/1361-6528/ad27aa

Maulana, M. Y., Yuliarto, B., **Jenie, S. N. A.**, & Septiani, N. L. W. (2023). Comparative X-Ray Diffraction (XRD) Study on the Synthesis of Natural Based Magnetic Silica Nanoparticles. Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials, 35, 25-31. doi:10.4028/p-6d8vlt

Maulidia, A., Sujoto, V. S. H., Sudarmaja, D. P. A., Putri, J. J. E., **Jenie, S. N. A.**, Astuti, W., Supriyatna, Y. I., Warmada, I. W., Sutijan, Anggara, F., & Petrus, H. T. B. M. (2023). Kinetic Study of Lithium Leaching from Sidoarjo Mud Using Sulfuric Acid. Mining, Metallurgy & Exploration, 40(4), 1279-1288. doi:10.1007/s42461-023-00812-3

Mayer, M., & Baeumner, A. J. (2019). A Megatrend Challenging Analytical Chemistry: Biosensor and Chemosensor Concepts Ready for the Internet of Things. Chemical Reviews, 119(13), 7996-8027. doi:10.1021/acs.chemrev.8b00719

Nurkhaliza, F., Fathoni, A., Yati, I., Prastyo, M. E., **Jenie, S. N. A.**, & Andreani, A. S. (2023). UV-vis Study on β -Cyclodextrin as Dual Function for Synthesis AgNPs and Antibacterial Application. Macromolecular Symposia, 409(1), 2200182. doi:<https://doi.org/10.1002/masy.202200182>

Petrus, H. T. B. M., Fairuz, F. I., Sa'dan, N., Olvianas, M., Astuti, W., **Jenie, S. N. A.**, Setiawan, F. A., Anggara, F., Ekaputri, J. J., & Bendiyasa, I. M. (2021). Green geopolymer cement with dry activator from geothermal sludge and sodium hydroxide. Journal

of Cleaner Production, 293, 126143. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126143>

Petrus, H. T. B. M., Olvianas, M., Shafiyurrahman, M. F., Pratama, I. G. A. A. N., **Jenie, S. N. A.**, Astuti, W., Nurpratama, M. I., Ekaputri, J. J., & Anggara, F. (2022). Circular Economy of Coal Fly Ash and Silica Geothermal for Green Geopolymer: Characteristic and Kinetic Study. *Gels*, 8(4), 233.

Qhobosheane, M., Santra, S., Zhang, P., & Tan, W. (2001). Biochemically functionalized silica nanoparticles. *Analyst*, 126(8), 1274-1278. doi:10.1039/B101489G

Rafique, M., Tahir, M. B., Rafique, M. S., & Hamza, M. (2020). Chapter 1 - History and fundamentals of nanoscience and nanotechnology. In M. B. Tahir, M. Rafique, & M. S. Rafique (Eds.), *Nanotechnology and Photocatalysis for Environmental Applications* (pp. 1-25): Elsevier.

Reshetilov, A. N., & Bezborodov, A. M. (2008). Nanobiotechnology and biosensor research. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 44(1), 1-5. doi:10.1134/S0003683808010018

Shandilya, R., Bhargava, A., Bunkar, N., Tiwari, R., Goryacheva, I. Y., & Mishra, P. K. (2019). Nanobiosensors: Point-of-care approaches for cancer diagnostics. *Biosensors and Bioelectronics*, 130, 147-165. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.01.034>

Sifana, N. O., & **Jenie, S. N. A.** (2022). Fabrication and characterization of FITC-modified naturalbased silica nanoparticles using sol-gel method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 963(1), 012025. doi:10.1088/1755-1315/963/1/012025

Sifana, N. O., Melyna, Septiani, N. L. W., Septama, A. W., Manurung, R. V., Yuliarto, B., & **Jenie, S. N. A.** (2024). Detection of Methicillin-Resistant *Staphylococcus Aureus* using vancomycin conjugated silica-based fluorescent nanoprobe. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 307, 123643. doi:<https://doi.org/10.1016/j.saa.2023.123643>

- Silvia, P. Z., **Jenie, S. N. A.**, & Petrus, H. T. B. M. (2022). Tunable particle size synthesis of nanoclay from Sidoarjo geothermal mud via ultrasonic method. *AIP Conference Proceedings*, 2708(1). doi:10.1063/5.0123140
- Sutijan, S., Darma, S. A., Hananto, C. M., Sujoto, V. S. H., Anggara, F., **Jenie, S. N. A.**, Astuti, W., Mufakhir, F. R., Virdian, S., Utama, A. P., & Petrus, H. T. B. M. (2023). Lithium Separation from Geothermal Brine to Develop Critical Energy Resources Using High-Pressure Nanofiltration Technology: Characterization and Optimization. *Membranes*, 13(1), 86.
- Syauqi, M., Astuti, W., **Jennie, S. N. A.**, Petrus, H. T. B. M., Sujoto, V. S. H., & Mulyono, P. (2023). Modelling of Nano Silica Formation from Geothermal Silica Using Co-Precipitation Method. *Solid State Phenomena*, 345, 171-178. doi:10.4028/p-nVH0KL
- Tangkas, I. W. C. W. H., Sujoto, V. S. H., Astuti, W., **Jenie, S. N. A.**, Anggara, F., Utama, A. P., Petrus, H. T. B. M., & Sutijan. (2023). Synthesis of Titanium Ion Sieves and Its Application for Lithium Recovery from Artificial Indonesian Geothermal Brine. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 9(2), 613-624. doi:10.1007/s40831-023-00664-7
- Untoro, Y. M., Widyasari, D. A., Supriadi, E., & **Jenie, S. N. A.** (2020). The Effect of Rhodamine B on The Properties of Fluorescent Nanoparticles Derived from Geothermal Silica. *The Journal of Pure and Applied Chemistry Research*, 9(3), 171-171.
- Wicaksono, D. H. B., Utari, L., Wulan, N., Engel, D. J., Widjaja, S. T., Jovinka, X., Genilar, L. A., Setiawan, S. A., Yuliarto, B., Dipojono, H. K., **Jenie, S. N. A.**, Tursiloadi, S., Krismastuti, F. S. H., & Herbani, Y. (2018). Preliminary study on graphene/metal oxide nanoparticles-coated cotton fabrics for flexible gas sensor. *AIP Conference Proceedings*, 2024(1), 020063. doi:10.1063/1.5064349

Widyasari, D. A., Aulia, F., Andreani, A. S., Dewi, R. T., Septiani, N. L. W., Yuliarto, B., & **Jenie, S. N. A.** (2023). Synthesis of Silica Nanoparticle and Cd-Based Carboxyl Quantum Dots (SiNP@QDs) Conjugates as Biosensing Platform: A Preliminary Study. ITB Graduate School Conference, 2(2), 144-152.

Widyasari, D. A., Julyansyah, D., Kristiani, A., Widyaningrum, B. A., Petrus, H. T. B. M., Manurung, R. V., & **Jenie, S. N. A.** (2021). Conjugation of E. coli antibody with fluorescent natural silica-based nanoparticles: Preparation and characterization. AIP Conference Proceedings, 2382(1), 30009-30009. doi:10.1063/5.0060386

Widyasari, D. A., Kristiani, A., Randy, A., Manurung, R. V., Dewi, R. T., Andreani, A. S., Yuliarto, B., & **Jenie, S. N. A.** (2022). Optimized antibody immobilization on natural silica-based nanostructures for the selective detection of E. coli. RSC Advances, 12(33), 21582-21590. doi:10.1039/D2RA03143D

Wu, Y., Xue, P., Kang, Y., & Hui, K. M. (2013). Highly specific and ultrasensitive graphene-enhanced electrochemical detection of low-abundance tumor cells using silica nanoparticles coated with antibody-conjugated quantum dots. Analytical Chemistry, 85(6), 3166-3173. doi:10.1021/ac303398b

Wulandari, M., Hasanah, N., Yuliarto, B., Angelina, M., Manurung, R., **Jenie, S.**, & Andreani, A. (2023). A Rapid Colorimetric Method to Investigate SARS-CoV-2 by Using Gold Nanoparticles Capped with O-Hydroxybenzoic Acid.

Yüce, M., & Kurt, H. (2017). How to make nanobiosensors: Surface modification and characterisation of nanomaterials for biosensing applications. RSC Advances, 7(78), 49386-49403. doi:10.1039/c7ra10479k

DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

Buku/Bagian dari Buku (*Chapter*)

1. **Jenie, S.N.A.**, Kristiani, A., Petrus, H.T.B.M., Kusumastuti, Y. and Krismastuti, F.S.H, Preparation of Fluorescent Nanoparticles based on Natural Silica For Bioimaging, “Toward the Future of Asia: My Proposal” (volume 4), Edited by Junko Imanishi, 2019, The Japan Times Ltd, Japan, pp. 107-113.
2. Tursiloadi, S, Kristiani,A., **Jenie,S.N.A.**, Laksmono, J.A. (2013) "Nanocatalyst Sulfated TiO_2 and TiO_2-ZrO_2 Prepared by CO_2 Supercritical Extraction and Modified Gel." Nanotechnology In the Edge of Convergence, edited by Burhanuddin Y. Majlis, Kostadin G. Kostadinov, Arshad S. Bhatti, COMSATS-NAM S&T Publication, New Delhi, India
3. **Jenie, A** (2010) "Chapter 4: Women, Science and Technology - An overview from Indonesia", Empowerment of Women through Science and Technology Interventions, edited by Nirupama Prakash, Barbara Wejnert and Betty Mclellan, New Delhi, India, pp. 44-60

Jurnal Internasional

4. Raihan, M.F., Septiani, N.L.W., Gumilar, G., Manurung, R.V., **Jenie, S.N.A.**, Nuruddin, A. and Yuliarto, B., (2025) Developing point-of-care diagnosis using electrochemical biosensor: Mosquito-borne disease. Sensors and Actuators Reports, 9, p.100261.
5. Sudarmaja, D.P.A., Suryanaga, C.E., Sujoto, V.S.H., **Jenie, S.N.A.**, Astuti, W., Anggara, F., Prasetya, A. and Petrus, H.T.B.M (2025) Enhancing lithium concentration performance from

- synthetic geothermal brine through electro-nanofiltration method. Chemical Engineering Journal, p.164134.
6. Wulandari, M., Hasanah, N., Yuliarto, B., Angelina, M., Manurung, R.V., **Jenie, S.N.A** & Andreani, AS (2025) A rapid colorimetric method to investigate SARS-CoV-2 by using gold nanoparticles capped with O-hydroxybenzoic acid, International Journal of Technology, vol. 16, no. 2, pp. 652-661
 7. Kurniasari, M., Petrus, H.T.B.M., **Jenie, S.N.A.** and Kusumastuti, Y. (2025) Facile Synthesis and Characterization of Magnetite Mesoporous Silica Nanoparticles from Local Iron Sand. International Journal of Technology, 16(2), pp.448-457.
 8. Suratno, S., Windarsih, A., Anggraeni, A. S., Alam, L. P. M., Warmiko, H. D., **Jenie, S. N. A.**, Novianty, H., Ulumuddin, Y. I., Marmita, A., Ayuni, N. P. S., Indrianingsih, A. W., & Rohman, A. (2025). Untargeted fast proteomics analysis using UPLC-Orbitrap HRMS for halal authentication of meat and meat products. Journal of Proteomics, 312, 105369
 9. **Jenie, S. N. A.**, Kristiani, A., Widjaya, R. R., Kusumastuti, Y., Prihutami, P., Astuti, W., Anggara, F., Sari, S. R., Wibowo, Y. G., & Petrus, H. T. B. M. (2025). From geothermal sources to advanced applications: A review of sustainable silica nanomaterials. Materials Today Communications, 43, 111635.
 10. Apriyani, F., Sari, S.R., Petrus, H.T.B.M., Angelina, M., Manurung, R.V., Septiani, N.L.W., Yuliarto, B. and **Jenie, S.N.A.** (2025) A fluorescence nanosensor based on modified sustainable silica for highly sensitive detection of the SARS-CoV-2 IgG antibody. Nanoscale, 17(9), pp.5438-5446.
 11. Sujoto, V.S.H., Prasetya, A., Petrus, H.T.B.M., Astuti, W., **Jenie, S.N.A.**, Anggara, F., Utama, A.P., Kencana, A.Y., Singkuang, D.E.S., Sumartha, A.G.A. and Sutijan, (2024) Advancing Lithium Extraction: A Comprehensive Review of Titanium-Based

- Lithium-Ion Sieve Utilization in Geothermal Brine. Journal of Sustainable Metallurgy, 10(4), pp.1959-1982.
12. Rahayu, D.S., Kusumastuti, Y., Astuti, W., **Jenie, S.N.A.** and Petrus, H.T.B.M. (2024) Recycling of electric arc furnace dust waste as a precursor in pharmaceutical grade zinc oxide synthesis. Circular Economy and Sustainability, 4(1), pp.489-501.
 13. Elmaria, F.A., Aulia, F., Hidayati, L.N., Kristiani, A., Sudiyarmanto, Kusumastuti, Y., **Jenie, S.N.A.** and Petrus, H.T.M.B. (2024). Facile synthesis of magnetic-fluorescent iron oxide-geothermal silica core/shell nanocomposites via modified sol-gel method. Journal of Sol-Gel Science and Technology, pp.1-10.
 14. Kristiani, A., Takeishi, K., **Jenie, S.N.A.** and Petrus, H.T.B.M. (2024). Bimetallic Ni-Fe Supported by Gadolinium Doped Ceria (GDC) Catalyst for CO₂ Methanation. Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis, 19(1), pp.99-107.
 15. Sifana, N. O., Septiani, N. L. W., Septama, A. W., Manurung, R. V., Yuliarto, B., & **Jenie, S. N. A.** (2024). Detection of Methicillin-Resistant Staphylococcus Aureus using vancomycin conjugated silica-based fluorescent nanoprobe. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 307, 123643.
 16. Maulana, M.Y., Raissa, R., Nuruddin, A., Andreani, A.S., Angelina, M., Septiani, N.L.W., Yuliarto, B. and **Jenie, S.N.A.** (2024). An ultra-sensitive SARS-CoV-2 antigen optical biosensor based on angiotensin converting enzyme 2 (ACE-2) functionalized magnetic-fluorescent silica nanoparticles. Nanotechnology.
 17. Dewi, K. K., Septiani, N. L. W., Wustoni, S., Nugraha, **Jenie, S. N. A.**, Manurung, R. V., & Yuliarto, B. (2023). One-Dimensional HKUST-1-Decorated Glassy Carbon Electrode for the Sensitive Electrochemical Immunosensor of NS1 Dengue Virus Serotype-3. ACS Omega.
 18. Syauqi, M., Astuti, W., **Jenie, S. N. A.**, Petrus, H. T. B. M., Sujoto, V. S. H., & Mulyono, P. (2023). Modelling of Nano

Silica Formation from Geothermal Silica Using Co-Precipitation Method. In Solid State Phenomena, 345, pp. 171–178

19. Rahayu, D.S., Kusumastuti, Y., Astuti, W., **Jenie, S.N.A** & Petrus, H.T.B.M, 2023, Recycling of Electric Arc Furnace Dust Waste as a Precursor in Pharmaceutical Grade Zinc Oxide Synthesis. Circular Economy & Sustainability, 4(1), pp. 489-501
20. Maulidia, A., Sujoto, V.S.H., Sudarmaja, D.P.A., Putri, J.J.E, **Jenie, S.N.A**, Astuti, W, Supriyatna, Y.I, Warmada, I.W, Sutijan, Anggara, F, Petrus, H.T.B.M, 2023, Kinetic Study of Lithium Leaching from Sidoarjo Mud Using Sulfuric Acid. Mining, Metallurgy & Exploration 40, 1279–1288.
21. Hasanah, N.; R.V. Manurung; **S.N.A. Jenie**; Indriyati; M.E. Prasty; A.S. Andreani, The effect of size control of Gold Nanoparticles Stabilized with α -cyclodextrin and β -cyclodextrin and their antibacterial activities. Materials Chemistry and Physics, 2023. 302: p. 127762
22. S. Henning, R. Lach, H. Schönherr, F. Nurkhaliza, A. Fathoni, I. Yati, M. E. Prasty, **S. N. A. Jenie**, A. S. Andreani, UV-vis Study on β -Cyclodextrin as Dual Function for Synthesis AgNPs and Antibacterial Application. Macromol. Symp. 2023, 409, 2200182.
23. Tangkas, I.W.C.W.H., Sujoto, V.S.H., Astuti, W., **Jenie, S.N.A.**, Anggara, F., Utama, A.P., Petrus, H.T.B.M. and Sutijan, 2023. Synthesis of Titanium Ion Sieves and Its Application for Lithium Recovery from Artificial Indonesian Geothermal Brine. Journal of Sustainable Metallurgy, 9(2), pp.613-624.
24. Alva, S., Septyanda, P., Burhanudin, A., Khaerudini, D.S., **Jenie, S.N.A.**, Sundari, R. and Suhud, K. (2023) Development of Nitrate-Ion Selective Electrode (NO_3 -ISE) Based on Carbon from Disposal Battery. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 12(5), p.057010.
25. Apriyani, F., Julyansyah, D., Angelina, M., Randy, A., Manurung, R. V., Yuliarto, B., & **Jenie, S. N. A.** (2023). Preliminary Study

- of Modified Fluorescent Silica Nanoparticles for the Detection of IgY Antibody. In Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials, Vol. 35, pp. 19–24.
26. Maulana, M. Y., Yuliarto, B., **Jenie, S. N. A.**, & Septiani, N. L. W. (2023). Comparative X-Ray Diffraction (XRD) Study on the Synthesis of Natural Based Magnetic Silica Nanoparticles. In Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials, Vol. 35, pp. 25–31.
 27. Sutijan, S., Darma, S.A., Hananto, C.M., Sujoto, V.S.H., Anggara, F., **Jenie, S.N.A.**, Astuti, W., Mufakhir, F.R., Virdian, S., Utama, A.P. and Petrus, H.T.B.M., 2023. Lithium Separation from Geothermal Brine to Develop Critical Energy Resources Using High-Pressure Nanofiltration Technology: Characterization and Optimization. Membranes, 13(1), p.86.
 28. Timotius, D., Kusumastuti, Y., Omar, R., Harun, R., Mustapa Kamal, S.M., **Aisyiyah Jenie, S.N.** and Bayu Murti Petrus, H.T., 2022. The Study of Methylene Blue Loading into Chitosan-graft-Maleic Sponges. International Journal of Technology, 13(8).
 29. Petrus, H.T.B.M., Olvianas, M., Shafiyurrahman, M.F., Pratama, I.G.A.A.N., **Jenie, S.N.A.**, Astuti, W., Nurpratama, M.I., Ekaputri, J.J. and Anggara, F., 2022. Circular Economy of Coal Fly Ash and Silica Geothermal for Green Geopolymer: Characteristic and Kinetic Study. Gels (Basel, Switzerland), 8(4), p.233.
 30. Widyasari DA, Kristiani A, Randy A, Manurung RV, Dewi RT, Andreani AS, Yuliarto B, **Jenie SNA**, Optimized Antibody Immobilization on Natural-based Silica Nanostructure for Selective Detection of E. coli, RSC Advances 2022, 12 (33), 21582-21590
 31. Petrus, H.T.B.M., Olvianas, M., Shafiyurrahman, M.F., Pratama, I.G.A.A.N., **Jenie, S.N.A.**, Astuti, W., Nurpratama, M.I., Ekaputri, J.J. and Anggara, F., Circular Economy of Coal Fly Ash and Silica

Geothermal for Green Geopolymer: Characteristic and Kinetic Study. Gels, 2022, 8(4), p.233.

32. Kartika AE, Setiyanto H, Manurung RV, **Jenie SNA**, Saraswaty V, Silver Nanoparticles Coupled with Graphene Nanoplatelets Modified Screen-Printed Carbon Electrodes for Rhodamine B Detection in Food Products, ACS Omega 2021 6 (47), 31477-31484
33. Petrus HTBM, Fairuz FI, Sa'dan N, Olvianas M, Astuti W, **Jenie SNA**, Setiawan F.A., Anggara F, Ekaputri J.J., Bendiyasa I. M., Green geopolymer cement with dry activator from geothermal sludge and sodium hydroxide, Journal of Cleaner Production 2021 293, 126143
34. **Jenie, S.N.A.**, Krismastuti, F.S.H, Udin, Z, Artanti, N, Dewi, R. T. Untoro, Y. M. and Kusumastuti, Y, Rapid Fluorescence Quenching Detection of Escherichia coli Using Natural Silica-Based Nanoparticles, MDPI Sensors, 2021, 21, no. 3: 881. <https://doi.org/10.3390/s21030881>
35. **Jenie, S. N. A.**, Kristiani, A., Sudiyarmanto, Khaerudini, D. S., & Takeishi, K. Sulfonated magnetic nanobiochar as heterogeneous acid catalyst for esterification reaction. Journal of Environmental Chemical Engineering 2020, 8(4), 103912. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103912>
36. **Jenie, S.N.A.**, Krismastuti, F.S.H., Ningrum, Y.P., Kristiani, A, Yunianti M.D., Astuti, W and Petrus, H. T. B.M., Geothermal Silica-based Fluorescent Nanoparticles for the Visualization of Latent Fingerprints, Materials Express, 2020, 10(6), 258-266.
37. **Jenie, S. N. A.**; Plush, S. E. and Voelcker, N. H., Singlet oxygen detection on a nanostructured porous silicon thin film via photonic luminescence enhancements. Langmuir 2017, 33, 35, 8606-8613
38. **Jenie, S. N. A.**; Hickey, S., M.; Du, Z.; Sebben, D.; Brooks, D., A.; Voelcker, N. H. and Plush, S. E., A europium-based ‘off-on’

colourimetric detector of singlet oxygen. Inorganica Chimica Acta 2017, 462: 236-240.

39. **Jenie, S. N. A.**; Plush, S. E. and Voelcker, N. H., Recent Advances on Luminescent Enhancement-Based Porous Silicon Biosensors. Pharmaceutical research 2016, 33 (10), 2314–2336.
40. **Jenie, S. N.A.**; Prieto-Simon, B. and Voelcker, N. H., Development of l-lactate dehydrogenase biosensor based on porous silicon resonant microcavities as fluorescence enhancers. Biosensors and Bioelectronics 2015, 74, 637-643.
41. **Jenie, S. N. A.**; Du, Z.; McInnes, S. J. P.; Ung, P.; Graham, B.; Plush, S. E and Voelcker, N. H., Biomolecule detection in porous silicon based microcavities via europium luminescence enhancement. Journal of Materials Chemistry B 2014, 2, 7694-7703.
42. **Jenie, S. N. A.**; Pace, S.; Sciacca, B.; Brooks, R. D.; Plush, S. E and Voelcker, N. H., Lanthanide Luminescence Enhancements in Porous Silicon Resonant Microcavities. ACS Applied Materials & Interfaces 2014, 6 (15), 12012-12021.
43. **Jenie, S.N.A.**, Kristiani, A. and Kusuma, D.S. Sol-Gel Preparation of Sulfated Titania As Nickel Supporting Material. Asian Journal of Science and Technology, 2012, 4 (11), 040-044
44. Kristiani, A., **Jenie, S. N. A.**, Laksmono, J.A and Tursiloadi, A. “Novel Sulfated TiO_2-ZrO_2 Mixed Oxide Prepared by Modified Sol-Gel Method”, International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies, 2010, 1 (1), 38-42.
45. **Jenie, S. N. A.**, Kusuma, D.S., Kristiani, A., Laksmono, J.A. and Tursiloadi, A. “Preparation and Characterization of Sulfated Titania Catalysts for the Isomerization of Citronellal “, International Journal of Basic and Applied Sciences, 2010, 10 (6), 5-10.

46. Haerudin, H., Pramono, A. W., Kusuma, D.S., **Jenie, A.**, Voelcker, N. H. and Gibson, C. "Preparation and Characterization of Chitosan/Montmorillonite (MMT) Nanocomposite Systems", International Journal of Technology 2010, 1(1), 65-73.
- 47.
48. Jurnal Nasional
49. Prasetya, A., Mulyono, P., Sujoto, V.S.H., Warmita, H.K., Perdana, I., Sutijan, S., Astuti, W., Sumardi, S., **Jenie, S.N.A.**, (2024). An extensive analysis and examination of techniques to enhance the efficiency of water extraction from wastewater generated during the recycling of nickel manganese cobalt (NMC) batteries using reverse osmosis membrane technology. *Jurnal Rekayasa Proses* 18, 74–88
50. Sujoto, V., Tangkas, I., Astuti, W., Sumardi, S., **Jenie, S.N.A.**, Tampubolon, A., Syamsumin, S., Utama, A., Petrus, H., & Kusumastuti, Y. (2023). Penentuan kondisi optimum pembuatan silica gel menggunakan silika geothermal dengan metode sol-gel. *Jurnal Rekayasa Proses*, 17(2), 122-128.
51. Elmaria FA, **Jenie SNA**, Magnetic nanoparticles based on natural silica as a methyl ester forming acid catalyst, *Jurnal Kimia Terapan Indonesia* 2021,23 (2), 49-54
52. **Jenie, A**, Synthesis of Phenolic Formaldehyde Resole Resin as Wood Adhesive using Bio Oil. *Widyariset*, 2009, 12 (1), 41-48

Prosiding Internasional

53. Volkandari, S.D., Rohman, A., **Jenie, S.N.A.**, Cahyadi, M. and Erwanto, Y., 2024, Advancements in DNA analysis for distinguishing wild boar and domestic pig: a mini-review on research developments for food authentication studies. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 1377, No. 1, p. 012025

54. Hanifah, N., Septiani, N.L.W., Nugraha, N., **Jenie, S.N.A.** and Yuliarto, B., 2024, Zeolitic imidazolate framework 8 (ZIF-8) as sensing material for electrochemical detection of dopamine. In AIP Conference Proceedings, Vol. 3073, No. 1, AIP Publishing.
55. Airyn, A.E., Apriyani, F., Petrus, H.T., Angelina, M., Kristiani, A., Pambudi, F.I. and **Jenie, S.N.A.**, 2024, Preliminary Study on the Modification of Quantum Dots/Geothermal Silica Nanocomposites with Breast Cancer Antibody (MUC-1). In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 2705, No. 1, p. 012014). IOP Publishing.
56. Kristiani, A., Wiyono, W., Prasetyo, A., Petrus, H.T.B.M., **Jenie, S.N.A.**, Dwiatmoko, A.A., Hidayati, L.N., Aulia, F., Sudiyarmanto, S. and Dahnum, D., 2024. Sol-gel synthesis of zirconia-based nanoparticles from the side product of tin mining. In E3S Web of Conferences (Vol. 543, p. 02013). EDP Sciences.
57. Putra, A.M.J., Fadila, N., Mujahidah, Z.S., Mansur, D., **Jenie, S.N.A.**, Herbani, Y., Anwar, Y. and Sugiarto, A.T., 2024. Nanodots from Palm Kernel Cake. In E3S Web of Conferences (Vol. 503, p. 02001). EDP Sciences.
58. Sudiyarmanto, S., Dahnum, D., **Jenie, S.N.A.**, Aulia, F., Kristiani, A. and Hidayati, L.N., 2023. Nickel supported zeolitic imidazolate framework-8 (Ni/ZIF-8) catalyst: Synthesis and characterization. In AIP Conference Proceedings, Vol. 2902, No. 1
59. Kristiani, A., Hidayati, L.N., Aulia, F., Dwiatmoko, A.A., Rinaldi, N., **Jenie, S.N.A.** and Takeishi, K., 2023. Consecutive sol-gel synthesis of Cu-Zn/Al₂O₃ catalyst for CO₂ Hydrogenation. In AIP Conference Proceedings, Vol. 2902, No. 1
60. Kartikowati, C.W., Sari, A.L., Sari, A.A., Muchlis, M., Susanti, E., Poerwadi, B., Supriyon, S., **Jenie, S.N.A.**, Suhendi, A., Arif, A.F. and Arutanti, O., 2022, December. Preparation of TiO₂-coated glass and their application for photodecompose organic dye. In AIP Conference Proceedings, Vol. 2493, No. 1

61. Andreani, A. S., Tachrim, Z. P., Kunarti, E. S., Hashimoto, T., Hayashita, T., **Jenie, S. N.A**, & Santosa, S. J., 2022. The effect of α -cyclodextrin and β -cyclodextrin as stabilizing agents on the size of gold nanoparticles. In AIP Conference Proceedings, Vol. 2493, No. 1
62. Silvia, P. Z., **Jenie, S. N.A** & Petrus, H. T. B. M. (2022). Tunable particle size synthesis of nanoclay from Sidoarjo geothermal mud via ultrasonic method. In AIP Conference Proceedings, Vol. 2708, No. 1
63. Widyasari, D. A., Aulia, F., Andreani, A. S., Dewi, R. T., Septiani, N. L. W., Yuliarto, B., & **Jenie, S. N. A.** (2023). Synthesis of Silica Nanoparticle and Cd-Based Carboxyl Quantum Dots (SiNP@QDs) Conjugates as Biosensing Platform: A Preliminary Study. ITB Graduate School Conference, 2(2), 144-152.
64. Sifana NO, **Jenie SNA**, Fabrication and characterization of FITC-modified naturalbased silica nanoparticles using sol-gel method, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2022 963 (1), 012025
65. Wicaksono, D. H. B.; Utari, L.; Wulan, N.; Engel, D. J.; Widjaja, S. T.; Jovinka, X.; Genilar, L. A.; Setiawan, S. A.; Yuliarto, B.; Dipojono, H. K.; **Jenie, S. N. A.**; Tursiloadi, S.; Krismastuti, F. S. H.; Herbani, Y., Preliminary study on graphene/metal oxide nanoparticles-coated cotton fabrics for flexible gas sensor. AIP Conference Proceedings 2018, 2024 (1), 020063.
66. **Jenie, S. N. A.**; Ghaisani, A.; Ningrum, Y. P.; Kristiani, A.; Aulia, F.; Petrus, H. T. B. M., Preparation of silica nanoparticles from geothermal sludge via sol-gel method. AIP Conference Proceedings 2018, 2026 (1), 020008.
67. **Jenie, S. N. A.**; Kristiani, A.; Kustomo; Simanungkalit, S.; Mansur, D., Preparation of nanobiochar as magnetic solid acid catalyst by pyrolysis-carbonization from oil palm empty fruit bunches. AIP Conference Proceedings 2017, 1904 (1), 020018.

Prosiding Nasional

68. Widyasari, D. A., Aulia, F., Andreani, A. S., Dewi, R. T., Septiani, N. L. W., Yuliarto, B., & **Jenie, S. N. A.** (2023). Synthesis of Silica Nanoparticle and Cd-Based Carboxyl Quantum Dots (SiNP@QDs) Conjugates as Biosensing Platform: A Preliminary Study. ITB Graduate School Conference, 2(2), 144-152.

DAFTAR PATEN

Paten Tersertifikasi

1. “Pembuatan Silika Magnetik Nanopartikel dari Mineral Silika Alam”, 2024, No. IDP000093456, Indonesia
2. “Pembuatan Nanopartikel Silika dari Lumpur Geothermal dengan Metode Presipitasi”, 2024, No. IDP000093129, Indonesia
3. “Pembuatan Geopolimer dari Fly-Ash dengan Pencampuran Kering menggunakan Silika Geothermal dan NaOH sebagai Aktivator”, 2023, No. IDP000090836, Indonesia
4. “Proses Pembuatan katalis Heterogen berbasis Nanomaterial Biochar-Magnetik dari Limbah Kelapa Sawit”, 2021, No. IDP000075313, Indonesia
5. “Proses Pembuatan Nanopartikel Silika Berfluorosensi Dari Limbah Lumpur Silika Alam Dan Metode Penggunaannya”, 2021, No. IDP000074222, Indonesia
6. “Proses Pembuatan Material Nanosilika dari Limbah Lumpur Silika Alam”, 2020, No. IDP000072635, Indonesia

Paten Terdaftar

7. “Metode Pembuatan dan Karakteristik Katalis Mono-dan Bi-metal Berbasis Nickel/ZIF-8 untuk Mengubah Minyak Kelapa Sawit menjadi Biohidrokarbon Diesel Berkualitas Tinggi”, 2024, P00202414685
8. “Metode Pembuatan Material Komposit karbon Nanofiber Berbasis Lignin dan Produk yang Dihasilkannya”, 2024, P00202414571

9. "Metode Pembuatan Katalis Logam Oksida Turunan Zeolitic Imidazole Frameworks-8 (ZIF-8) Termodifikasi Kobalt untuk Reaksi Deoksigenasi Asam Laurat Menjadi Rantai Hidrokarbon", 2024, P00202411151, Indonesia
10. "Ekstraksi Logam Silikon dari Silika Geothermal dengan Metode Elektrolisis", 2024, P00202401393, Indonesia
11. "Proses Pembuatan Nanopartikel Zirkonia dari Mineral Ikutan Tambang Timah dan Karakteristik Produk yang Dihasilkan", 2024, P00202401902, Indonesia
12. "Material sebagai Pengindera pada Imunosensor Elektrokimia untuk Deteksi Antigen NS-1 Virus Dengue Serotype 3 (DENV-3) berupa Bimetal Tembaga-Nikel-1,3,5-Benzene Trikaboksilat Termodifikasi Trietanolamin dan Metode Sintesisnya", 2023, P00202301878, Indonesia
13. "Primer Spesifik Gen NADH-Dehydrogenase 4L (ND-4L) untuk Deteksi DNA Babi pada Produk Makanana dan Metode Deteksinya", 2023, P00202314617, Indonesia
14. "Ekstraksi Litium dari Brine dengan Metode Electronanofiltration", 2023, P00202307521, Indonesia
15. "Reaktor Fotokatalisis sebagai Pengolah Limbah Cair dengan Sinar Matahari", 2023, S00202305123, Indonesia
16. "Pembuatan Silika Magnetik Nanopartikel dari Mineral Silika Alam", 2022, No. P00202203801, Indonesia
17. "Pembuatan Nanopartikel Silika dari Lumpur Geothermal dengan Metode Presipitasi", 2021, No. P00202109916, Indonesia
18. "Pembuatan Silika Magnetik Nanopartikel dari Silika Alam", 2021, No. P00202203801, Indonesia

19. "Proses Pembuatan Vanilin dari Isoeugenol melalui Reaksi Oksidasi dengan Menggunakan Katalis Oksida Tembaga Berpenyangga Zeolit Hierarkis (CuO/Zeolit)", 2019, No. P00201904602, Indonesia
20. "Komposisi Lapisan Layak Makan Berbasis Pati Sagu", 2019, No. S00201902706, Indonesia
21. "Proses Pembuatan Metil Ester Menggunakan Katalis Asam Padat Berbasis Nanomaterial Biochar-Magnetik", 2018, No. P00201809263, Indonesia

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. Data Pribadi

Nama	: Siti Nurul Aisyiyah Jenie, Ph.D
Tempat Tanggal Lahir	: Surakarta, 16 Desember 1978
Anak ke	: Pertama dari tiga bersaudara
Nama Ayah Kandung	: Prof. Umar Anggara Jenie, M.Sc., Ph.D
Nama Ibu Kandung	: Titiek Setyanti Jenie
Nama Suami	: Adi Triyoga, S.E, M.T
Jumlah Anak	: 2 (dua)
Nama Anak	: 1) Azzahra Bilqish Aditriyoga 2) Azmina Salmaa Aditriyoga
Nama Instansi	: Pusat Riset Kimia, Organisasi Riset Nanoteknologi & Material – BRIN
Judul Orasi	: Nanoteknologi Dan Modifikasi Kimia Silika Sebagai Solusi Untuk Material Biosensor Yang Berkelanjutan
Ilmu	: Kimia
Bidang Kepakaran	: Kimia Fisika
Kepakaran	: Nanoteknologi dan Kimia Material
Nomor SK Pangkat Terakhir 2023	: Nomor 3433/I/KP/2023, tanggal 30 Maret
Nomor SK Peneliti Utama	: Nomor 2/M Tahun 2023, tanggal 9 Januari 2023

B. Pendidikan Formal

No	Jenjang	Nama Sekolah/ Universitas	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
1.	SD	Forrest Primary School SD Negeri Percobaan II	Canberra, Australia Yogyakarta, DIY	1990
2.	SMP	SMP Negeri 5	Yogyakarta, DIY	1993
3.	SMA	SMA Negeri 8	Yogyakarta, DIY	1996
4.	S-1	Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada (UGM)	Yogyakarta	2001
5.	S-2	Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung (ITB) Chemical Technology, Rijksuniversiteit Groningen (Dual Degree)	Bandung Groningen, Belanda	2003
6.	S-3	Materials and Minerals Sciences, University of South Australia	Adelaide, Australia	2016

C. Pendidikan Nonformal

No	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
1.	Pra Jabatan, Gol III	Cibinong	2008
2.	Fungsional Peneliti Tingkat Pertama LIPI	Cibinong	2008

No	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
3.	Pelatihan Drafting Paten Tingkat Dasar	Cibinong	2008
4.	English for Academic Purposes and Foundation Studies by Australia Awards	Jakarta	2011
5.	Wound Management Innovation CRC National Workshop	Gold Coast, Australia	2011
6.	Wound Management Innovation CRC National Workshop	Adelaide, Australia	2013
7.	Diklat Jabatan Fungsional Peneliti Tingkat Lanjutan	Cibinong	2017
8.	Workshop on Chemical Analysis and Material Characterizations	Serpong	2017
9.	Training Workshop on Biosensor Development and Application for Monitoring of Contaminants in Food by MARDI	Putrajaya, Malaysia	2018
10.	Pelatihan Reviewer Penelitian Angkatan I 2019 oleh Kemenristekdikti	Serpong	2019

No	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
11.	Sertifikasi Asesor Jabatan Fungsional Peneliti oleh LIPI	Serpong	2019

D. Jabatan Struktural

No	Jabatan	Tahun
1	-	

E. Jabatan Fungsional

No	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1	Peneliti Ahli Muda III/d	1 September 2016
2	Peneliti Ahli Madya IV/a	1 Agustus 2019
3	Peneliti Ahli Utama IV/d	9 Januari 2023

F. Penugasan Khusus Nasional/Internasional

No	Jabatan Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
1.	Ketua 4 th International Symposium on Applied Chemistry (ISAC)	Kepala Pusat Penelitian Kimia LIPI	2018
2.	Ketua Periset Kegiatan INSINAS Pengembangan Sistem Deteksi E-Coli Berbasis Nanopartikel Silika Alam: Uji Kulaitas Pangan Fungsional Untuk Balita	Kepala Pusat Penelitian Kimia LIPI	2018-2019

3.	Ketua Kelompok Penelitian Kimia Material dan Katalisis	Kepala Pusat Penelitian Kimia LIPI	2019-2020
4.	Ketua Periset Kegiatan DIPA IPT LIPI 2020 Pengembangan Sistem Deteksi Cepat (Rapid Test) nCov-2019 berbasis Nanopartikel Fluoresensi dalam Lateral Flow ImmunoAssay (LFIA) Kit	Kepala Pusat Penelitian Kimia LIPI	2020-2021
5.	Anggota PME Pusat Penelitian Kimia – LIPI	Kepala Pusat Penelitian Kimia LIPI	2020
6.	Ketua Periset Kegiatan JFS DIPI/RISPRO-KI LPDP “NAPARBA”	Kepala Pusat Penelitian Kimia LIPI/BRIN	2020–2023
7.	Editor-in-Chief Jurnal Kimia Terapan Indonesia (JKTI)	Kepala Pusat Penelitian Kimia LIPI	2019–2021
8.	Ketua Periset Kegiatan Indonesia Toray Science Foundation (ITSF) “Surface Modification of Natural- based Bifunctional Silica Nanoparticles with Enzyme Receptor for Highly Sensitive Point-of-Care of COVID-19”	Kepala Pusat Penelitian Kimia LIPI	2021
9.	Anggota TP2U Pusat Riset Kimia Maju	Kepala Pusat Riset Kimia Maju BRIN	2021–2023
10.	Asesor Jabatan Fungsional Peneliti	Kepala BOSDM BRIN	2019–sekarang

11.	Periset Program Fasilitasi Pusat Kolaborasi Riset BRIN-ITB Biosensor dan Biodivais untuk Pengendalian Penyakit Tropis dan Wabah Penyakit	Fakultas Teknologi Industri ITB	2022– 2023
12.	Ketua Periset Kegiatan Rumah Program ORNM “Modifikasi Nanopartikel Super-Paramagnetik berbasis Silika Alam melalui Metode Reverse- Microemulsion sebagai Platform Deteksi Optik Bakteri Antibiotic- Resistant”	Kepala Pusat Riset Kimia Maju BRIN	2023
13.	Ketua Periset Skema Riset & Inovasi untuk Indonesia Maju (RIIM) “Pengembangan Nanoprobe berbasis Silika Alam sebagai Platform Biosensor untuk Deteksi Optik Bakteri Patogen dan DNA Kontaminan Makanan Halal”	Kepala Pusat Riset Kimia Maju BRIN	2023– 2024
14	Narasumber kuliah tamu UK-Indonesia Biomaterials Partnership Symposium di Teknik Kimia UGM dengan topik “Materials for Biosensor Applications”	Kepala Pusat Riset Kimia Maju BRIN	2025

G. Keikutsertaan dalam Kegiatan Ilmiah

No	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
1.	International Workshop on Empowerment of Women through Science and Technology Interventions	Pemakalah	Centre for Science & Technology of the Non-Aligned and Other Developing Countries – NAM S&T (Tehran, Iran)	2008
2.	Wound CRC National Workshop	Pemakalah	WOUND MANAGEMENT INNOVATION CRC (Gold Coast, Australia)	2011
3.	Wound CRC National Workshop	Pemakalah	WOUND MANAGEMENT INNOVATION CRC (Adelaide, Australia)	2013
4.	22 nd Annual Conference of the Australasian Society for Biomaterials and Tissue Engineering (ASBTE)	Pemakalah	THE AUSTRALIAN SOCIETY FOR BIOMATERIALS AND TISSUE ENGINEERING (Barossa Valley, Australia)	2013
5.	Basic and Applied Sciences Interdisciplinary Conference (BASIC) 2017	Pemakalah	Fakultas MIPA, Universitas Indonesia (Depok, Indonesia)	2017

6.	3 rd International Symposium on Applied Chemistry (ISAC)	Pemakalah	Pusat Penelitian Kimia LIPI (Jakarta, Indonesia)	2017
7.	3 rd MRS-ID Meeting	Pemakalah	MATERIALS RESEARCH SOCIETY INDONESIA (Bali, Indonesia)	2018
8.	“International Women’s Day 2018” Public Discussion	Pembicara Tamu	Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (Jakarta, Indonesia)	2018
9.	International Conference on Chemistry, Chemical Process and Engineering (IC3PE)	Pemakalah	Universitas Islam Indonesia (Yogyakarta, Indonesia)	2018
10.	The 4 th Asia Future Conference (AFC)	Pemakalah	SEKIGUCHI GLOBAL RESEARCH ASSOCIATION (Seoul, Korea Selatan)	2018
11.	Talkshow MetroTV, Promosi ISE-LIPI, 2018	Narasumber	MetroTV, Indonesia	2018

11.	The 6 th International Conference on Biosensing Technology	Pemakalah	Elsevier (Kuala Lumpur, Malaysia)	2019
12.	The 8 th Asia Pacific Congress on Catalysis	Pemakalah	CHULALONGKORN UNIVERSITY – THAILAND (Bangkok, Thailand)	2019
13.	Webinar Biosensor untuk Deteksi Cepat COVID-19	Narasumber	Universitas Jember (Webiner online)	2020
14.	Sharing Session Riset Covid-19 Kluster Pengujian Covid-19	Narasumber	LIPI (Webinar online)	2020
15.	Webinar OWSD Indonesia Talk Series: Pendekatan Nanoteknologi dalam Pengembangan Platform Deteksi Bakteri	Narasumber	OWSD Indonesia Chapter (Webiner online)	2021

16.	Webinar “Pengembangan Material Alami dan Material Hayati sebagai Obat Kanker“ : Silika Mesopori berbasis Mineral Alam: Modifikasi dan Potensinya sebagai Platform Deteksi Biomarker Kanker	Narasumber Institut Teknologi Sumatera (ITERA) (Online)	2021
17.	International Virtual Course on Sensors Technology in the Era of Industry 4.0 and IOT: From Principle to Applications	Pembicara Tamu Institut Teknologi Bandung (ITB) (Online)	2021

18.	Forum Presentasi Ilmiah Riset dan Inovasi ORNAMAT Seri #5	Narasumber	ORN M BRIN (Online)	2022
19.	NanoTalk: Nanoparticles and organic electrochemical transistors as biosensor platforms	Pembicara Tamu	Ikatan Ilmuwan Indonesia Internasional – I4 (Online)	2022
20.	Bio-Nano-Summerschool 2022	Pemakalah Kunci	Siegen University, Jerman (Hirschgegg, Austria)	2022
21.	Ngajitekprop #04: Deteksi Keamanan dan Pemalsuan Pangan Melalui Pendekatan Teknologi Terkini	Narasumber	OR Pangan & Pertanian - BRIN (Online)	2022

22.	International Virtual Course: Sensor Technology in the Era of Industry 4.0 and IOT: From Principle to Applications	Pembicara Tamu	Institut Teknologi Bandung (ITB) (Online)	2022
23.	The 8 th International Symposium on Applied Chemistry (ISAC)	Pemakalah Kunci	Pusat Riset Kimia Maju – BRIN (Serpong, Indonesia)	2022
24.	The 1 st International Conference on Sensors Technology	Pemakalah Kunci	Institut Teknologi Bandung (Bali, Indonesia)	2023

H. Keterlibatan dalam Pengelolaan Jurnal Ilmiah

No	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/Tugas	Tahun
1.	<i>Applied Catalysis B: Environmental</i>	Elsevier	Mitra Bestari	2018
2.	Jurnal Kimia Terapan Indonesia (JKTI)	LIPI	<i>Editor-in-chief</i>	2020– 2023
3.	<i>Energy Conversion & Management</i>	Elsevier	Mitra Bestari	2020
4.	<i>IOP Conference Proceeding ISAC 2020</i>	IOP	Mitra Bestari	2020

5.	<i>AIP Conference Proceeding ISMM 2020</i>	AIP	Mitra Bestari	2020
6.	<i>Energy Conversion & Management: X</i>	Elsevier	Mitra Bestari	2021
7.	Jurnal Rekayasa Proses	UGM	Mitra Bestari	2022–sekarang
8.	<i>Indonesian Journal of Biotechnology</i>	UGM	Mitra Bestari	2024
9.	<i>Proceeding of the 9th International Symposium on Applied Chemistry (ISAC) - ICCME 2023.</i>	AIP	Mitra Bestari	2024

I. Karya Tulis Ilmiah dan Paten

No	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Penulis Tunggal	2
2.	Bersama Penulis Lainnya	85
Total		87

No	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Indonesia	22
2.	Bahasa Inggris	65
Total		87

No	Kualifikasi Publikasi	Jumlah
1.	Buku dan Bagian dari Buku	3
2.	Jurnal Internasional	43
3.	Jurnal Nasional	4

4.	Prosiding Internasional	15
5.	Prosiding Nasional	1
6.	Paten dan Hak Cipta	21
7.	Karya Tulis Ilmiah Lainnya	-
	Total	87

No	Paten	Jumlah
1.	Bersertifikat	6
2.	Terdaftar	15
	Total	21

J. Pembinaan Kader Ilmiah

Pejabat Fungsional Peneliti

No	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Kustomo	LIPI	Pembimbing RA	2017
2.	Gagus Ketut S	LIPI	Mentor Latsar Peneliti Ahli Muda	2019
3.	Sudiyarmanto	BRIN	Pembimbingan Penulisan KTI	2020
4.	Yovilianda M. Untoro	BRIN	Pembimbing RA	2020
5.	Agustina Sus Andreani	BRIN	Mentor Latsar Peneliti Ahli Muda	2021
6.	Fauzan Aulia	BRIN	Kopromotor S2 sekarang	2024—

No	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
7.	Slamet Dyah Volkandari	BRIN	Kopromotor S3	2023– sekarang
8.	Anis Kristiani	BRIN	Kopromotor S3	2024– sekarang

Mahasiswa

No	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Evlyn Laurenthia	Universitas Surya	Pembimbing S-1	2018
2.	Yudia P Ningrum	UIN Syarif Hidayatullah	Pembimbing S-1	2018
3.	Darmawan Juliyan syah	UIN Syarif Hidayatullah	Pembimbing S-1	2019
4.	Falah Azizah Elmaria	UIN Syarif Hidayatullah	Pembimbing S-1	2019
		Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-2	2022–2023
5.	Diaz Ayu W.	UIN Syarif Hidayatullah	Pembimbing S-1	2019
		Institut Teknologi Bandung	Pembimbing S-2	2021
6.	Lien Sururoh	UIN Syarif Hidayatullah	Pembimbing S-1	2019
7.	Bilal Mubarak Ahmad	UIN Syarif Hidayatullah	Pembimbing S-1	2020
8.	Putri Zulfa Silvia	Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-2	2020–2021

No	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
9.	Nining O. Sifana	Universitas Riau	Pembimbing S-1	2019
10.	Nurul Hanifah	Institut Teknologi Bandung	Pembimbing S-2	2021–2022
11.	M. Yovinanda Maulana	Institut Teknologi Bandung	Pembimbing S-2	2021–2022
12.	Firda Apriani	Institut Teknologi Bandung	Pembimbing S-2	2022–2023
13.	Anastasya Erica Airyn	Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-1	2022
14.	Fauzan Aulia	Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-2	2023–sekarang
15.	Slamet Diah Volkandari	Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-3	2023–sekarang
16.	Alfiyah Ghina Almasah	UIN Syarif Hidayatullah	Pembimbing S-1	2023–sekarang
17.	Anis Kristiani	Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-3	2023–sekarang

K. Organisasi Profesi Ilmiah

No	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1.	Anggota	Himpunan Peneliti Indonesia (Himpenindo)	2019–2022
2.	Anggota	PPI (Perhimpunan Periset Indonesia)	2022–skrg

3.	Anggota <i>Organization for Women in Science for Developing Word (OWSD)</i> , Indonesia National Chapter	2021–skrg
4.	Pengurus <i>Indonesian Society for Cancer Chemoprevention (ISCC)</i>	2024–2026

L. Tanda Penghargaan

No	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1.	<i>AusAID Australia Award, PhD Scholarship 2011–2015</i>	<i>Australian Government</i>	2011
2.	<i>L'Oreal-UNESCO For Women in Science National Fellowship Award 2017</i>	<i>L'Oreal -UNESCO</i>	2017
3.	Peneliti Terbaik ke-3	Pusat Penelitian Kimia LIPI	2017
4.	Best Paper Award di 4 th Asia Future Conference (AFC), Seoul, South Korea	SEKIGUCHI GLOBAL RESEARCH ASSOCIATION	2018
5.	Satyalancana Karya Satya X Tahun	Presiden Republik Indonesia	2018
6.	ASN Inspiratif Kedeputian Ilmu Pengetahuan Teknik LIPI	Deputi IPT LIPI	2021

No	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
7.	Best Presenter on the Indonesia Toray Science Foundation (ITSF) Seminar on Science and Technology	Indonesia Toray Science Foundation (ITSF)	2022

Nanomaterial berbasis silika telah menjadi salah satu platform paling menjanjikan yang telah membuka peluang besar dalam menciptakan biosensor yang lebih sensitif, selektif, dan berkelanjutan. Silika sebagai bahan dasar nanomaterial memiliki keunggulan fisis dan kimia seperti luas permukaan yang tinggi, ketabilan termal, keberadaan gugus fungsi aktif, serta sifat biokompatibel dan biodegradable, yang menjadikannya kandidat ideal sebagai transduser dalam sistem biosensor. Di era yang menuntut deteksi biomolekul atau molekul kimia secara cepat, akurat, dan ekonomis, kebutuhan akan material biosensor yang efisien dan ramah lingkungan menjadi sangat mendesak. Integrasi nanoteknologi dan modifikasi kimia permukaan silika menjadi pendekatan strategis untuk menjawab tantangan tersebut.

Rekam jejak riset kami menawarkan pendekatan inovatif dengan memanfaatkan endapan geothermal sebagai sumber nanosilika, yang tidak hanya mengurangi beban limbah industri panas bumi, tetapi juga menghasilkan material baru yang fungsional dan berkelanjutan. Proses sintesis yang digunakan, seperti metode sol-gel, terbukti sederhana, terkontrol, dan memiliki reproducibility tinggi. Nanosilika geothermal yang dihasilkan menunjukkan karakteristik morfologi dan kimia yang setara dengan nanosilika dari prekursor komersial, sekaligus menurunkan biaya produksi secara signifikan.

Hasil riset ini menunjukkan bahwa nanoteknologi dan modifikasi kimia silika dapat menjadi solusi konkret dalam menyediakan material biosensor yang berkelanjutan. Material ini tidak hanya murah dan mudah diproduksi, tetapi juga kompatibel secara biologis dan ramah lingkungan. Selain itu, pendekatan ini memberi nilai tambah pada limbah industri, sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular dan pembangunan berkelanjutan.

