

**REKAYASA BIOPOLIMER UNTUK KEBERLANJUTAN:
INOVASI HIJAU BAGI LINGKUNGAN, PANGAN, DAN
KESEHATAN**



UNIVERSITAS GADJAH MADA

**Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar
dalam Bidang Kimia
pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Gadjah Mada**

**Disampaikan pada Pengukuhan Guru Besar
Universitas Gadjah Mada
Tanggal 5 Agustus 2025**

**Oleh
Prof. Drs. Dwi Siswanta, M.Eng., Ph.D.**

Salam sejahtera untuk kita semua,

Yang terhormat,

Ketua, Sekretaris dan Anggota Majelis Wali Amanat;

Ketua, Sekretaris, dan Anggota Senat Akademik;

Ketua, Sekretaris, dan Anggota Dewan Guru Besar;

Rektor, Para Wakil Rektor, dan seluruh jajarannya;

Para Pimpinan Fakultas, Pusat Studi dan Lembaga;

Segenap Sivitas Akademika, khususnya para Dosen dan Staf
Kependidikan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Gadjah Mada;

Para tamu undangan, handai taulan, kerabat, saudara, keluarga, dan para
hadirin yang saya muliakan.

Pertama-tama, saya mengucapkan syukur kepada Tuhan Allah yang Maha Kuasa, sumber kasih dan hikmat, yang telah menyertai setiap langkah dalam perjalanan hidup saya. Dalam segala keterbatasan dan pergumulan, kasih karunia-Nya telah memberikan kekuatan, dan damai sejahtera, sehingga saya boleh berdiri di hadapan Bapak dan Ibu sekalian pada hari ini. Segala kemuliaan hanya bagi-Nya.

Hadirin yang saya hormati,

Sebagai bentuk pertanggungjawaban akademik atas pengukuhan saya sebagai Guru Besar dalam bidang rekayasa biosorben, izinkan saya memanfaatkan momen ini untuk menyampaikan gagasan yang telah menjadi benang merah dalam perjalanan riset dan pengabdian saya selama ini.

Pidato ini saya beri judul: **“Rekayasa Biopolimer untuk Keberlanjutan: Inovasi Hijau bagi Lingkungan, Pangan, dan Kesehatan.”**

Tema ini lahir dari keterlibatan saya dalam pengembangan material berbasis biopolimer yang tidak hanya difokuskan pada kemampuan adsorpsi, tetapi telah meluas ke berbagai aplikasi fungsional yang mendukung solusi ramah lingkungan dan keberlanjutan lintas sektor. Bidang ini berada pada irisan keilmuan kimia analitik dan kimia lingkungan, dan saya yakini memiliki

kontribusi strategis dalam menghadapi tantangan kontaminasi serta mendorong inovasi hijau yang berdampak nyata bagi masyarakat.

I. Latar Belakang dan Relevansi Topik

Kita tengah menghadapi tantangan global yang semakin kompleks dalam bidang lingkungan, pangan, dan kesehatan. Salah satu isu krusial adalah pencemaran air oleh polutan berbahaya seperti logam berat, zat warna sintetis, pestisida, produk farmasi, dan mikroplastik (Parra Arroyo *et al.*, 2022). Senyawa-senyawa ini bersifat persisten, toksik, dan bioakumulatif, sehingga menimbulkan risiko serius terhadap ekosistem dan kesehatan manusia. Dalam berbagai studi ilmiah, senyawa seperti Pb^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , rhodamine B, diclofenac, hingga bisphenol A dan *Per- and Polyfluoroalkyl Substance* (PFAS) masih terdeteksi dalam limbah industri dan domestik, bahkan dalam air permukaan yang dikonsumsi masyarakat (Kurwadkar *et al.*, 2022).

Teknologi pengolahan konvensional seperti koagulasi-flokulasi, reverse osmosis, filtrasi membran, dan ozonisasi sering kali tidak mampu mengatasi kontaminan pada konsentrasi jejak, apalagi ketika polutan tersebut hadir dalam campuran kompleks. Selain efektivitas yang terbatas, teknologi ini umumnya membutuhkan energi tinggi, biaya operasional besar, serta dapat menghasilkan limbah sekunder yang menambah beban lingkungan (Fernandes *et al.*, 2024).

Di sinilah *rekayasa biopolimer* menawarkan solusi strategis dan inovatif. Melalui pemanfaatan biopolimer seperti kitosan, alginat, pektin, dan selulosa yang bersumber dari biomassa terbarukan, dikembangkan sistem biosorben dan membran multifungsi yang bersifat ramah lingkungan, selektif, dan dapat diregenerasi. Gugus fungsi aktif pada biopolimer memungkinkan interaksi kimia yang efektif dengan berbagai jenis polutan, baik anorganik maupun organik (Doyo *et al.*, 2023).

Dengan modifikasi struktur seperti crosslinking, grafting, dan imprinting, material berbasis biopolimer tidak hanya digunakan sebagai biosorben, tetapi juga dikembangkan untuk aplikasi analitik, sistem pelepasan terkendali, pengemasan aktif, hingga pemisahan molekul dalam sistem membran. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip *green chemistry* dan *ekonomi sirkular*, serta membuka peluang luas untuk

menjawab tantangan interdisipliner dalam bidang lingkungan, pangan, dan kesehatan secara berkelanjutan.

II. Konsep Dasar Rekayasa Biosorben

Dalam menghadapi beragam tantangan keberlanjutan di bidang lingkungan, pangan, dan kesehatan, biopolimer telah muncul sebagai material strategis yang dapat direkayasa untuk berbagai fungsi, salah satunya sebagai biosorben. Biosorben didefinisikan sebagai material penyerap berbasis biomassa atau biopolimer alami yang telah dimodifikasi untuk meningkatkan kapasitas dan selektivitasnya terhadap berbagai jenis polutan (Nithya and Thirunavukkarasu, 2022). Melalui pendekatan rekayasa, material ini tidak hanya mampu mengadsorpsi logam berat dan zat warna, tetapi juga senyawa organik kompleks, mikropolutan, bahkan molekul bioaktif.

Bekerja berdasarkan prinsip adsorpsi, proses penjerapan molekul pada permukaan padatan, biosorben menawarkan keunggulan dibandingkan adsorben sintetik karena bersifat biodegradable, bersumber dari biomassa terbarukan, dan lebih ekonomis. Bahan dasarnya meliputi biopolimer seperti kitosan, alginat, selulosa, dan pektin, yang kaya akan gugus fungsi aktif (karboksil, amino, hidroksil) sehingga mampu berinteraksi secara spesifik dengan berbagai kontaminan (Hastuti *et al.*, 2015). Kitosan, misalnya, mengandung gugus amino yang efektif membentuk kompleks koordinasi dengan ion logam berat, sementara alginat mengikat kation melalui gugus karboksilat dalam strukturnya (Masykur *et al.*, 2014; Saheed *et al.*, 2021).

Namun demikian, kemampuan alami biopolimer ini sering kali belum mencukupi untuk aplikasi praktis. Oleh karena itu, diperlukan *rekayasa struktur* untuk mengoptimalkan performa adsorpsi, meningkatkan selektivitas, serta memperluas kegunaan lintas sektor. Pendekatan rekayasa ini mencakup:

1. Modifikasi Kimia

- *Grafting* untuk menambahkan rantai fungsional baru yang memperkuat interaksi molekuler (Hastuti *et al.*, 2015)

- *Crosslinking* untuk memperbaiki kestabilan struktur dan ketahanan terhadap pelarutan (Lusiana *et al.*, 2017; Siswanta *et al.*, 2020; Ariani *et al.*, 2023)
- *Molecular imprinting* untuk menciptakan situs pengenalan molekul target, meningkatkan selektivitas terhadap polutan tertentu (Masykur *et al.*, 2014; Hastuti *et al.*, 2019)

2. Modifikasi fisika

- Aktivasi permukaan secara termal atau kimia untuk meningkatkan porositas (Makos-Chelstowska *et al.*, 2024)
- Pengelolahan menjadi butiran, film, atau membran agar sesuai dengan sistem aplikasi (batch, kolom, atau filtrasi) (Amri *et al.*, 2016; Fajarwati *et al.*, 2016; Lusiana *et al.*, 2017, 2020; Nora *et al.*, 2023; Natsir *et al.*, 2025)

3. Modifikasi kombinasi

- Integrasi dengan nanopartikel (misalnya Fe_3O_4) untuk menghasilkan biosorben magnetik (Doyo *et al.*, 2023)
- Pencampuran dengan karbon aktif atau material lain guna memperoleh efek sinergis dalam kapasitas dan efisiensi adsorpsi (Purnaningtyas *et al.*, 2020; Yaqin *et al.*, 2022; Purba *et al.*, 2024)

Melalui pendekatan ini, biosorben dapat didesain secara fungsional dengan karakteristik unggul, yakni kapasitas adsorpsi tinggi, selektivitas tinggi terhadap target spesifik, dan kestabilan dalam berbagai kondisi lingkungan. Contoh nyata adalah penggunaan kitosan termodifikasi tiourea untuk adsorpsi zat warna Remazol Brilliant Blue R dalam limbah tekstil (Astuti *et al.*, 2025). Pendekatan ini juga telah diperluas ke sistem *solid-phase extraction (SPE)* dalam analisis kimia (Yaqin *et al.*, 2022, 2024, 2025; Purba *et al.*, 2024; Siswanta *et al.*, 2024) pelepasan terkendali senyawa aktif (slow release), dan pengembangan sensor berbasis membran (Putra *et al.*, 2016; Riyandari *et al.*, 2018; Natsir *et al.*, 2025).

Dengan demikian, *rekayasa biosorben* bukan hanya solusi untuk pengolahan limbah, melainkan bagian dari paradigma *rekayasa biopolimer* yang bersifat multifungsi, adaptif, dan lintas disiplin.

Konsep ini menggabungkan prinsip kimia analitik, teknik lingkungan, kimia bahan, dan rekayasa berkelanjutan yang menjadikannya fondasi kokoh untuk inovasi hijau di berbagai sektor strategis.

III. Integrasi Kimia Hijau dan Nanoteknologi dalam Rekayasa Biopolimer

Dalam pengembangan sistem berbasis biopolimer, integrasi antara prinsip kimia hijau dan pendekatan nanoteknologi menjadi landasan penting untuk menghasilkan inovasi yang tidak hanya unggul secara teknis, tetapi juga berkelanjutan secara ekologis (Omran and Baek, 2022). Di tengah meningkatnya kebutuhan akan solusi lingkungan yang ramah dan efisien, rekayasa biopolimer menawarkan jalur strategis yang menjembatani dimensi ilmiah, etis, dan aplikatif yang termasuk dalam bidang lingkungan, pangan, dan kesehatan.

Kimia hijau, sebagaimana dirumuskan oleh Anastas dan Warner, mencakup prinsip-prinsip seperti penggunaan bahan terbarukan, efisiensi atom, pengurangan toksisitas, dan desain produk yang dapat terurai di alam. Dalam konteks ini, pengembangan biosorben dan membran berbasis biopolimer diarahkan untuk memenuhi prinsip-prinsip tersebut, misalnya dengan:

- Menggunakan biomassa limbah pertanian, perikanan, atau ganggang sebagai bahan baku;
- Memanfaatkan pelarut ramah lingkungan seperti air, etanol, atau asam esetat encer;
- Menghindari bahan toksik seperti glutaraldehida, yang dapat diganti dengan agen pelarut alami seperti genipin (Cui *et al.*, 2025);
- Mendesain produk akhir yang mudah terdegradasi atau dapat digunakan kembali tanpa menghasilkan limbah berbahaya.

Sementara itu, nanoteknologi memberikan peluang untuk mengoptimalkan performa biopolimer hingga tingkat struktur nanometer. Pengolahan dalam skala nano meningkatkan luas permukaan spesifik, mendistribusikan situs aktif secara lebih merata, dan memperkuat interaksi dengan molekul target. Dengan ini, material menjadi lebih efisien dalam adsorpsi, lebih selektif, dan mudah direkayasa untuk aplikasi spesifik (Omran and Baek, 2022).

Misalnya, kombinasi nano-kitosan dan keratin telah berhasil meningkatkan kapasitas adsorpsi logam berat secara signifikan (Zubair *et al.*, 2023). Integrasi ini memperluas pemanfaatan biosorben tidak hanya sebagai penyerap pasif, tetapi juga sebagai sistem pengenalan molekul target, apalagi ketika dikombinasikan dengan teknik molecular imprinting (Masykur *et al.*, 2014; Hastuti *et al.*, 2019). Hal ini sangat relevan dalam bidang kimia analitik, terutama untuk pengembangan sensor atau sistem pemisahan selektif dalam matriks kompleks.

Contoh lain yang menonjol adalah komposit biosorben magnetik berbasis lignin- Fe_3O_4 -polianilin, yang tidak hanya menunjukkan efisiensi tinggi dalam mengadsorpsi Cr(VI) dan Cu(II), tetapi juga dapat dengan mudah dipisahkan menggunakan medan magnet, memungkinkan regenerasi dan penggunaan ulang hingga beberapa siklus tanpa kehilangan kapasitas signifikan. Ini sesuai dengan prinsip circular economy, sekaligus mengurangi biaya operasional dan jejak karbon proses pengolahan limbah (Pegini *et al.*, 2025).

Lebih jauh lagi, sinergi antara kimia hijau dan nanoteknologi dalam rekayasa biopolimer juga membuka peluang untuk pengembangan material multifungsi:

- Sebagai komponen dalam sistem sensor (elektrokimia atau kolorimetri) (Dhony Hermanto, Kuswandi, *et al.*, 2019; Muliawati *et al.*, 2021, Yulirohyami *et al.*, 2016);
- Sebagai membran untuk *slow release* zat aktif seperti kurkumin dalam produk kesehatan (Putra *et al.*, 2016);
- Sebagai kemasan aktif (*active packaging*) berbasis bioplastic antimikroba (Riyandari *et al.*, 2018);

Dengan demikian, rekayasa biopolimer berbasis kimia hijau dan nanoteknologi melahirkan paradigma baru: material yang tidak hanya efektif, tetapi juga etis. Di tengah perubahan iklim dan degradasi lingkungan, pendekatan ini mengedepankan prinsip tanggung jawab ilmiah dalam menciptakan solusi berkelanjutan yang adaptif untuk masa depan lingkungan, pangan, dan kesehatan.

IV. Aplikasi dan Dampak Rekayasa Biopolimer

Dalam dua dekade terakhir, biopolimer hasil rekayasa telah memainkan peran strategis dalam menjawab berbagai tantangan di

bidang lingkungan, pangan, dan kesehatan. Pengembangan sistem berbasis biopolimer tidak hanya menghadirkan solusi teknis yang efisien, tetapi juga mencerminkan transformasi paradigma keilmuan menuju inovasi yang ramah lingkungan, terjangkau, dan berdampak luas. Aplikasi biosorben adalah titik awal dari perjalanan ini, yang kemudian berkembang menjadi berbagai platform teknologi berbasis membran, sensor, dan sistem penghantaran zat aktif.

Pertama, dalam konteks pengolahan air limbah industri dan domestik, biosorben berbasis kitosan, alginat, dan selulosa telah menunjukkan kinerja tinggi dalam mengadsorpsi logam berat (Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+}) dan zat warna seperti methylene blue serta rhodamine B (Hastuti *et al.*, 2015; Siswanta *et al.*, 2020; Shanti *et al.*, 2022; Nora *et al.*, 2023; Prihatdini *et al.*, 2023; Astuti *et al.*, 2025). Industri tekstil, pertambangan, metalurgi, dan petrokimia merupakan kontributor utama limbah berbahaya tersebut. Dibandingkan adsorben sintetik, biosorben menawarkan keunggulan biodegradabilitas, potensi daur ulang, dan efisiensi biaya karena berbasis biomassa lokal. Penggunaan biosorben dalam sistem kolom maupun batch juga telah diuji dalam skala laboratorium dan semi pilot, dengan hasil yang menjanjikan.

Kedua, dalam bidang kimia analitik, biosorben telah diadaptasi sebagai material pemisahan selektif dalam teknik *solid-phase extraction* (SPE). Dalam riset kami, biopolimer termodifikasi digunakan untuk memekatkan ion logam atau senyawa target dari matriks kompleks seperti susu cair, dan air permukaan (Yaqin *et al.*, 2022, 2025; Purba *et al.*, 2024; Siswanta *et al.*, 2024). Pendekatan ini memungkinkan analisis pada level jejak (*trace analysis*), memperluas akses ke metode analitik presisi tinggi dengan instrumen yang lebih sederhana. Inovasi ini menjembatani antara teknologi lingkungan dan kebutuhan kontrol kualitas di sektor pangan dan kesehatan.

Ketiga, sistem berbasis biopolimer juga telah diterapkan dalam remediasi kontaminan emerging, seperti antibiotik, hormon, pestisida, hingga mikroplastik (Rai, 2022). Material berbasis kitosan-magnetit, lignin- Fe_3O_4 , atau film imprinting berbasis pektin telah menunjukkan kapasitas dan selektivitas yang unggul dalam menangkap senyawa-senyawa tersebut dari air limbah rumah tangga dan rumah sakit. Di sisi lain, modifikasi bentuk menjadi membran atau film memperluas

penggunaannya pada sistem berkelanjutan seperti *slow release*, *active packaging*, dan membran pemisah molekul (Amri *et al.*, 2016; Lusiana *et al.*, 2016, 2017, 2020; Khabibi *et al.*, 2021).

Secara keseluruhan, inovasi berbasis rekayasa biopolimer memberikan kontribusi nyata terhadap berbagai Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs). Dalam SDG 6 (akses air bersih), teknologi ini mendukung pengolahan air ramah lingkungan. Dalam SDG 12 dan 13 (konsumsi berkelanjutan dan aksi iklim), ia menggantikan material berbasis petrokimia dan mengurangi limbah. Dalam SDG 9 (industri dan inovasi), sistem berbasis biopolimer menjadi bagian dari teknologi bersih yang adaptif untuk skala industri.

Dengan demikian, rekayasa biopolimer bukan hanya menciptakan produk material, tetapi menawarkan platform inovasi yang inklusif, regeneratif, dan responsif terhadap tantangan zaman. Kolaborasi lintas disiplin dan lintas sektor akan menjadi kunci untuk membawa teknologi ini dari laboratorium menuju implementasi nyata, menjadikannya kontribusi sains yang berpihak pada keberlanjutan dan kesejahteraan masyarakat.

V. Jejak Inovasi Rekayasa Biopolimer: dari Adsorben hingga Sensor

Hadirin yang saya hormati,

Selama lebih dari dua dekade, saya mendedikasikan perjalanan riset saya pada rekayasa biopolimer untuk menghasilkan solusi yang aplikatif dan berkelanjutan dalam bidang lingkungan, pangan, kesehatan, dan analitik. Dengan menggabungkan prinsip kimia hijau dan pendekatan interdisipliner, riset yang saya lakukan mencakup berbagai aplikasi mulai dari adsorpsi kontaminan, pemisahan kimia, hingga sistem sensor dan pelepasan zat aktif. Jejak inovasi ini membentuk fondasi kontribusi saya dalam pengembangan material berbasis biopolimer yang fungsional dan ramah lingkungan.

1. Biosorben untuk Adsorpsi

Fokus awal riset saya adalah pengembangan biosorben dari biopolimer alami seperti kitosan, pektin, *carboxymethyl cellulose*, dan selulosa. Melalui teknik *grafting*, *crosslinking*, dan *imprinting*, kami berhasil merekayasa material adsorben yang

selektif dan efisien dalam mengikat logam berat seperti Pb(II), Cu(II), Ni(II), serta zat warna seperti *methylene blue* dan *malachite green*. Penelitian ini tidak hanya menghasilkan data kinetika, isoterm, dan termodinamika yang mendalam, tetapi juga mencerminkan pemanfaatan limbah seperti kulit nanas dan polistirena sulfonat sebagai bahan dasar untuk mewujudkan prinsip kimia hijau dan ekonomi sirkular dalam praktik nyata (Fajarwati *et al.*, 2016; Hastuti *et al.*, 2019; Purnaningtyas *et al.*, 2020; Siswanta *et al.*, 2020; Nora *et al.*, 2023; Astuti *et al.*, 2025).

2. Membran Transport Ion dan Molekul

Biopolimer juga saya kembangkan sebagai bahan dasar membran untuk aplikasi pemisahan molekul, baik dalam bidang medis seperti hemodialisis maupun proses kimia seperti pervaporasi. Kami menggunakan kitosan, alginat, dan PVA dengan agen *crosslinking* alami untuk menghasilkan membran yang selektif terhadap molekul kecil seperti urea, kreatinin, dan etanol. Penelitian ini menunjukkan bahwa sifat membran, termasuk hidrofobisitas, kekuatan mekanik, dan kompatibilitas biologi dapat diatur melalui desain molekul, membuka peluang pemanfaatan biomaterial dalam teknologi membran yang lebih ramah lingkungan (Amri *et al.*, 2016; Lusiana *et al.*, 2016, 2017, 2020; Khabibi *et al.*, 2021).

3. Matriks untuk Sensor Kolorimetri dan Elektrometri

Rekayasa biopolimer juga dikembangkan untuk mendukung sistem deteksi, baik dalam bentuk sensor kolorimetri maupun biosensor berbasis enzim. Dengan menggunakan film alginat-kitosan dan kitosan-pektin sebagai matriks, kami mengimobilisasi indikator kimia seperti bromothymol blue dan dithizone untuk mendeteksi ion logam seperti Fe(II), Cr(VI), dan Ni(II). Inovasi terbaru melibatkan pewarna alami dan teknologi plasma dalam bioplastik fungsional untuk sensor visual, serta biosensor berbasis urease untuk deteksi amonia. Pendekatan ini menunjukkan potensi integrasi antara biopolimer, warna, dan fungsi elektrokimia dalam satu sistem sensor yang mudah digunakan dan ramah lingkungan (D. Hermanto, Mudasir, *et al.*,

2019; Dhony Hermanto, Kuswandi, *et al.*, 2019; Dhony Hermanto, Mudasir, *et al.*, 2019; Hermanto *et al.*, 2020; Muliawati *et al.*, 2021; Yulirohyami *et al.*, 2025).

4. Sistem Slow Release

Penelitian kami juga mencakup sistem pelepasan zat aktif secara terkendali (*slow release*) dengan menggunakan kombinasi kitosan, alginat, pati, dan pektin. Bahan-bahan ini dimodifikasi menjadi film atau mikropartikel untuk mengendalikan pelepasan kurkumin, eugenol, dan β -karoten dalam media simulasi makanan atau lingkungan. Dengan metode desain eksperimental seperti Taguchi, kami mengoptimalkan formula untuk mencapai efisiensi enkapsulasi yang tinggi, kestabilan, dan ukuran partikel minimal. Aplikasi ini relevan untuk bidang pangan fungsional, farmasi, dan pertanian berkelanjutan (Putra *et al.*, 2016; Riyandari *et al.*, 2018; Natsir *et al.*, 2025).

5. Prekonsentrasi Analit (*Solid Phase Extraction*)

Dalam bidang kimia analitik, kami mengembangkan biosorben berbasis kitosan dan komposisinya untuk teknik *solid-phase extraction* (SPE). Teknologi ini memungkinkan pemekatan analit seperti ion logam dari sampel kompleks (misalnya susu, air limbah, atau produk pangan) sebelum dianalisis dengan AAS atau spektrofotometri. Inovasi seperti integrasi karbon aktif, pembentukan film, serta perangkat *syringe*-SPE menunjukkan efisiensi tinggi dan kemudahan operasional, menjadikan sistem ini sebagai alternatif ramah lingkungan dan terjangkau dalam prosedur analisis rutin (Purba *et al.*, 2024; Siswanta *et al.*, 2024)(Yaqin *et al.*, 2022, 2024, 2025)(Yaqin *et al.*, 2025)(Ariani *et al.*, 2023).

Keseluruhan riset ini menunjukkan bahwa rekayasa biopolimer tidak berhenti pada tataran teori atau karakterisasi material semata, tetapi menjangkau pemanfaatan praktis di berbagai sektor. Dengan membangun sinergi antara sains dasar dan kebutuhan aplikasi nyata, saya berharap inovasi-inovasi ini dapat memberi kontribusi yang berkelanjutan dan inklusif, sekaligus menjadi inspirasi bagi generasi

ilmuwan berikutnya untuk terus menciptakan teknologi yang bersumber dari bumi, dan kembali ke bumi dengan membawa manfaat.

VI. Tantangan dan Arah Masa Depan

Meskipun rekayasa biopolimer telah menunjukkan potensi besar sebagai solusi hijau dan multifungsi, implementasinya dalam skala luas masih menghadapi sejumlah tantangan yang tidak sederhana. Tantangan ini tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga menyangkut aspek ekonomi, keberterimaan sosial, dan regulasi lintas sektor terutama ketika biopolimer ditujukan untuk aplikasi di bidang lingkungan, pangan, maupun kesehatan.

Salah satu tantangan utama adalah skalabilitas dan komersialisasi. Banyak inovasi rekayasa biopolimer, termasuk biosorben, film aktif, atau sensor berbasis biopolimer, masih dikembangkan pada skala laboratorium. Ketika teknologi ini hendak diproduksi massal atau diintegrasikan dalam sistem industri dan layanan publik, muncul kebutuhan akan proses sintesis yang stabil, efisien, hemat biaya, serta menghasilkan produk dengan mutu konsisten. Format produk juga harus disesuaikan dengan konteks penggunaannya, yakni apakah berupa butiran, membran, *patch*, *cartridge*, atau sistem padat-cair lainnya. Selain itu, logistik distribusi, umur simpan, dan efisiensi pascapakai menjadi aspek penting dalam tahap hilirisasi.

Stabilitas material dan performa dalam kondisi kompleks juga menjadi tantangan nyata, terutama untuk aplikasi di bidang lingkungan dan pangan. Kontaminan dalam air atau sampel pangan biasanya hadir dalam campuran kompleks dengan pH, suhu, dan komposisi ionik yang berubah-ubah. Interaksi kompetitif dan fouling permukaan dapat menurunkan efisiensi adsorpsi, selektivitas, atau sensitivitas deteksi. Oleh karena itu, dibutuhkan strategi rekayasa lanjutan untuk meningkatkan daya tahan biopolimer terhadap degradasi fisik dan kimia, serta kemampuan adaptif dalam kondisi fluktuatif.

Namun, arah riset masa depan juga sangat menjanjikan. Salah satunya adalah pengembangan *smart biopolymers*, yaitu material yang memiliki respons terhadap stimulus lingkungan seperti pH, suhu, atau keberadaan molekul target. Contohnya termasuk biosorben yang bisa

dilepas atau diregenerasi dengan stimulus magnetik, atau film indikator berbasis pH yang dapat berubah warna untuk mendeteksi kerusakan pangan. Arah ini membuka peluang aplikasi biopolimer dalam sistem pemurnian adaptif dan monitoring berbasis indikator visual yang mudah diinterpretasi oleh pengguna akhir.

Selanjutnya, integrasi rekayasa biopolimer dengan sistem sensorik dan diagnostik juga menjadi medan pengembangan yang strategis. Biopolimer dapat difungsikan sebagai matriks pengenal dalam sensor warna, sensor optik, maupun perangkat *lab-on-paper* dan *lab-on-chip* yang memungkinkan deteksi analit dalam sampel air, susu, atau darah secara in situ. Peran ini menyatukan antara fungsi adsorptif dan fungsi analitik dalam satu sistem yang portabel dan hemat energi.

Tak kalah penting, kolaborasi lintas disiplin menjadi syarat mutlak dalam memajukan rekayasa biopolimer. Kontribusi ilmu bioteknologi, nanomaterial, hingga teknik manufaktur sangat penting dalam pengembangan struktur dan formulasi yang stabil serta fungsional. Di sisi lain, pemanfaatan kecerdasan buatan dan *machine learning* semakin berkembang untuk mengoptimasi desain struktur, simulasi interaksi gugus fungsional dengan analit, serta prediksi performa dalam kondisi nyata (Gheibi *et al.*, 2024). Pendekatan berbasis data ini mempercepat proses desain dan validasi material, sekaligus meningkatkan efisiensi dan presisi rekayasa (Taoufik *et al.*, 2022).

Dengan demikian, tantangan yang dihadapi bukanlah hambatan semata, melainkan pemicu transformasi ilmu pengetahuan menuju arah yang lebih integratif dan aplikatif. Rekayasa biopolimer tidak hanya akan menjawab kebutuhan teknologi saat ini, tetapi juga berperan penting dalam merancang masa depan yang lebih bersih, sehat, cerdas, dan berkelanjutan baik di laboratorium, di industri, maupun di tengah masyarakat.

VII. Penutup dan Refleksi Personal

Hadiri yang saya muliakan,

Perjalanan ilmiah saya bermula dari desain dan sintesis molekul *ionophore* untuk sensor ion selektif, baik potensiometri maupun optik saat menempuh studi di Keio University. (Siswanta *et al.*, 1996, 1997;

Suzuki *et al.*, 1996, 2000). Fokus awal saya adalah menciptakan molekul *host* yang mampu mengenali ion tertentu secara selektif, baik untuk elektrode selektif-ion maupun sistem optode berbasis pewarna. Ketertarikan ini kemudian berkembang ke arah desain dan sintesis polimer sintesis, salah satunya polieugenol, turunan dari eugenol yang memiliki gugus fenolik aktif dan mampu mengikat ion logam (Harimu *et al.*, 2010; Kiswandono *et al.*, 2014; Djunaidi, M Cholid; Jumina, Jumina; Siswanta, Dwi; Ulbricht, 2016). Dari penelitian ini saya belajar pentingnya pemilihan monomer, kontrol kondisi polimerisasi, serta penataan gugus fungsional untuk mencapai selektivitas dan performa optimal. Namun, seiring waktu, pengalaman dalam mendesain struktur molekul *host* tersebut justru membuka jalan menuju bidang yang lebih luas dan aplikatif, yakni rekayasa biopolimer.

Dari prinsip-prinsip pengenalan molekul selektif itulah, kami mulai merekayasa biopolimer seperti kitosan, alginat, pektin, dan selulosa agar dapat digunakan sebagai material fungsional yang dimulai dari biosorben, membran, hingga sensor dan sistem *slow-release*. Prosesnya tidak sekadar menggabungkan bahan alam, tetapi merancangnyanya ulang agar struktur dan fungsinya sesuai dengan tujuan: menyerap logam berat, mengontrol pelepasan senyawa bioaktif, memekatkan analit dalam SPE, atau mengenali kontaminan dalam sensor kolorimetri.

Saya belajar bahwa sains yang bermakna bukan sekadar memurnikan pengetahuan, tetapi juga mengalirkannya ke tempat di mana ia paling dibutuhkan. Bersama mahasiswa dan kolega, kami membangun riset yang menghubungkan titik-titik antara kimia analitik, ilmu bahan, lingkungan, dan rekayasa biosensor dengan semangat bahwa hasil riset harus mampu mengubah kehidupan: air yang lebih bersih, pangan yang lebih aman, dan sistem monitoring yang lebih cerdas.

Rekayasa biopolimer, bagi saya, bukan hanya ekspresi ilmiah, tetapi juga bentuk tanggung jawab moral dan ekologis. Ketika kita merancang teknologi, pertanyaannya tidak berhenti pada “*Apakah ini efisien?*” tetapi juga “*Apakah ini berkelanjutan?*”, “*Apakah ini adil untuk lingkungan dan masyarakat?*”, dan “*Bisakah ini diakses oleh mereka yang paling membutuhkan?*”

Harapan saya, teknologi yang kami kembangkan dapat terus dilanjutkan dan diperluas, terutama untuk menjawab kebutuhan daerah-daerah yang kekurangan akses air bersih, perlindungan pangan, atau pemantauan lingkungan. Di titik-titik sunyi seperti itulah, ilmu harus hadir.

Kepada generasi muda, saya ingin mengajak agar jangan takut menyeberangi batas keilmuan. Dunia saat ini menuntut pemikir yang mampu merajut pengetahuan menjadi solusi nyata. Dan di atas segalanya, bangunlah riset dengan nilai, karena sains sejati adalah warisan kebaikan bagi masa depan di samping publikasi dan atau hak kekayaan intelektual.

Ucapan Terima Kasih

Hadirin yang saya hormati,

Saya menyampaikan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia serta Universitas Gadjah Mada, khususnya Fakultas MIPA dan Departemen Kimia, atas proses pengusulan jabatan Guru Besar yang berjalan secara bertahap dan akuntabel.

Penghargaan saya sampaikan kepada INPEX Scholarship Foundation dan Hitachi Scholarship Foundation atas dukungan beasiswa untuk studi Master dan Doktoral saya di Keio University, Jepang.

Ucapan terima kasih juga saya tujukan kepada para guru di SDN Ngrundul, SMPN 2 Klaten, dan SMAN 1 Klaten yang telah memberikan dasar pendidikan yang kuat.

Saya menghargai kontribusi para dosen dan senior, antara lain Bapak Ir. Sayid Akhmad, Drs. Mudjiran, Drs. Faried Uzer, Dr. Ngatidjo Hadi Pranoto, Dr. Eko Sugiharto, Dr. Warsito, Prof. Sabirin Matsjeh, Prof. Iip Izul Falah, Prof. Bambang Rusdiarso, dan Prof. Chairil Anwar.

Saya juga berterima kasih kepada Prof. Hidenari Inoue, Prof. Koji Suzuki, dan Prof. Hideaki Hisamoto atas bimbingan selama studi saya di Keio University. Saya juga menyampaikan terima kasih kepada Dr. Ahmad Hosseini Bandegharai dari Semnan University, Iran, atas kolaborasi penelitian yang produktif dan berkelanjutan.

Kepada rekan sejawat, antara lain Prof. Endang Tri Wahyuni, Dr. Agus Kuncaka, Prof. Mudasir, dan Prof. Roto, Prof. Nurul Hidayat Aprilita, Dr. Adhitasari, Prof. Suherman, Dr. Taufik Abdilah Natsir, Aulia Ratri Hapsari, M.Sc., saya menyampaikan apresiasi atas kolaborasi dan dukungan dalam berbagai kegiatan akademik dan penelitian.

Apresiasi saya sampaikan kepada Prof. Mudasir dan Prof. Nuryono atas telaah dan masukan terhadap naskah pidato ini. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada mahasiswa dan asisten riset atas kontribusinya dalam berbagai kegiatan penelitian. Selanjutnya, saya menyampaikan terima kasih kepada orang tua, Bapak Surandi (alm.) dan Ibu Sulastris (alm.), Mbakyu Sarinem (alm.), Mas Supoyo, Mas Giyanto (alm.), Mbak Sri Padmi (alm.), Mas Soewalgi (alm.) atas perjuangan perjuangan mereka agar kami semua bisa menuju jalan kehidupan yang tidak pernah berani kami cita-citakan. Untuk Mbak Yanti, Mbak Giyarti, Mas Pono-Mbak Iin, Dik Bowo-Dik Ayom, beserta para keponakan dan cucu-cucu, terima kasih untuk dukungan selama ini.

Demikian juga untuk Bapak-Ibu mertua, Bapak Sukarno dan Ibu Daliyem, Mbak Kris-Mas Haryo, Mas Gun-Mbak Tutik, Mas Kristia Budi (alm.), Mas Yusuf-Mbak Marni, Mas Heru-Mbak Ning, Mbak Nina-Mas Wawan, serta para keponakan dan cucu, atas dukungan yang telah diberikan dalam berbagai bentuk.

Akhirnya, saya juga mencatat dukungan dari istri, Kurnia Sapti Hapsari dan anak-anak, Rachel Chieko S. dan Ruth Aiko S., yang memungkinkan saya untuk menjalankan tugas akademik secara berkelanjutan.

Terima kasih.

DAFTAR PUSTAKA

- Amri, C., Mudasir, M., Siswanta, D., and Roto, R., 2016, In vitro hemocompatibility of PVA-alginate ester as a candidate for hemodialysis membrane, *Int. J. Biol. Macromol.*, 82, 48–53.
- Ariani, F., Suratman, A., and Siswanta, D., 2023, Synthesis of dialdehyde carboxymethyl cellulose-crosslinked-chitosan for preconcentration of Cu (II) using batch method, *Key Eng. Mater.*, 949, 57–65.
- Astuti, I.Y., Suratman, A., Lal, B., Hosseini-Bandegharai, A., Zango, Z.U., Adamu, H., and Siswanta, D., 2025, Thiourea-modified chitosan for effective adsorption of Remazol Brilliant Blue R: Synthesis, characterization, adsorption properties, and morphological effects, *Desalin. Water Treat.*, 322, 101092.
- Cui, C., Li, D., and Wang, L.J., 2025, Biodegradable genipin cross-linked chitosan/pea protein isolate sponges for effective adsorption of methyl blue: Batch experiments and quantum chemical analysis, *Sep. Purif. Technol.*, 358, 130425.
- Djunaidi, M Cholid; Jumina, Jumina; Siswanta, Dwi; Ulbricht, M., 2016, Synthesis of ionic imprinted polymer particles for selective membrane transport of Fe (III) using polyeugenol as the functional polymer, *Orient. J. Chem.*, 32, 77–84.
- Doyo, A.N., Kumar, R., and Barakat, M.A., 2023, Recent advances in cellulose, chitosan, and alginate based biopolymeric composites for adsorption of heavy metals from wastewater, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 151, 105095.
- Fajarwati, F.I., Sugiharto, E., and Siswanta, D., 2016, Film of chitosan-carboxymethyl cellulose polyelectrolyte complex as methylene blue adsorbent, *EKSAKTA J. Sci. Data Anal.*, 36–45.
- Fernandes, J., Ramísio, P.J., and Puga, H., 2024, A Comprehensive Review on Various Phases of Wastewater Technologies: Trends and Future Perspectives, *Eng*, 5, 2633–2661.
- Gheibi, M., Masoomi, S.R., Magala, M.U., and Amir, M., 2024, Artificial Intelligence (AI) in Adsorption Process of Heavy Metals : A Systematic Review, *Environ. Ind. Lett.*, 2, 57–78.

- Harimu, L., Matsjeh, S., Siswanta, D., and Santosa, S.J., 2010, Separation of Fe(III), Cr(III), Cu(II), Ni(II), Co(II), and Pb(II) Metal Ions Using Poly (Eugenyl Oxyacetic Acid) as an Ion Carrier by a Liquid Membrane Transport Method, *Indones. J. Chem.*, 10, 69–74.
- Hastuti, B., Mudasir, Siswanta, D., and Triyono, 2015, Preparation and pb(II) adsorption properties of crosslinked pectin-carboxymethyl chitosan film, *Indones. J. Chem.*, 15, 248–255.
- Hastuti, B., Siswanta, D., Mudasir, and Triyono, 2019, Kinetic and thermodynamic biosorption of Pb(II) by using a carboxymethyl chitosan–pectin–BADGE–Pb(II)-imprinted ion polymer adsorbent, *Bull. Mater. Sci.*, 42, 143.
- Hermanto, Dhony, Kuswandi, B., Siswanta, D., and Mudasir, 2019, Inhibitive determination of Hg(II) in aqueous solution using urease amperometric biosensor, *Indones. J. Chem.*, 19, 786–795.
- Hermanto, Dhony, Mudasir, M., Siswanta, D., and Kuswandi, B., 2019, Synthesis of Alginate-Chitosan Polyelectrolyte Complex (PEC) Membrane and Its Physical-Mechanical Properties, *J. Kim. Sains dan Apl.*, 22, 11–16.
- Hermanto, D., Mudasir, M., Siswanta, D., Kuswandi, B., and Ismillayli, N., 2019, Polyelectrolyte complex (PEC) of the alginate-chitosan membrane for immobilizing urease, *J. Math. Fundam. Sci.*, 51, 309–319.
- Hermanto, D., Mudasir, M., Siswanta, D., Kuswandi, B., and Ismillayli, N., 2020, The Preparation and Characterization of Alginate–Chitosan Membranes as Solid Support for BTB and Urease Entrapment, *Molekul*, 15, 40–47.
- Khabibi, K., Siswanta, D., and Mudasir, M., 2021, Preparation, characterization, and in vitro hemocompatibility of glutaraldehyde-crosslinked chitosan/carboxymethylcellulose as hemodialysis Membrane, *Indones. J. Chem.*, 21, 1120–1131.
- Kiswandono, A.A., Siswanta, D., Aprilita, N.H., Santosa, S.J., and Hayashita, T., 2014, The capability of copoly (eugenol-divinylbenzene) as a carrier for phenol transport with polymer inclusion membrane (PIM), *J. Environ. Friendly Process. ISSN*, 2328, 1383.

- Kurwadkar, S., Dane, J., Kanel, S.R., Nadagouda, M.N., Cawdrey, R.W., Ambade, B., Struckhoff, G.C., and Wilkin, R., 2022, Per- and polyfluoroalkyl substances in water and wastewater: A critical review of their global occurrence and distribution, *Sci. Total Environ.*, 809, 151003.
- Lusiana, R.A., Protoningtyas, W.P., Wijaya, A.R., Siswanta, D., Mudasir, and Santosa, S.J., 2017, Chitosan-tripoly phosphate (CS-TPP) synthesis through cross-linking process: The effect of concentration towards membrane mechanical characteristic and urea permeation, *Orient. J. Chem.*, 33, 2913–2919.
- Lusiana, R.A., Sangkota, V.D.A., Sasongko, N.A., Gunawan, G., Wijaya, A.R., Santosa, S.J., Siswanta, D., Mudasir, M., Abidin, M.N.Z., Mansur, S., and others, 2020, Permeability improvement of polyethersulfone-polyethylene glycol (PEG-PES) flat sheet type membranes by tripolyphosphate-crosslinked chitosan (TPP-CS) coating, *Int. J. Biol. Macromol.*, 152, 633–644.
- Lusiana, R.A., Siswanta, D., and Mudasir, 2016, Preparation of citric acid crosslinked chitosan/poly(Vinyl alcohol) blend membranes for creatinine transport, *Indones. J. Chem.*, 16, 144–150.
- Makoś-Chelstowska, P., Ślupek, E., and Gębicki, J., 2024, Agri-food waste biosorbents for volatile organic compounds removal from air and industrial gases – A review, *Sci. Total Environ.*, 945, 173910.
- Masykur, A., Santosa, S.J., Siswanta, D., and Jumina, 2014, Synthesis of Pb(II) imprinted carboxymethyl chitosan and the application as sorbent for Pb(II) ion, *Indones. J. Chem.*, 14, 152–159.
- Muliawati, N.T., Siswanta, D., and Aprilita, N.H., 2021, Development of a simple Fe (II) ion colorimetric sensor from the immobilization of 1, 10-phenanthroline in alginate/pectin film, *Indones. J. Chem.*, 21, 411–420.
- Natsir, T.A., Iknawati, A.M., Wanadri, I.D., Siswanta, D., Lusiana, R.A., and Cahyaningrum, S.E., 2025, Environmentally friendly membrane based on chitosan, citric acid, and calcium for slow-release fertilizer, *Heliyon*, 11, e41378.
- Nithya, R. and Thirunavukkarasu, A., 2022, Recent approaches in the preparation of various biosorbents, *Biosorption wastewater*

- Contam.*, 79-101.
- Nora, M., Bhagaskara, A., Agustisari, V., Lim, A., Alfalah, H.R., and Siswanta, D., 2023, Fabrication of Polystyrene Sulfonate-Chitosan (PSS-Chitosan) Membrane as Dodecyl Benzene Sulfonate (DBS) Adsorbent in Laundry Wastewater, *J. Kim. Sains dan Apl.*, 26, 19–27.
- Omran, B.A. and Baek, K.H., 2022, Valorization of agro-industrial biowaste to green nanomaterials for wastewater treatment: Approaching green chemistry and circular economy principles, *J. Environ. Manage.*, 311, 114806.
- Parra-Arroyo, L., González-González, R.B., Castillo-Zacarias, C., Melchor Martínez, E.M., Sosa-Hernández, J.E., Bilal, M., Iqbal, H.M.N., Barceló, D., and Parra-Saldivar, R., 2022, Highly hazardous pesticides and related pollutants: Toxicological, regulatory, and analytical aspects, *Sci. Total Environ.*, 807, 18–26.
- Peqini, A., Diagboya, P.N., Shallari, S., Brahushi, F., and Düring, R.A., 2025, Enhancing Biosorbent Stability, Performance Efficiency, and Cost-effectiveness: A Ternary Magnetic Composite for Sequestration of Multiple Toxic Metals from Water, *Langmuir*, 41, 15022–15030.
- Prihatdini, R.W., Suratman, A., and Siswanta, D., 2023, Linear and nonlinear modeling of kinetics and isotherm of malachite green dye adsorption to trimellitic-modified pineapple peel, *Mater. Today Proc.*, 88, 33–40.
- Purba, E.M.B., Suratman, A., and Siswanta, D., 2024, Enhanced Pb(II) extraction using a novel chitosan/pectin/carbon composite adsorbent for solid-phase extraction, *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, 2413958.
- Purnaningtyas, M.A.K., Sudiono, S., and Siswanta, D., 2020, Synthesis of Activated Carbon/Chitosan/Alginate Beads Powder as an Adsorbent for Methylene Blue and Methyl Violet 2B Dyes, *Indones. J. Chem.*, 20, 1119–1130.
- Putra, A., Siswanta, D., and Suratman, A., 2016, Improving the slow release system using chitosan-alginate nanoparticles with various methods for curcumin, *Am. Chem. Sci. J.*, 14, 1–10.

- Rai, P.K., 2022, Novel adsorbents in remediation of hazardous environmental pollutants: Progress, selectivity, and sustainability prospects, *Clean. Mater.*, 3, 100054.
- Riyandari, B.A., Suherman, and Siswanta, D., 2018, The physico-mechanical properties and release kinetics of eugenol in chitosan-alginate polyelectrolyte complex films as active food packaging, *Indones. J. Chem.*, 18, 82–91.
- Saheed, I.O., Oh, W. Da, and Suah, F.B.M., 2021, Chitosan modifications for adsorption of pollutants – A review, *J. Hazard. Mater.*, 408, 124889.
- Shanti, S.K., Aprilita, N.H., and Siswanta, D., 2022, Sodium dodecyl sulfate adsorption on sulfuric acid-crosslinked chitosan/pectin polyelectrolyte complex film, *Key Eng. Mater.*, 920, 43–50.
- Siswanta, D., Hisamoto, H., Sato, S., Matsumoto, Y., Koike, Y., Yamamori, S., and Suzuki, K., 1997, Magnesium Ion-Selective Optodes Based on a Neutral Ionophore and a Lipophilic Cationic Dye, *Anal. Sci.*, 13, 429–435.
- Siswanta, D., Nagatsuka, K., Yamada, H., Kumakura, K., Hisamoto, H., Shichi, Y., Toshima, K., and Suzuki, K., 1996, Structural ion selectivity of thia crown ether compounds with a bulky block subunit and their application as an ion-sensing component for an ion-selective electrode., *Anal. Chem.*, 68, 4166–4172.
- Siswanta, D., Wahyuni, R., and Mudasir, M., 2020, Synthesis of glutaraldehyde-crosslinked carboxymethyl cellulose-polyvinyl alcohol film as an adsorbent for methylene blue, *Key Eng. Mater.*, 840, 35–42.
- Siswanta, D., Yaqin, A.A.A., Suherman, S., Mudasir, M., and Hosseini-Bandegharai, A., 2024, Pb(II) solid-phase extraction in wastewater samples prior to flame atomic absorption spectrometry analysis using chitosan and alginate modified carbon, *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, 1–12.
- Suzuki, K., Sato, K., Hisamoto, H., Siswanta, D., Hayashi, K., Kasahara, N., Watanabe, K., Yamamoto, N., and Sasakura, H., 1996, Design and synthesis of sodium ion-selective ionophores based on 16-crown-5 derivatives for an ion-selective electrode., *Anal. Chem.*, 68, 208–215.

- Suzuki, K., Siswanta, D., Otsuka, T., Amano, T., Ikeda, T., Hisamoto, H., Yoshihara, R., and Ohba, S., 2000, Design and synthesis of a more highly selective ammonium ionophore than nonactin and its application as an ion-sensing component for an ion-selective electrode, *Anal. Chem.*, 72, 2200–2205.
- Taoufik, N., Boumya, W., Elmoubarki, R., Elhalil, A., Achak, M., Abdennouri, M., and Barka, N., 2022, Experimental design, machine learning approaches for the optimization and modeling of caffeine adsorption, *Mater. Today Chem.*, 23, 100732.
- Yaqin, A.A.A., Suherman, S., Hosseini-Bandegharai, A., Aimbetova, E., and Siswanta, D., 2024, A simple and effective procedure for trace Pb(II) preconcentration and analysis in milk powders using alginate/chitosan/PVA composite as adsorbent, *J. Food Compos. Anal.*, 136, 106756.
- Yaqin, A.A.A., Suherman, S., Mudasir, M., and Siswanta, D., 2022, Carbon/Alginate/Chitosan Composite as a Sorbent for Solid-Phase Extraction and Preconcentration of Cu (II), *Indones. J. Chem.*, 22, 1469–1479.
- Yaqin, A.A.A., Suherman, S., Siswanta, D., and Hosseini-Bandegharai, A., 2025, Fast preconcentration of Pb(II) and Cu(II) in liquid milk using syringe solid-phase extraction on alginate and PVA biopolymer loaded with activated carbon, *Anal. Methods*, 17, 1813–1824.
- Yulirohyami, Y., Purwiandono, G., Fatimah, I., Siswanta, D., and Mudasir, M., 2025, Green synthesis of AgNPs-dithizone@chitosan for highly selective and reusable electrochemical sensors of Hg^{2+} , *Microchem. J.*, 214, 114015.
- Zubair, M., Zahara, I., Roopesh, M.S., and Ullah, A., 2023, Chemically cross-linked keratin and nanochitosan based sorbents for heavy metals remediation, *Int. J. Biol. Macromol.*, 241, 124446.