

**PERKEMBANGAN RISET BIDANG NANOMATERIAL
MAGNETIK DAN APLIKASINYA**



UNIVERSITAS GADJAH MADA

**Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar
dalam Bidang Ilmu Fisika Material
Pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Gadjah Mada**

**Disampaikan pada Pengukuhan Guru Besar
Universitas Gadjah Mada
pada tanggal 7 Mei 2024**

**Oleh:
Prof. Dr.Eng. Edi Suharyadi, S.Si., M.Si., M.Eng.**

Bismillaahirrahmaanirrahiim

Yang terhormat:

Ketua, Sekretaris, dan Anggota Majelis Wali Amanat Universitas Gadjah Mada;

Rektor dan para Wakil Rektor Universitas Gadjah Mada;

Ketua, Sekretaris, dan Anggota Dewan Guru Besar Universitas Gadjah Mada;

Ketua, Sekretaris, dan Anggota Senat Akademik Universitas Gadjah Mada;

Para Dekan, Wakil Dekan, dan Ketua Lembaga di Universitas Gadjah Mada;

Segenap civitas akademika Universitas Gadjah Mada; dan

Para tamu undangan, sanak saudara, serta hadirin yang saya muliakan.

Assalamu 'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Selamat pagi dan salam sejahtera bagi kita semua.

Segala puji syukur kita panjatkan kehadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas berkah, rahmat, taufik dan kebahagiaan yang telah dilimpahkan-Nya kepada kita semua, sehingga pagi ini kita dapat menghadiri pengukuhan Guru Besar Universitas Gadjah Mada. Pada hari yang berbahagia ini, saya menyampaikan terima kasih kepada Pimpinan Dewan Guru Besar yang terhormat, yang telah memberikan kepercayaan kepada saya, untuk menyampaikan pidato pengukuhan sebagai Guru Besar Ilmu Fisika Material pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Gadjah Mada, terhitung sejak 1 April 2023, sesuai SK Kemdikbudristek Nomor 24375/M/07/2023 tanggal 26 April 2023.

Pimpinan sidang dan hadirin yang saya muliakan

Pada kesempatan yang berbahagia ini, perkenankan saya menyampaikan pidato ilmiah di hadapan para hadirin dengan judul:

Perkembangan Riset bidang Nanomaterial Magnetik dan Aplikasinya

Topik yang saya angkat tersebut didasarkan atas penelitian bidang Kemagnetan dan Material Magnetik yang saya mulai sejak menempuh program Magister di Fisika UGM, pada tahun 1998, program Magister di Department of Applied Chemistry, Waseda University, Jepang tahun 2001, program Doktoral di Department of Electronics, Electrical Engineering, & Computer Science, Nagoya University tahun 2003, Postdoctoral selama 5 tahun di beberapa Lembaga Riset Internasional tahun 2006 sampai 2011, hingga di Laboratorium Fisika Material dan Instrumentasi Departemen Fisika UGM sejak tahun 2012 sampai sekarang. Kemagnetan dan Material Magnetik merupakan cabang dari bidang Fisika dan Kimia, khususnya Ilmu Material.

Bapak, Ibu dan para hadirin yang saya hormati

Secara sederhana, magnet difahami merupakan suatu benda atau bahan yang memiliki sifat dapat menarik logam seperti besi dan lainnya. Sejarah magnet sendiri diawali dengan penemuan suatu batu yang dapat menarik besi dan baja di Yunani. Batu tersebut kemudian dinamakan dengan “magnet” karena pertama kali ditemukan di provinsi Magnesia. Batu magnet yang ditemukan memiliki sifat magnet permanen dan mengandung besi oksida (Livingston, 1990). Produk pertama dari magnet adalah digunakannya jarum besi termagnetisasi sebagai kompas untuk navigasi (Livingston, 1990). Dalam dua abad terakhir, kemajuan penelitian bidang magnet permanen semakin pesat dan memainkan banyak peran besar. Bahan magnet merupakan komponen penting dari komputer, bahkan dalam industri, militer, dan ruang angkasa, hingga bidang kesehatan dan lingkungan. Pertumbuhan penggunaan bahan magnet sebagian besar disebabkan oleh peningkatan sifat magnetik, yang memungkinkan merancang perangkat yang lebih kecil, lebih ringan, dan lebih efisien.

Pada dasarnya, objek dasar dalam bahan magnet adalah momen magnet yang di level atom merupakan hasil interaksi antara *spin magnetic moment* dan *orbital magnetic moment*. Beberapa parameter atau besaran penting dalam bahan magnet meliputi magnetisasi, koersivitas, dan remanensi. Magnetisasi didefinisikan sebagai jumlah momen magnetik per satuan volume yang secara sederhana,

magnetisasi dapat dikaitkan pada proses dimana sebuah bahan akan menjadi magnet (termagnetisasi) jika ditempatkan dalam suatu medan magnet luar. Koersivitas adalah besarnya medan magnet luar yang diperlukan untuk demagnetisasi bahan, setelah magnetisasi bahan mencapai saturasi akibat pengaruh dari medan magnet. Nilai koersivitas dapat menggolongkan bahan mejadi dua yaitu *soft-magnetic material* dan *hard-magnetic material* yang masing-masing ditandai dengan daerah *hysteresis loop* yang sempit dan lebar. Disisi lain, magnetisasi remanen adalah magnetisasi yang tertinggal dalam bahan setelah medan magnet luar dihilangkan (Zhao dkk., 2015).

Perilaku magnetik suatu bahan dapat diklasifikasikan menjadi lima kelompok yaitu diamagnetik, paramagnetik, feromagnetik, ferimagnetik, dan antiferomagnetik. Bahan diamagnetik dan paramagnetik adalah bahan yang tidak menunjukkan interaksi magnetik kolektif dan tidak *magnetically ordered*. Bahan feromagnetik, ferimagnetik, dan antiferomagnetik menunjukkan *long-range magnetic order* di bawah suhu kritis tertentu. Bahan feromagnetik dan ferrimagnetik biasanya dianggap bersifat magnetik, sedangkan bahan lainnya bersifat magnet lemah atau bahkan non-magnetik. Dalam penelitian, sebutan bahan magnet lebih sering dikenakan kepada bahan feromagnetik dan ferrimagnetik. Seperti diketahui, elemen besi (Fe), nikel (Ni), kobalt (Co), dan berbagai paduannya atau *alloy* dari tiga unsur tersebut merupakan material feromagnetik. Salah satu ciri terpenting dari fenomena ini adalah magnetisasi spontan, yaitu ketika suatu material memiliki seluruh momen magnet sejajar meskipun tidak ada medan magnet luar (Kaufman dkk., 2008).

Perkembangan lebih lanjut dalam sifat magnet dicapai melalui pengenalan senyawa logam transisi dan tanah jarang atau paduan diantara keduanya. Salah satu material paduan berbasis magnetik yang populer adalah besi oksida seperti magnetit (Fe_3O_4) dan paduan seperti kobalt ferrit (CoFe_2O_4) serta nikel ferrit (NiFe_2O_4). Secara umum, Fe_3O_4 memiliki struktur kristal invers spinel dengan luas permukaan efektif bergantung pada metode sintesis. Di bawah suhu Curie (850 K), momen magnet pada situs tetrahedral, sejajar secara feromagnetik, sedangkan momen magnet pada situs oktahedral, bersifat antiferromagnetik. Oleh karena itu, pada suhu kamar, magnetit bersifat

ferrimagnetik (Hudak, 2011). Terdapat hal menarik ketika ukuran bahan magnetik diperkecil ke skala nanometer, yaitu mulai berubahnya sifat fisik, listrik, dan kemagnetannya. Bahan magnetik berukuran nanometer atau nanomaterial magnetik dapat disajikan dalam bentuk nanopartikel, lapisan tipis (*thin film*), *nanowire*, *nanofiber*, dan lain-lain. Bahan feromagnetik terdiri dari domain-domain, ketika ukurannya mengecil terdiri dari domain magnetik tunggal, sehingga mengakibatkan fenomena superparamagnetik. Superparamagnetik dapat meningkatkan potensial aplikasi di berbagai bidang (Zheng dkk., 2006).

Pimpinan sidang, Bapak/Ibu dan hadirin yang saya muliakan

1. HDD dan GMR Sensor

Salah satu pemanfaatan nanomaterial magnetik yaitu pada pengembangan teknologi *hard disk drive* (HDD). Manfaat utama nanomaterial magnetik adalah kemampuannya untuk menciptakan titik-titik penyimpanan (*bits*) yang lebih kecil pada media HDD. Dengan demikian, HDD dapat menampung lebih banyak data dalam ruang yang sama, memberikan pengguna kapasitas penyimpanan yang lebih besar tanpa perlu meningkatkan ukuran fisik perangkat (Choi dkk., 2012).

Sejarah HDD dimulai pada tahun 1955 ketika *international business machines corporation* (IBM) mengembangkan perangkat penyimpanan magnetik pertama yang disebut *random access method of accounting and control* (RAMAC) (Hoagland, 2017). RAMAC menggunakan piringan magnetik besar yang berputar untuk menyimpan data. Pada tahun-tahun berikutnya, teknologi HDD terus berkembang dengan peningkatan kapasitas penyimpanan, kecepatan putaran piringan, dan ukuran fisik perangkat. Pada 1980-an, HDD mulai menjadi populer di kalangan pengguna *personal computer* (PC) dengan diperkenalkannya model-model seperti IBM 3380 yang memiliki kapasitas sekitar 2,52 GB. Perkembangan terus berlanjut dan pada 1990-an, HDD menjadi lebih terjangkau secara finansial dan memiliki kapasitas yang lebih besar, mencapai puluhan hingga ratusan gigabyte. Perusahaan seperti Seagate, Western Digital, dan Maxtor menjadi pemimpin dalam industri HDD. Hingga akhirnya awal abad ke-21, era HDD modern dimulai dengan munculnya HDD berkapasitas

tera dan bahkan petabyte (Chen dkk., 2006). Penerapan nanomaterial magnetik pada HDD modern merupakan bagian dari upaya terus-menerus untuk meningkatkan kinerja, kapasitas, dan efisiensi energi perangkat penyimpanan data. Dengan menggunakan nanomaterial magnetik, seperti partikel magnetik yang lebih kecil dan stabil, HDD dapat menyimpan data lebih banyak dalam ruang yang lebih kecil, memberikan kecepatan akses yang lebih cepat, dan mengurangi konsumsi energi secara signifikan.

HDD merupakan perangkat penyimpanan data yang berbasis pada teknologi piringan magnetik untuk merekam informasi digital. Struktur fisik HDD terdiri dari beberapa elemen inti, yaitu *recording disk/media*, *recording head*, *motor spindle*, dan kontroler elektronik (Piramanayagam dan Srinivasan, 2009). *Recording disk* dengan bentuk piringan magnetik berfungsi sebagai media penyimpanan dimana data disimpan dalam bentuk orientasi magnetik pada permukaan piringan, dengan kemungkinan adanya beberapa lapisan untuk meningkatkan kapasitas penyimpanan. *Recording head* berfungsi untuk membaca dan menulis data pada piringan dengan presisi tinggi, sementara motor spindle bertugas memutar piringan pada kecepatan yang diperlukan untuk akses data yang efisien (Tanaka, 2005).

Teknologi utama yang digunakan dalam proses pembacaan data pada HDD adalah *giant magnetoresistance* (GMR). GMR merupakan fenomena di mana resistansi listrik dari bahan berubah sebagai respons terhadap perubahan orientasi magnetik di dalamnya (Fullerton dan Childress, 2016). Albert Fert dan Peter Grünberg adalah dua ilmuwan yang pertama kali menemukan fenomena GMR dan mendapatkan hadiah nobel Fisika tahun 2007. Dalam konteks HDD, GMR diaplikasikan pada *recording head* untuk mendeteksi perubahan orientasi magnetik pada permukaan piringan magnetik, yang mengkodekan data biner (1 dan 0). Struktur fisik GMR terdiri dari dua lapisan ferromagnetik yang dipisahkan oleh lapisan non-ferromagnetik (*spacer*). Perubahan orientasi magnetik pada lapisan ferromagnetik mengakibatkan perubahan resistansi listrik yang dapat diukur, memungkinkan *recording head* untuk mengubah sinyal magnetik menjadi sinyal listrik yang mewakili data digital (Chaudhary dan Kansal, 2015) .

Dengan penerapan teknologi GMR, HDD dapat mencapai kerapatan penyimpanan yang lebih tinggi dan meningkatkan kecepatan proses baca/tulis data. *Recording head* GMR mampu mendeteksi perubahan magnetisasi dengan resolusi yang tinggi, memungkinkan penyimpanan data dalam area yang lebih kecil pada permukaan piringan magnetik. Selain itu, teknologi GMR juga mengurangi gangguan dan kebisingan saat pembacaan data, meningkatkan integritas dan keandalan operasi HDD secara keseluruhan (Fullerton dan Childress, 2016). Oleh karena itu, integrasi antara struktur fisik HDD dengan teknologi GMR menjadi faktor penting dalam mengoptimalkan kinerja, kapasitas, dan efisiensi penyimpanan data dalam konteks komputasi modern.

Pimpinan sidang, Bapak/Ibu dan hadirin yang saya muliakan

2. Riset dan Aplikasi GMR untuk Biosensor

Teknologi biosensor adalah gabungan antara biologi dan sensor yang dirancang untuk mendeteksi dan mengukur komponen biokimia dalam sampel biologis, seperti darah, urine, atau lingkungan mikroba (Chadha dkk., 2022; Kumari dkk., 2023). Hal ini memungkinkan pengukuran kuantitatif atau kualitatif dari berbagai molekul seperti enzim, protein, asam nukleat, hormon, dan lain-lain (Kumar dkk., 2022). Biosensor memiliki berbagai aplikasi, termasuk dalam bidang kesehatan, lingkungan, pertanian, pangan, dan keamanan (Ramesh dkk., 2023; Zhang dkk., 2022). Terkhusus pada bidang kesehatan, beragam biosensor yang telah dikembangkan antara lain biosensor berbasis listrik, optik, dan magnetik. Namun, kebanyakan teknologi biosensor tersebut masih memiliki kekurangan terutama karena biaya yang cukup mahal, pendeteksian yang lama, membutuhkan tenaga ahli, dan pengoperasian yang kompleks (Omidfar dkk., 2020). Salah satu upaya yang dilakukan adalah dengan mengoptimasi penggunaan sensor berbasis magnetik. Beberapa sensor magnetik yang dapat diterapkan sebagai teknologi biosensor yaitu sensor *giant magnetoresistance* (GMR) (Krishna dkk., 2016), *anisotropic magnetoresistance* (AMR) (Wang dkk., 2019), *superconducting quantum interference device* (SQUID) (Kim dkk., 2020), dan *hall effect* (Granell dkk., 2019).

Seiring perkembangan teknologi, mulai pada tahun 1998 sensor GMR mulai diaplikasikan sebagai biosensor dalam mendeteksi biomolekul (Baselt dkk., 1998). Sensor GMR memiliki beberapa keunggulan yaitu *portable*, murah, sensitivitas tinggi, dan pembacaan elektronik *real-time* (Ardiyanti dkk., 2023). Selain itu, sensor GMR memiliki kompatibilitas elektronik yang baik untuk diintegrasikan dengan perangkat elektronik lainnya, teknik instrumentasi yang diperlukan relatif sederhana, dan memungkinkan untuk dibentuk menjadi chip (Giouroudi dan Hristoforou, 2018). Biosensor berbasis GMR memiliki kinerja yang kuat dan stabil karena tidak dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti pH dan suhu. Dengan demikian, sensor GMR memiliki potensi menjanjikan dalam deteksi biomolekul target (Cao dkk., 2020).

Secara teori, sensor GMR bekerja berdasarkan mekanisme perubahan resistansi material feromagnetik (FM) ketika terpapar medan magnet eksternal (Jogschies dkk., 2015). Prinsip dasar biosensor GMR adalah *stray field* yang dihasilkan oleh label magnetik yang berada pada permukaan elemen sensor akan mengubah magnetisasi pada lapisan FM yang berperan sebagai *free layer*, sehingga resistansi biosensor GMR berubah (Huang dkk., 2019). Pada teknologi biosensor GMR, label magnetik menjadi sangat penting karena dapat mempengaruhi sinyal keluaran dan sensitivitas sensor. Oleh karena itu, menentukan jenis nanopartikel magnetik (NPM) sebagai label yang tepat untuk biosensor merupakan suatu keharusan dalam penerapan aplikasi *bio-detection* (Mabarroh dkk., 2022; Wibowo dkk., 2021).

Material berbasis superparamagnetik nanopartikel oksida besi seperti Fe_3O_4 sangat populer digunakan sebagai label magnetik, karena memiliki sifat kemagnetan yang kuat, ukurannya sebanding dengan biomolekul seperti protein dan DNA (Wu dkk., 2019), serta memiliki jangkauan konsentrasi deteksi yang luas. Fe_3O_4 dapat disintesis dengan beberapa metode diantaranya, *sol-gel*, hidrotermal/solvotermal dan kopresipitasi kimia. Dari beberapa jenis metode tersebut, metode kopresipitasi memiliki rute sintesis yang cepat, sederhana, tanpa membutuhkan suhu tinggi, dan mudah dalam mengatur ukuran partikel, sehingga metode ini cenderung banyak digunakan dalam memproduksi

nanopartikel magnetik baik sebagai label magnetik, aplikasi medis, ataupun remediasi lingkungan (Ferreira dkk., 2020).

Berbagai penelitian terus dilakukan untuk mengoptimasi nanopartikel magnetik Fe_3O_4 sebagai label magnetik dalam aplikasi biosensor, salah satunya adalah dengan memodifikasi permukaan nanopartikel magnetik. Beberapa diantaranya adalah memodifikasi struktur Fe_3O_4 dengan menambahkan nanopartikel *silver*, *polyethylene glycol* (PEG), *reduced graphene oxide* (rGO) dan lainnya untuk memperoleh label magnetik yang stabil secara fisik pada aplikasi biosensor (Antarnusa dkk., 2018; Wibowo dkk., 2021). Seiring perkembangan waktu, nanopartikel Fe_3O_4 yang ramah lingkungan menjadi fokus perhatian. Untuk mewujudkan hal ini, proses sintesis dengan menggunakan mekanisme *green synthesis* menawarkan solusi yang sangat mungkin untuk dilakukan. Selain ramah lingkungan, keuntungan lainnya yakni tidak beracun, hemat biaya, dan mengurangi limbah buang produksi, sehingga ini menjadi pilihan yang tepat untuk menghasilkan nanopartikel magnetik Fe_3O_4 yang ramah lingkungan, namun tetap memiliki sifat magnetik yang tinggi (Saini et al., 2016).

Green synthesis umumnya dikenal sebagai cara untuk menghasilkan nanopartikel menggunakan ekstrak tumbuhan dan mikroorganisme seperti jamur dan bakteri (Singh dkk., 2018; Yew dkk., 2020). Ekstrak tumbuhan digunakan karena memiliki kandungan bioaktif seperti senyawa fenolik dan flavonoid. Kandungan bioaktif tersebut dapat mereduksi ion logam menjadi bentuk logam yang lebih stabil, serta dapat berperan sebagai agen stabilisasi dalam sintesis nanopartikel (Altaf dkk., 2021; Matinise dkk., 2017). Hal ini karena fenolik dan flavonoid memiliki gugus fungsi yang dapat berinteraksi dengan permukaan nanopartikel, membantu mencegah agregasi dan koalesensi partikel. Sehingga dapat mempertahankan ukuran, bentuk, dan sifat magnetik yang diinginkan dari nanopartikel (Bhattacharya dkk., 2017; Mahmudzadeh dkk., 2019).

Dalam pembuatan sensor GMR, komponen aktif yang biasa digunakan sebagai sensor adalah lapisan tipis magnetik. Diantara beberapa lapisan tipis yang umum digunakan, lapisan tipis *spin valve* memiliki beberapa kelebihan yaitu sensitivitas tinggi dalam medan magnet rendah, stabilitas termal yang baik, dapat mengontrol arah

magnetisasi yang saling antiparalel, dan *large dynamic range of field* (Li dkk., 2006). Untuk meningkatkan sensitivitas sensor, metode sensing, jenis pembangkit medan magnet dan jumlah komponen aktif yang digunakan cukup mempengaruhi. Jembatan *wheatstone* merupakan salahsatu metode sensing yang direkomendasikan dalam sensor GMR, karena dapat meningkatkan linearitas dari *output*. Selain itu metode jembatan *wheatstone* juga dapat menggunakan maksimal empat buah lapisan tipis *spin valve*. Dua buah *spin valve* sebagai komponen aktif dan dua buah *spin valve* dijaga dari medan magnet eksternal. Sehingga sensitivitas sensor GMR akan meningkat (Djamil dan Ramli, 2017). Memanfaatkan lapisan tipis *spin valve* telah berhasil dilakukan penelitian untuk mendeteksi formalin, gelatin sapi dan gelatin babi menggunakan sensor GMR dengan satu lapisan tipis *spin valve* dengan metode jembatan *wheatstone* dan *Electromagnets coil* digunakan sebagai pembangkit medan magnet (Swastika dkk., 2018). Selain itu, berhasil pula dilakukan monitor terhadap pertumbuhan sel mikroalga menggunakan sensor GMR dengan satu lapisan tipis *spin valve* dengan metode jembatan *wheatstone* dan pembangkit medan magnet eksternal yang digunakan adalah *Electromagnet coil* dan *Helmholtz Coil*.

Selain menggunakan lapisan tipis *spin valve*, dimanfaatkan pula chip sensor GMR sebagai elemen sensing dalam proses pendeteksian biomolekul. Chip sensor GMR dengan kode AAL024 produksi *Nonvolatile Electronics (NVE) Corporation* telah banyak dieksplorasi untuk aplikasi biosensor karena memiliki rasio MR antara 4 – 6%, sehingga cocok digunakan dalam berbagai aplikasi deteksi medan magnet (Baselt dkk., 1998). Beberapa penelitian telah dihasilkan antara lain mengembangkan *platform* baru berbasis chip sensor GMR AAL024 yang dilengkapi dengan rangkaian penguat dasar (LM358) dan mikrokontroler arduino untuk mendeteksi label magnetik $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{Ag}$ (Wibowo dkk., 2022). Selain itu, telah didisain sensor GMR berbasis chip komersial AAL024 dengan nanopartikel magnetik sebagai label untuk mendeteksi biomolekul streptavidin (Ardiyanti dkk., 2023), dan masih banyak yang lainnya.

Selain aplikasi yang sudah ada, terdapat harapan besar terkait pengembangan sensor GMR untuk aplikasi *biodetection* di masa depan.

Salah satunya adalah pengembangan sensor yang lebih sensitif dan spesifik, sehingga mampu mendeteksi biomolekul dengan konsentrasi yang lebih rendah atau variasi genetik yang lebih halus. Hal ini akan memungkinkan diagnosis penyakit yang lebih dini dan akurat, serta pemantauan kesehatan yang lebih tepat.

Selain itu, integrasi sensor GMR dengan teknologi lain seperti nanoteknologi dan kecerdasan buatan diharapkan dapat meningkatkan kemampuan sensor dalam mendeteksi dan menganalisis biomolekul secara kompleks dan dalam waktu yang lebih cepat. Hal ini akan membantu dalam pengembangan obat yang lebih efektif dan tepat sasaran, serta pemantauan terapeutik yang lebih terukur dan responsif. Sensor GMR akan semakin terjangkau secara ekonomis dan mudah diintegrasikan dalam sistem diagnostik yang tersedia di berbagai lingkungan, termasuk di daerah-daerah dengan sumber daya terbatas. Hal ini akan membuka akses lebih luas terhadap teknologi diagnostik canggih dan meningkatkan pemantauan kesehatan masyarakat secara menyeluruh. Dengan terus berkembangnya teknologi sensor GMR dan inovasi dalam aplikasi *biodetection*, diharapkan sensor ini dapat terus memberikan kontribusi yang signifikan dalam meningkatkan diagnosis, pengobatan, dan pemantauan kesehatan, serta mendukung upaya perlindungan lingkungan dan keberlanjutan global.

Bapak, Ibu dan para hadirin yang saya hormati

3. Nanomaterial Magnetik untuk bidang Kesehatan

Diantara aplikasi nanopartikel magnetik bidang Kesehatan *drug delivery*, agen kontras untuk MRI, dan *magnetic hyperthermia* untuk terapi kanker. Sistem penghantaran obat (*Drug Delivery System*) menggunakan nanopartikel magnetik telah diperkenalkan sejak tahun 1980-an. Sistem penghantaran obat merupakan suatu sistem untuk mengirimkan zat terapeutik atau obat yang telah digunakan secara klinis dan pra-klinis dalam pengobatan suatu penyakit (Jain, dkk., 2008). Sistem penghantaran obat dapat dilakukan melalui beberapa rute penghantaran dimana penghantaran paling konvensional dilakukan melalui asupan oral atau injeksi ke pembuluh darah. Salah satu metode yang dikembangkan dalam sistem *drug delivery* adalah dengan sistem penghantaran obat terkontrol (*Controlled Drug Delivery System*)

menggunakan nanopartikel magnetik. Pada sistem ini, obat akan ditargetkan secara langsung ke lokasi penyakit dan pelepasan obat hanya akan terjadi jika terdapat rangsangan tertentu dari tubuh. Hal ini memberikan keuntungan karena efek toksik dari obat dapat diminimalisir dan dosis obat yang terbuang menjadi lebih sedikit. Selain itu, dalam bidang biomedis, nanopartikel magnetik juga dapat diaplikasikan sebagai agen kontras yang diinjeksikan ke dalam tubuh sebelum prosedur pencitraan resonansi magnetik (MRI) untuk meningkatkan kontras gambaran. Nanopartikel magnetik mampu memperkuat sinyal MRI di lokasi yang dituju. Ketika ditempatkan dalam tubuh, nanopartikel ini dapat meningkatkan kontras antara jaringan yang diinginkan dan latar belakang, sehingga memungkinkan untuk melihat struktur internal tubuh dengan lebih jelas dan mendeteksi perubahan patologis seperti tumor, peradangan, atau cedera. Keuntungan utama dari penggunaan agen kontras MRI berbasis nanopartikel adalah kemampuannya untuk memberikan gambaran yang lebih tajam dan detail dari organ dan jaringan yang sedang diperiksa, bahkan pada tingkat sel.

Dalam mengatasi penyakit kanker, juga digunakan terobosan baru yaitu terapi hipertermia magnetik. Hipertermia magnetik merupakan terapi penghancuran sel kanker dengan menggunakan nanopartikel magnetik (Alkhayal dkk., 2021). Hipertermia magnetik menawarkan alternatif dalam pengobatan kanker dengan memanfaatkan panas lokal yang dihasilkan oleh nanopartikel magnetik saat terpapar medan bolak-balik (AMF). Pada umumnya, hipertermia magnetik mencakup peningkatan suhu di kisaran 43-46°C, mengakibatkan perubahan fisiologi pada sel kanker dan pada akhirnya mengarah pada proses *apoptosis/nekrosis* (kematian) sel kanker (Liu dkk., 2020). Sel kanker lebih responsif terhadap suhu hipertermia (43-46°C), sementara suhu tersebut memiliki dampak yang minim pada sel-sel normal. Peningkatan suhu di atas 41°C dapat memengaruhi struktur membran dan interior sel, termasuk meningkatkan fluiditas dan permeabilitas membran sel, melambatkan mekanisme sintesis protein dan asam laktat, menginduksi denaturasi protein dan aglomerasi, serta merusak pembuluh darah tumor atau kanker, mengakibatkan penurunan aliran darah (Obaidat dkk., 2019). Hipertermia magnetik dapat dibagi

menjadi dua jenis utama, yaitu hipertermia internal dan hipertermia eksternal. Dalam hipertermia internal melibatkan penggunaan suatu zat yang dimasukkan ke dalam tubuh untuk bertindak sebagai sumber panas internal. Sementara itu, hipertermia eksternal, panas diterapkan dari luar tubuh melalui metode seperti gelombang mikro, frekuensi radio, USG, dan lainnya. Menurut *National Cancer Institute*, hipertermia dapat terbagi menjadi hipertermia lokal, di mana pemanasan difokuskan pada area kecil seperti jaringan tumor; hipertermia regional, di mana pemanasan ditargetkan pada area yang lebih luas, seperti organ, rongga tubuh, atau anggota tubuh; dan hipertermia seluruh tubuh, digunakan untuk mengobati kanker yang telah menyebar ke seluruh tubuh (Salunkhe dkk., 2014).

Mekanisme terapi hipertermia magnetik adalah nanopartikel magnetik disuntikkan ke dalam jaringan kanker, yang kemudian menjadi target. Selanjutnya, medan magnet eksternal bolak-balik (AMF) diterapkan, sehingga mengubah energi magnetik menjadi energi panas. Dengan demikian, nanopartikel memanaskan area yang terinfeksi, memungkinkan kerusakan pada sel kanker tanpa memberikan dampak signifikan pada jaringan sehat di sekitarnya (Martinkova dkk., 2018). Mekanisme ini memberikan keunggulan karena mampu menargetkan kanker secara spesifik dan meningkatkan efisiensi terapeutik tanpa merugikan sel-sel normal. Ketika partikel nano superparamagnetik terpapar oleh medan magnet bolak-balik frekuensi tinggi, energi dilepaskan dalam bentuk panas di sekitar partikel tersebut, menciptakan panas secara lokal. Panas yang dihasilkan selama hipertermia dapat memecahkan membran sel, mengubah fungsi seluler utama, dan berpotensi memodifikasi atau menghancurkan matriks ekstraseluler tumor (ECM) atau lingkungan mikro tumor (Kritika & Roy, 2022).

Untuk mengukur efisiensi pemanasan nanopartikel ini secara kuantitatif, digunakan istilah yang dikenal sebagai tingkat penyerapan spesifik (SAR) (Yasemian dkk., 2019). Secara umum, ada empat mekanisme independen produksi panas oleh nanopartikel magnetik termasuk arus eddy, *hysteresis loss*, Brownian, dan relaksasi Neel.

Berbagai nanopartikel magnetik seperti Fe_3O_4 (Fini dkk., 2019), ZnFe_2O_4 (Manohar dkk., 2021), CoFe_2O_4 (Lavorato dkk., 2018), dan

CuFe_2O_4 (Fotukian dkk., 2020) telah umum digunakan dalam aplikasi biomedis berkat kombinasi biokompatibilitas dan sifat magnetik yang unggul.

Penelitian hipertermia magnetik telah kami mulai sejak tahun 2018 dengan menyelidiki sifat mikrostruktur, optik, dan magnetik, serta tingkat penyerapan spesifik (SAR) nanopartikel ferit dan bismut ferit/ SiO_2 . Selanjutnya, pada tahun 2021 dilakukan penelitian hipertermia magnetik menggunakan nanopartikel komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Ag}$ yang disintesis hijau dengan ekstrak *Moringa Oleifera* (MO) dalam proses kopresipitasi. Struktur mikro, sifat optik, dan magnetik dari nanopartikel yang disintesis diperiksa dan tingkat penyerapan spesifik (SAR) diukur. Selain itu juga dilakukan penelitian terkait potensi nanopartikel komposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$, yang berhasil dibuat dengan menggunakan metode sintesis hijau dengan ekstrak daun *Moringa oleifera*, sebagai agen hipertermia magnetik. Sifat pemanasan diselidiki dengan mengukur laju penyerapan spesifik (SAR) dalam medan magnet bolak-balik pada berbagai kandungan ZnS.

Pada tahun 2022 dilakukan penelitian potensi aplikasi $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MSN}$ untuk hipertermia magnetik. Komposit nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{mesoporous silica nanoparticles}$ (MSN) telah berhasil diperoleh melalui metode *green synthesis*. Pada tahun 2023 dilakukan penelitian penggabungan nanopartikel magnetik dan nanopartikel berpendar karena merupakan salah satu masalah krusial untuk aplikasi magnetik aplikasi hipertermia. Penelitian ini menyelidiki sifat hipertermia magnetik dari sintesis hijau $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cdots}$. Nanopartikel Fe_3O_4 disintesis menggunakan metode kopresipitasi dengan ekstrak daun kelor (*Moringa oleifera*) ekstrak daun kelor sebagai agen pereduksi dan penstabil. Sebaliknya, Cdots disintesis menggunakan metode hidrotermal dengan limbah kulit semangka sebagai sumber karbon.

Bapak, Ibu dan para hadirin yang saya hormati

4. Nanomaterial Magnetik untuk Degradasi Limbah

Limbah menjadi sebuah tantangan serius karena memiliki potensi besar untuk mencemari lingkungan dan mengancam keseimbangan ekosistem akibat dari kandungan senyawa yang berbahaya. Oleh karena itu, penelitian mengenai metode yang efektif

untuk mengurai limbah menjadi komponen yang lebih aman sangat penting. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah dengan menggunakan fotokatalis dan adsorben (Fazzo dkk., 2017, Chen dkk., 2020; Puspitarum dkk., 2022; Sari dkk., 2023).

Fotokatalis adalah bahan yang mampu mempercepat reaksi kimia menggunakan energi cahaya. Dalam konteks degradasi limbah, fotokatalis dapat digunakan untuk mengurai senyawa organik yang terdapat dalam limbah menjadi molekul yang lebih sederhana dan tidak berbahaya untuk kemudian dibuang ke sungai atau lokasi terdekat tempat produksi (Rehman dkk., 2020).

Contoh material fotokatalis yang sering digunakan adalah TiO_2 , ZnO , dan semikonduktor lainnya (Nasikhudin dkk., 2018; Rini dkk., 2023). Ketika terkena sinar matahari atau lampu UV, fotokatalis tersebut menghasilkan radikal hidroksil yang sangat reaktif, untuk kemudian dapat mengoksidasi senyawa organik yang terkandung dalam limbah, memecahnya menjadi molekul yang lebih sederhana dan tidak berbahaya (Pouramini dkk., 2023).

Sementara itu, Adsorben adalah bahan yang mampu menyerap atau menangkap senyawa-senyawa tertentu dari lingkungan (Gunawardene dkk., 2022). Dalam konteks degradasi limbah, adsorben dapat digunakan untuk menyerap senyawa berbahaya seperti logam berat, pestisida, atau zat warna yang terdapat dalam limbah cair. Berbeda dengan fotokatalis yang mengurai senyawa, adsorben bertujuan untuk mengikat senyawa tersebut sehingga tidak mencemari lingkungan. Contoh adsorben yang umum digunakan adalah *carbon* aktif, zeolit, atau material berbasis tanah liat yang dimodifikasi.

Kombinasi antara fotokatalis dan adsorben sering digunakan dalam proses degradasi limbah untuk memaksimalkan efisiensi penghilangan kontaminan dari lingkungan (Feng dkk., 2022). Sebagai contoh, dalam proses fotokatalitik, fotokatalis seperti TiO_2 digunakan untuk menghasilkan radikal hidroksil yang mengurai senyawa organik (Tumbelaka dkk., 2022), sedangkan adsorben seperti *carbon* aktif digunakan untuk menyerap produk-produk hasil degradasi tersebut sehingga tidak mencemari lingkungan (Long dkk., 2021). Metode ini telah terbukti efektif dalam membersihkan air limbah, baik dalam skala laboratorium maupun skala industri.

Efisiensi fotokatalis dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti jenis fotokatalis yang digunakan, intensitas cahaya, pH larutan, dan lain sebagainya (Jiao dkk., 2019). Begitu pula dengan adsorben, pemilihan jenis adsorben yang tepat dan ketersediaannya dapat mempengaruhi efektivitasnya dalam menyerap kontaminan dari lingkungan. Oleh karena itu, perlu adanya inovasi dalam upaya mengembangkan teknologi fotokatalis dan adsorben ini lebih lanjut. Riset dan pengembangan yang terus-menerus dibutuhkan untuk meningkatkan efisiensi, memperluas aplikasi, dan menurunkan biaya produksi dari teknologi ini.

Nanomaterial magnetik digunakan sebagai dasar pembuatan fotokatalis dan adsorben karena memiliki kemampuan dalam penggunaan kembali material fotokatalis maupun adsorben. Berawal dari tahun 2017 dilakukan penelitian fotokatalitik dan adsorpsi menggunakan nanokomposit $Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4/SiO_2$ yang disintesis dengan metode kopresipitasi untuk mendegradasi polutan *Methylene Blue* (MB). nanokomposit $Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4/SiO_2$ disinari menggunakan sinar UV dengan hasil fotodegradasi sebesar 97,72%. Sehingga nanokomposit $Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4/SiO_2$ dapat menjadi nano-fotokatalis dan nano adsorben yang menjanjikan untuk polutan organik (Indrayana dan Julian, 2018).

Tahun 2019 dilanjutkan dengan penelitian menggunakan nanopartikel core-shell $CoFe_2O_4@ZnO$ dan $NiZnFe_2O_4/SiO_2$ kedua nanokomposit tersebut dilakukan pengujian fotokatalitik menggunakan polutan methylene blue. Hasil degradasi tersebut meningkat seiring dengan meningkatkan konsentrasi ZnO. Sedangkan pada $NiZnFe_2O_4$ yang di-coating dengan SiO_2 sehingga menghasilkan nanomaterial magnetik $NiZnFe_2O_4/SiO_2$ dilakukan uji fotokatalitik menggunakan radiasi sinar UV dan menghasilkan presentasi degradasi sebesar 96% dimana hasil ini lebih tinggi daripada $NiZnFe_2O_4/SiO_2$ (Istiqomah dkk., 2020; Suharyadi dkk., 2022).

Selanjutnya pada tahun 2020 mulai inovasi dengan mensintesis nanomaterial magnetik menggunakan pendekatan *green synthesis* (sintesis hijau) dengan memanfaatkan ekstrak daun *Moringa oleifera* atau daun kelor. Tujuan utama penggunaan bahan alami dalam mensintesis nanomaterial magnetik dalam penelitian ini yaitu untuk

mereduksi penggunaan bahan kimia sehingga produk lebih aman dan ramah lingkungan. Material pertama yang disintesis menggunakan *green synthesis* adalah nanomaterial magnetik Fe_3O_4 . Fe_3O_4 kemudian dikompositkan menggunakan TiO_2 hingga menjadi $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ yang akan diaplikasikan untuk remediasi limbah *methylene blue*. Hasil yang didapatkan dari presentasi degradasi $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ sebesar 99.9%. Pada tahun yang sama dilanjutkan dengan membuat $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{TiO}_2$ dan $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{TiO}_2$ berbasis *green synthesis* dan berhasil dalam mendegradasi polutan pewarna organik (Puspitarum dkk., 2023; Tumbelaka dkk., 2022). Beberapa nanokomposit yang sudah dikembangkan pada tahun 2021 antarlain adalah $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cdots}$, $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2$, $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4/\text{TiO}_2$, CoO/ZnO , dan $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{ZnS}$. Nanokomposit-nanokopist tersebut terbukti mampu dalam mendegradasi pewarna organik serta menghilangkan ion logam berat yang terkandung di dalamnya (Rini dkk., 2023; Sari dkk., 2023).

Material berbasis *graphene* seperti reduce graphene oxide (rGO) juga sudah dilakukan penelitian untuk mengatasi permasalahan limbah cair seperti pewarna organik maupun logam berat. Tahun 2022 dimulai dengan menggabungkan nanomaterial magnetik dengan bahan *graphene* seperti rGO, dimana rGO memiliki berbagai keunggulan sebagai material terkhusus dalam aplikasinya pemurnian limbah cair. Gabungan tersebut membuat berbagai nanokomposit seperti $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{rGO}/\text{TiO}_2$ yang mampu mencapai degradasi tinggi pada limbah pewarna organik. Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{rGO}$ maupun $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{rGO}/\text{TiO}_2$ dibuat melalui proses *green synthesis* sehingga menambah keunggulan dalam pengolahan limbah cair yang lebih ramah lingkungan. Tidak hanya itu, nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ juga dibuat untuk melihat performa nanokomposit dalam mendegradasi *methylene blue* dan menghasilkan presentasi degradasi yang tinggi. Tidak hanya pada limbah pewarna organik *metylene blue* namun juga limbah seperti *rhodamine B* (RhB) juga dapat didegradasi menggunakan nanomaterial magnetik seperti nanokomposit $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{rGO}$, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{rGO}/\text{ZnO}$, dan $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{rGO}$ secara efisien dan mudah untuk dilakukan. Penggunaan material berbasis nanomaterial magnetik mempunyai banyak keuntungan terutama dalam aplikasinya dalam pembuatan fotokatalis dan adsorben, salah satu hal penting yang menjadi point utama

penggunaan nanomaterial magnetik adalah kemampuannya dalam penggunaan kembali katalis dan adsorben sehingga terwujudnya pemurnian limbah secara efisien, mudah, dan lebih ramah lingkungan.

Bapak, Ibu dan para hadirin yang saya hormati

5. Nanomaterial Magnetik untuk Magnet permanen.

Perkembangan riset magnet permanen terus berlanjut dengan berbagai penelitian yang bertujuan meningkatkan kualitas, kekuatan, efisiensi, dan penyimpanan energi secara terus menerus yang ditandai dengan produk energi $(B-H)_{\text{mak}}$ (Kirchmayr, 1996). Pada awal tahun 1900 magnet permanen mulai dikembangkan yang diawali dengan material baja. Kemudian berkembang dari keluarga aluminium – nikel – kobalt (AlNiCo) yang memiliki sifat lebih superior, sifat anisotropy yang kuat. Selanjutnya magnet keramik dengan struktur heksagonal memiliki koersivitas jauh lebih besar dibandingkan dengan magnet sebelumnya. Namun, memiliki suhu curie rendah serta magnetisasi rendah (Zijlstra, 1982). Jenis magnet keramik terbuat dari bahan yang melimpah seperti Fe_2O_3 sehingga dapat diproduksi dengan biaya yang murah. Aplikasi dari magnet keramik biasanya digunakan pada berbagai produk teknologi, terutama produk yang memerlukan magnet permanen seperti pada bidang otomotif, motor, loudspeaker dan generator listrik. Terobosan paling signifikan terjadi pada tahun 1960-an, yakni penemuan magnet permanen tanah jarang atau *rare-earth* untuk pembuatan senyawa magnetik SmCo yang memiliki dua fasa yakni SmCo_5 dan $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Material ini memiliki sifat menyetok kristal tertinggi, sehingga koersivitas tinggi, nilai energi maksimum $(B-H)_{\text{mak}}$ dapat mencapai 30-35 MGOe. Selain itu, stabilitas termal yang baik sehingga dapat memenuhi kebutuhan produksi teknologi masa kini. Namun, ada keterbatasan dari magnet Sm-Co yaitu harga produksinya relative mahal karena terbuat dari logam Co yang kesediaannya terbatas. Oleh karena itu diperlukan magnet permanen dari logam tanah jarang dengan produksi yang lebih murah. Tahun 1984, magnet berbasis Fe yakni fasa *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) yang memiliki sifat magnet yang baik pada suhu kamar dan memerlukan biaya yang rendah. NdFeB terbentuk oleh 2 atom dari suatu unsur tanah jarang Nd, 14 atom Fe dan 1 atom B, sehingga rumus molekul yang terbentuk

adalah $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. NdFeB memiliki $B\text{-}H_{\text{mak}}$ berkisar 30 - 52 MGOe. Aplikasi magnet ini cukup banyak, seperti pada alat elektronik, motor listrik/generator, sensor/transduser, industri otomotif, industri petrokimia dan produk peralatan kesehatan (Sardjono dkk, 2012). Dalam produksinya, NdFeB memerlukan biaya yang lebih murah dibandingkan dengan magnet SmCo . Namun, tidak dapat diaplikasikan pada suhu tinggi, hanya maksimum berkisa sampai suhu 200°C , memiliki ketahanan korosi yang rendah, sehingga dalam aplikasinya diperlukan tambahan perlakuan pada permukaan material, seperti dilapisi dengan nikel, seng, emas dan lain sebagainya (Irasari dkk, 2007).

Seiring dengan berjalannya waktu, pengembangan magnet permanen telah berubah fokus tidak lagi pada pencarian dan penemuan fasa magnetik baru, melainkan pada rekayasa struktur melalui pendekatan nonomaterial magnetik yang bertujuan untuk menimbulkan efek interaksi antar kristalit fasa magnetik yang memiliki nilai magnetisasi saturasi yang tinggi sehingga memiliki karakteristik yang baru. Pada sistem magnet permanen, magnet nanokomposit merupakan magnet multi-fasa dengan ukuran rata-rata kristalit dalam orde nanometer, dimana campuran antara fasa magnetik keras dan lunak terjadi efek interaksi pertukaran antar butir (*grain exchange interaction*) menghasilkan magnet permanen dengan nilai remanen dan energi maksimum $(B\text{-}H)_{\text{mak}}$ tinggi. Sifat kemagnetan nanokomposit ditentukan oleh ukuran kristalinitas atau ukuran butir, bentuk dan distribusi kristalit, serta jenis fasa magnetik penyusun struktur komposit (Idayanti dkk, 2018). Pengembangan penelitian fabrikasi magnet permanen berbasis nanokomposit telah dilakukan oleh para peneliti dengan memvariasikan beberapa faktor yang dapat mempengaruhi sifat magnet yang dihasilkan. Fasa komposit magnetik dapat berbentuk sistem paduan, fasa magnet keras sistem keramik seperti barium dan heksaferit (BHF) dikompositkandengan fasa magnetik lunak seperti $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$, CoFe_2O_4 , dan $\text{Mn Fe}_2\text{O}_4$. Pada sistem *alloy*, fasa magnet tanah jarang seperti SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ digabungkan dengan fasa magnetik lunak seperti $\alpha\text{-Fe}$, Fe_3B dan FeCo (Manaf, 2019). Aplikasi dari bahan magnet permanen berbasis nanokomposit

diantaranya sensor, peralatan biomedik, magnetic optical storage, ferrofluid, magnetic recording media, microwave absorber.

Penutup

Atas keluasan aplikasi nanomaterial magnetik, penelitian bidang nanomaterial magnetik terus mengalami perkembangan yang sangat pesat. Ini menjadi tantangan bagi para peneliti bidang material magnetik untuk terus melakukan penelitian lintas bidang dan transdisipliner, tidak hanya bidang Fisika dan Kimia, tapi juga Kedokteran, Lingkungan, Pertanian, Farmasi, Teknologi Informasi, dan lain sebagainya.

Pimpinan sidang, Bapak, Ibu dan para hadirin yang saya hormati

Mengakhiri pidato ini, izinkan saya menyampaikan terima kasih dan penghargaan kepada institusi, guru-guru, kolega, teman-teman, dan keluarga yang saya cintai dan banggakan yang telah banyak membantu di sepanjang perjalanan karier akademik saya.

Pertama, terima kasih saya sampaikan kepada pemerintah Republik Indonesia, khususnya Kementerian Pendidikan Kebudayaan Riset dan Teknologi RI atas kepercayaan yang diberikan kepada saya untuk memangku jabatan Guru Besar dalam bidang Fisika Material. Pimpinan Universitas, Senat Akademik, Dewan Guru Besar, dan Tim PAK tingkat Fakultas dan Universitas. Pimpinan Fakultas MIPA UGM, Pimpinan dan Anggota Senat Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam UGM, Pimpinan Departemen Fisika, Kepala Laboratorium Fisika Material dan Instrumentasi Departemen Fisika FMIPA UGM

Terima kasih saya sampaikan kepada Prof. Dr.Eng. Yusril Yusuf dan Prof. Dr. Mitrayana yang telah membantu saya menelaah draft naskah pidato ini.

Saya juga tidak akan pernah melupakan jasa guru-guru saya di Departemen Fisika FMIPA, penghormatan dan terima kasih setinggi-tingginya kepada Dra. Zahara Muslim, M.Sc. (DPA S1). Alm. Prof. Kamsul Abraha, Ph.D (Pembimbing 1 Skripsi dan Tesis, guru akademis dan sekaligus guru ideologis), penelitian yang saya geluti sejak aktif kembali di Fisika UGM tahun 2012 hingga saat ini adalah melanjutkan

apa yang sudah dibangun oleh Prof. Kamsul Abraha. Semoga menjadi amal jariyah bagi beliau. Alm. Drs. R Sudirman (Pembimbing 2 Skripsi). Terima kasih juga saya sampaikan kepada Prof. Trimardji Atmono (BATARN/BRIN sebagai Pembimbing Tesis). Juga guru-guru kami, Alm. Prof. Muslim, Ph.D., Alm. Prof. Dr. Karyono, Alm. Dr. Sumartono.

Saya bersyukur menjadi bagian dari Universitas Gadjah Mada, khususnya di departemen Fisika sehingga dapat belajar dan berkembang bersama Prof. Dr. Agung Bambang Setio Utomo, Prof. Dr. Sismanto, Prof. Dr. Harsojo, Prof. Dr. Yusril Yusuf, Prof. Dr. Kuwat Triyana, Prof. Pekik Nurwantoro, Ph.D, Prof. Dr. Arief Hermanto, Prof. Dr. Gede Bayu Suparta, Prof. Dr. Mitrayana, Dr. Moh. Ali Joko Wasono, Dr. Wahyudi, Dr.rer.nat. Muhammad Farchani Rosyid, Dr. Bambang Murdaka, Drs. Sunarta, MS, Drs. Imam Suyanto, M.Si., Dr. Chotimah, Dr. Budi Eka Nurcahya, Dr. Ing. Ari Setiawan, Dr. Eko Sulistya, Dr. Dwi Satya Palupi, Dra. Eko Tri Sulistyani, M.Sc., Dr. Juliasih Partini, Dr.rer.nat. Ade Anggraini, Dr.rer.nat. Wiwit Suryanto, Dr. Mirza Satriawan, Dr. Eng. Rinto Anugraha, Dr. Sudarmaji, Dr. Iman Santoso, Muhamad Darwis Umar, Ph.D., Dr.rer.nat. Mochamad Nukman, Ikhsan Setiawan, S.Si., M.Si., Dr. Eddy Hartantyo, Dr.Eng. Fahrudin Nugroho, Dr.Eng. Ahmad Kusumaatmaja, Dr. rer. nat. Herlan Darmawan, Dr.Sc. Ari Dwi Nugraheni, Moh. Adhib Ulil Absor, Ph.D. Sholihun, Ph.D.Sc., Romy Hanang Setya Budhi, Ph.D., Muhammad Arifin, M.Sc., Elida Lailiya Istiqomah, S.Si., M.Sc., Ph.D. Dr. Afif Rakhman, Idham Syah Alam, Ph.D., Dr. Theodosius Marwan Irnaka, Dr..rer.nat. Sintia Windhi Niasari, Dr. Chalis Setyadi, Ibnu Jihad, S.Si., M.Sc., Adam Sukma Putra, S.Si., M.Si.. Devy Pramudyah Wardani, S.Si., M.Sc.

Terima kasih juga saya sampaikan kepada Bapak/Ibu staf Kependidikan di lingkungan FMIPA umumnya, dan secara khusus di Departemen Fisika. Saya juga mengucapkan penghargaan kepada rekan-rekan di Urusan Pegawai Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.

Demikian juga, saya berterima kasih kepada para Pembimbing saya, saat S2 di Department of Applied Chemistry, Waseda University, Tokyo Jepang, Prof. Tetsuya Osaka, dan Pembimbing saat S3 di

Department of Electronics, Electrical Engineering, & Computer Science, Nagoya University, Jepang, Prof. Shigeru Tsunashima. Juga kepada Prof. Takeshi Kato yang menjadi Host dan juga Team Leader saat saya menjalani program Postdoctoral selama 2 tahun di Venture Buisness Laboratory, Nagoya University Jepang, kepada Prof Ko Mibu yang menjadi Host saat saya menjalani program Postdoctoral selama 2 tahun di SPring-8 (fasilitas Synchrotron Radiation), Jepang, dan Prof. Satoshi Iwata yang menjadi Host saat saya menjalani JSPS Postdoctoral selama 2 tahun di Nagoya University.

Terima kasih juga saya sampaikan kepada para mitra penelitian atas kepercayaan dan kerjasamanya dalam melakukan kolaborasi penelitian, Prof. Dr. Budi Purnama (UNS), Prof. Dr. Dede Juhana (UI), Prof. Dr. Hasniah Aliah (UIN Bandung), Prof. Dr. Sunaryono (UM), Dr. Sigit Tri Wicaksono (ITS), dan Prof. Dr. Setyo Purwanto (BRIN).

Apresiasi dan terima kasih, saya sampaikan juga kepada mahasiswa-mahasiswa bimbingan saya, yang sekaligus tim riset, yang tergabung dalam grup riset ES-Club (ada 42 members di tahun 2024 ini), Asisten Peneliti: Nurul Imani Istiqomah dan Emi Kurnia sari. Mahasiswa S3: Deska Lisma, Dyah Ayu Larasati, Leni Rumiyantri, Mahardika Yoga, Harlina Ardiyantri, Muhammad Riswan, Nugraheni Puspita Rini, Sudarmono, Pinaka Elda Swastika, Wiwien Andriyantri, Mercuryta Dewi dan Kurnia. Mahasiswa S2: Shania Garcia, Marhan Ebit Saputra, Sari Wahyuni, Putri Dwi Jayanti, Hafil Perdana Kusumah, Larisa Jestha Mahardhika, Adhistinka Jiananda, Zurnansyah, Syarifah Nihlah Yahya, Vincent Milano, Siti Fatimah Azzahro, Karina Anggraeni, dan Layyinatus Shifa. Mahasiswa S1: Maureen Annisatul Choir Hidayati Nur, Laeli Alvi Nikhmah, Dani Muhammad Hariyanto, Mareta Fidya Latifa, Hanif Yoma Khoiri, Larasati Hayu Regita Salma, Muthia Fauzia Maulida, Iska Novia Ramadhani, Astutiningtyas Cahyaningrum, Nazhwa Syifa, Nina Alif Flour Rinda, Cattra Ksatria, Bagus Kusuma Dwi, Ikmal Habirohman, dan Galih Sanjaya. Juga kepada para Alumni ES-Club.

Terima kasih juga saya sampaikan kepada para senior di Keluarga Madura Universitas Gadjah Mada, mas Hanafi, mas Dayat (Prof. Nurul Hidayat), dan mas Andri yang telah menyambut dan memandu saya saat pertama kali menginjakkan kaki di Yogyakarta,

hingga pengalaman tinggal di kost bersama. Juga kepada sahabat-sahabat di Masjid Nurul Islam (Jl. Kaliurang KM 5,6), dimana saya pernah tinggal bersama dan menjadi marbot selama 5 tahun sejak tahun 1995 hingga tahun 2000.

Apresiasi dan terima kasih untuk sahabat-sahabat saya yang tergabung di lembaga profesional, Yayasan Indonesia Madani Yogyakarta dan Grup Lesehan Sate Klathak, atas persaudaraan dan kebersamaannya sejak saya kembali (aktif) di UGM tahun 2012 sampai sekarang, bahkan mungkin hingga tahun-tahun ke depan, kalian adalah sumber inspirasi, pemberi semangat dan motivasi untuk terus produktif, konsisten dengan berbagai agenda-agenda kebaikan.

Tidak ada ungkapan terima kasih yang cukup untuk guru-guru saya di SD Negeri Polagan 1 Sampang, SMP Negeri 1 Sampang, dan SMA Negeri 1 Madura.

Terima kasih dan doa istimewa saya panjatkan kepada Allah Subhanahuwata'ala untuk orang tua saya, yaitu Ayahanda Muhammad Syaiful Bahri (almarhum), Ibunda Suhartatik (almarhumah), dan Ibunda (sambung) Sofiyati (almarhumah) yang pada saat hidupnya tiada henti-hentinya mendoakan dan memberikan kami semangat, motivasi, untuk bekerja keras dan pantang menyerah. Juga kepada Ayahanda (mertua) Prof. Dr. Kirbani Sribrotopuspito (almarhum) dan Ibunda (mertua) Sriyani, atas doa-doanya, motivasi, semangat dan inspirasinya. Juga kepada adik-adik saya, Mamak Ismail dan Akhmad Muzzamil, beserta keluarga. Juga kepada kakak-kakak dan adik ipar, Mbak Ani Puspa, Mbak Anindita, dan Adi Wira, beserta keluarga atas do'a dan dukungannya.

Akhirnya, untuk istriku Ati Brata, juga anak-anakku, Fauzan Abdurrahim, Hanifah Arraihanah, dan Taqi Abdurrahman, terima kasih atas do'a, kebersamaan, dukungan, dan pengertiannya.

Pimpinan sidang, Bapak, Ibu dan para hadirin yang saya hormati

Saya akhiri pidato dengan mengucapkan terima kasih kepada para hadirin semua yang telah berkenan hadir dan dengan sabar serta perhatian mengikuti pidato ini. Apabila ada kekurangan dan kesalahan dalam penyampaian saya mohon maaf sebesar-besarnya. Perkenankan saya untuk mohon do'a restu dari hadirin sekalian agar saya diberikan

kemudahan dan kemampuan dalam menjalankan tugas dan tanggung jawab sebagai guru besar di Departemen Fisika di Universitas Gadjah Mada. Semoga Allah Swt senantiasa melimpahkan kasih sayang, taufik dan hidayahnya kepada kita semua.

Aamiin yaa robbal 'alamin.

DAFTAR PUSTAKA

- Alkhalayal, A., Fathima, A., Alhasan, A. H., & Alsharaeh, E. H. (2021). Peg coated Fe₃O₄/RGO nano-cube-like structures for cancer therapy via magnetic hyperthermia. *Nanopartikels*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/nano11092398>.
- Altaf, S., Zafar, R., Zaman, W. Q., Ahmad, S., Yaqoob, K., Syed, A., Khan, A. J., Bilal, M., & Arshad, M. (2021). Removal of levofloxacin from aqueous solution by green synthesized magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles using *Moringa olifera*: Kinetics and reaction mechanism analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 226, 112826. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112826>.
- Antarnusa, G., Elda Swastika, P., & Suharyadi, E. (2018). Wheatstone bridge-giant magnetoresistance (GMR) sensors based on Co/Cu multilayers for bio-detection applications. *Journal of Physics: Conference Series*, 1011(1), 8–13. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1011/1/012061>
- Ardiyanti, H., Aji, N., & Imani, N. (2023). New design of a commercial chip-based GMR sensor with magnetite nanoparticles for biosensing applications. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 8(2), 100556. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2023.100556>
- Baselt, D. R., Lee, G. U., Natesan, M., Metzger, S. W., Sheehan, P. E., & Colton, R. J. (1998). A biosensor based on magnetoresistance technology. This paper was awarded the Biosensors & Bioelectronics Award for the most original contribution to the Congress. *Biosensors and Bioelectronics*, 13(7–8), 731–739. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956566398000372>
- Bhattacharya, G., Sas, S., Wadhwa, S., Mathur, A., McLaughlin, J., & Roy, S. S. (2017). Aloe vera assisted facile green synthesis of reduced graphene oxide for electrochemical and dye removal applications. *RSC Advances*, 7(43), 26680–26688. <https://doi.org/10.1039/c7ra02828h>

- Cao, B., Wang, K., Xu, H., Qin, Q., Yang, J., Zheng, W., Jin, Q., & Cui, D. (2020). Development of magnetic sensor technologies for point-of-care testing: Fundamentals, methodologies and applications. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 312, 112130. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112130>
- Chadha, U., Bhardwaj, P., Agarwal, R., Rawat, P., Agarwal, R., Gupta, I., Panjwani, M., Singh, S., Ahuja, C., Selvaraj, S. K., Banavoth, M., Sonar, P., Badoni, B., & Chakravorty, A. (2022). Recent progress and growth in biosensors technology: A critical review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 109, 21–51. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.02.010>
- Chaudhary, R., & Kansal, A. (2015). A Perspective on The Future of The Magnetic Hard Disk Drive (HDD) Technology. *International Journal of Technical Research and Applications*, 3(3), 63–74. www.ijtra.com
- Chen Ben, M., Lee Tong, H., Peng, K., & Venkataramanan, V. (2006). Hard disk drive servo systems. *Springer*.
- Chen, J., Xiong, Y., Duan, M., Li, X., Li, J., Fang, S., Qin, S., & Zhang, R. (2020). Insight into the Synergistic Effect of Adsorption-Photocatalysis for the Removal of Organic Dye Pollutants by Cr-Doped ZnO [Research-article]. *Langmuir*, 36(2), 520–533. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b02879>
- Choi, C., Noh, K., Kuru, C., Chen, L. H., Seong, T. Y., & Jin, S. (2012). Fabrication of patterned magnetic nanomaterials for data storage media. *Jom*, 64(10), 1165–1173. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0440-z>
- Djamal, M., & Ramli, R. (2017). Giant Magnetoresistance Sensors Based on Ferrite Material and Its Applications. *Magnetic Sensors - Development Trends and Applications*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70548>
- Elda Swastika, P., Antarnusa, G., Suharyadi, E., Kato, T., & Iwata, S. (2018). Biomolecule detection using wheatstone bridge giant magnetoresistance (GMR) sensors based on CoFeB spin-valve thin film. *Journal of Physics: Conference Series*, 1011(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1011/1/012060>

- Fazzo, L., Minichilli, F., Santoro, M., Ceccarini, A., Della Seta, M., Bianchi, F., Comba, P., & Martuzzi, M. (2017). Hazardous waste and health impact: A systematic review of the scientific literature. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 16(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0311-8>
- Feng, J., Ran, X., Wang, L., Xiao, B., Lei, L., Zhu, J., Liu, Z., Xi, X., Feng, G., Dai, Z., & Li, R. (2022). The Synergistic Effect of Adsorption-Photocatalysis for Removal of Organic Pollutants on Mesoporous $\text{Cu}_2\text{V}_2\text{O}_7/\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_8/\text{g-C}_3\text{N}_4$ Heterojunction. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(22). <https://doi.org/10.3390/ijms232214264>
- Ferreira, M., Sousa, J., Pais, A., & Vitorino, C. (2020). The role of magnetic nanoparticles in cancer nanotheranostics. *Materials*, 13(2), 1–25. <https://doi.org/10.3390/ma13020266>.
- Fini, S., Niasari, M., & Ghanbari, D. (2018). Hydrothermal green synthesis of magnetic Fe_3O_4 -carbon dots by lemon and grape fruit extracts and as a photoluminescence sensor for detecting of *E. coli* bacteria. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 203, 481–493. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.06.021>.
- Fotukian, S. M., Barati, A., Soleymani, M., & Alizadeh, A. M. (2020). Solvothermal synthesis of CuFe_2O_4 and Fe_3O_4 nanoparticles with high heating efficiency for magnetic hyperthermia application. *Journal of Alloys and Compounds*, 816, 152548. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152548>.
- Fullerton, E. E., & Childress, J. R. (2016). Spintronics, Magnetoresistive Heads, and the Emergence of the Digital World. *Proceedings of the IEEE*, 104(10), 1787–1795. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2567778>
- Giouroudi, I., & Hristoforou, E. (2018). Perspective: Magnetoresistive sensors for biomedicine. *Journal of Applied Physics*, 124(3). <https://doi.org/10.1063/1.5027035>
- Granell, P. N., Wang, G., Cañon Bermudez, G. S., Kosub, T., Golmar, F., Steren, L., Fassbender, J., & Makarov, D. (2019). Highly compliant planar Hall effect sensor with sub 200 nT sensitivity.

Npj Flexible Electronics, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s41528-018-0046-9>

- Gunawardene, O. H. P., Gunathilake, C. A., Vikrant, K., & Amaraweera, S. M. (2022). Carbon Dioxide Capture through Physical and Chemical Adsorption Using Porous Carbon Materials: A Review. In *Atmosphere* (Vol. 13, Nomor 3). <https://doi.org/10.3390/atmos13030397>.
- Hoagland, A. . (2017). History of Magnetic Disk Storage Based on Perpendicular Magnetic Recording. *2017 IEEE HISTory of ELectrotechnolgy CONference, HISTELCON 2017*, 39(4), 13–18. <https://doi.org/10.1109/HISTELCON.2017.8535815>.
- Hu, P., Zhang, S., Wang, H., Pan, D., Tian, J., Tang, Z., & Volinsky, A. A. (2011). Heat treatment effects on Fe₃O₄ nanoparticles structure and magnetic properties prepared by carbothermal reduction. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(5), 2316–2319. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.10.211>.
- Huang, H. T., Garu, P., Li, C. H., Chang, W. C., Chen, B. W., Sung, S. Y., Lee, C. M., Chen, J. Y., Hsieh, T. F., Sheu, W. J., Ouyang, H., Wang, W. C., Chang, C. R., Wang, C. L., Hsu, M. S., & Wei, Z. H. (2019). Magnetoresistive Biosensors for Direct Detection of Magnetic Nanoparticle Conjugated Biomarkers on a Chip. *Spin*, 9(2), 1–15. <https://doi.org/10.1142/S2010324719400022>.
- Idayanti, N., Manaf, A. dan Dedi (2018). “Magnet Nanokomposit sebagai Magnet Permanen Masa Depan,” *Metalurgi*, 1(1), hal. 1–18.
- Indrayana I.P.T, dan E.S. Julian, (2018). UV Light-Driven Photodegradation of Methylene Nanocomposites UV Light-Driven Photodegradation of Methylene Blue. *Journal of Physics*, 0–5.
- Irasari, P. dan Idayanti, N. (2007). “Aplikasi Magnet Permanen BaFe₁₂O₁₉ dan NdFeB Pada Generator Magnet Permanen Kecepatan Rendah Skala Kecil,” *Indonesian Journal of Materials Science*, 11(1), hal. 38–41.
- Istiqomah, N. I., Muzakki, A. T., Nofrianti, A., Suharyadi, E., Kato, T., & Iwata, S. (2020). The effect of silica on photocatalytic degradation of methylene blue using silica-coated nzn ferrite

- nanoparticles. *Key Engineering Materials*, 855 KEM, 268–273. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.855.268>.
- Jain, K.K., Drug delivery systems. Vol. 2. 2008: Springer.
- Jiao, X. Y., Li, L. shuang, Qin, S., Zhang, Y., Huang, K., & Xu, L. (2019). The synthesis of fluorescent carbon dots from mango peel and their multiple applications. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 577(April), 306–314. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.05.073>.
- Jogschies, L., Klaas, D., Kruppe, R., Rittinger, J., Taptimthong, P., Wienecke, A., Rissing, L., & Wuruz, M. C. (2015). Recent developments of magnetoresistive sensors for industrial applications. *Sensors (Switzerland)*, 15(11), 28665–28689. <https://doi.org/10.3390/s151128665>.
- Kaufman, A. A., Hansen, R. O., & Kleinberg, R. L. K. (2008). Chapter 6 Paramagnetism, Diamagnetism, and Ferromagnetism. In A. A. Kaufman, R. O. Hansen, & R. L. K. B. T.-M. in G. and G. Kleinberg (Eds.), *Principles of the Magnetic Methods in Geophysics* (Vol. 42, pp. 207–254). Elsevier. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0076-6895\(08\)00006-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0076-6895(08)00006-1).
- Kim, N. H., Kim, H. S., Hou, Y., Yu, D., & Doh, Y. J. (2020). Superconducting quantum interference devices made of Sb-doped Bi₂Se₃ topological insulator nanoribbons. *Current Applied Physics*, 20(5), 680–685. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2020.02.020>.
- Kirchmayr, H. R. (1996). “Permanent magnets and hard magnetic materials,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, 29(11), hal. 2763–2778. doi: 10.1088/0022-3727/29/11/007.
- Krishna, V. D., Wu, K., Perez, A. M., & Wang, J. P. (2016). Giant magnetoresistance-based biosensor for detection of influenza A virus. *Frontiers in Microbiology*, 7(MAR), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00400>.
- Kritika, N., & Roy, I. (2022). Therapeutic applications of magnetic nanoparticles: recent advances. *Materials Advances*, 3(20), 7425–7444. <https://doi.org/10.1039/d2ma00444e>.

- Kumar, P., Sarkar, N., Singh, A., & Kaushik, M. (2022). Nanopaper Biosensors at Point of Care. *Bioconjugate Chemistry*, 33(6), 1114–1130. <https://doi.org/10.1021/acs.bioconjchem.2c00213>
- Kumari, M., Gupta, V., Kumar, N., & Arun, R. K. (2023). Microfluidics-Based Nanobiosensors for Healthcare Monitoring. *Molecular Biotechnology*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s12033-023-00760-9>.
- Lavorato, G., Lima, E., Vasquez Mansilla, M., Troiani, H., Zysler, R., & Winkler, E. (2018). Bifunctional CoFe₂O₄/ZnO Core/Shell Nanoparticles for Magnetic Fluid Hyperthermia with Controlled Optical Response. *Journal of Physical Chemistry C*, 122(5), 3047–3057. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b11115>.
- Li, G., Sun, S., Wilson, R. J., White, R. L., Pourmand, N., & Wang, S. X. (2006). Spin valve sensors for ultrasensitive detection of superparamagnetic nanoparticles for biological applications. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 126(1), 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.10.001>.
- Liu, X., Zhang, Y., Wang, Y., Zhu, W., Li, G., Ma, X., & Zhang, Y. (2020). *Theranostics Comprehensive understanding of magnetic hyperthermia for improving antitumor therapeutic efficacy*. 10(8). <https://doi.org/10.7150/thno.40805>.
- Livingston, J. D. (1990). The history of permanent-magnet materials. *Jom*, 42(2), 30–34. <https://doi.org/10.1007/BF03220870>.
- Long, C., Jiang, Z., Shangguan, J., Qing, T., Zhang, P., & Feng, B. (2021). Applications of carbon dots in environmental pollution control: A review. *Chemical Engineering Journal*, 406(August 2020), 126848. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126848>.
- Mabarroh, N., Alfansuri, T., Aji, N., & Imani, N. (2022). Journal of Magnetism and Magnetic Materials Detection of green-synthesized magnetite nanoparticles using spin-valve GMR-based sensor and their potential as magnetic labels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 560(April), 169645. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169645>
- Mahmudzadeh, M., Yari, H., Ramezanzadeh, B., & Mahdavian, M. (2019). Highly potent radical scavenging-anti-oxidant activity of biologically reduced graphene oxide using Nettle extract as a

- green bio-genic amines-based reductants source instead of hazardous hydrazine hydrate. *Journal of Hazardous Materials*, 371(March), 609–624.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.046>.
- Manaf, A. (2019) “Magnet Permanen Nanokomposit Nd-Fe-B/ α -Fe,” *Jurnal Sains Materi Indonesia*, hal. 1–7. doi: 10.17146/jusami.2005.7.1.5006.
- Manohar, A., Vijayakanth, V., & Kim, K. H. (2021). Influence of Ca doping on ZnFe₂O₄ nanoparticles magnetic hyperthermia and cytotoxicity study. *Journal of Alloys and Compounds*, 886, 161276. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161276>.
- Martinkova, P., Brtnicky, M., Kynicky, J., & Pohanka, M. (2018). Iron Oxide Nanoparticles: Innovative Tool in Cancer Diagnosis and Therapy. *Advanced Healthcare Materials*, 7(5). <https://doi.org/10.1002/adhm.201700932>.
- Matinise, N., Fuku, X. G., Kaviyarasu, K., Mayedwa, N., & Maaza, M. (2017). ZnO nanoparticles via Moringa oleifera green synthesis: Physical properties & mechanism of formation. *Applied Surface Science*, 406, 339–347. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.219>.
- Mukherjee, S., Liang, L. and Veiseh, O. (2020) ‘Recent Advancements of Magnetic Nanoparticles in Cancer Therapy’, *Pharmaceutics*, 12(2).
- Nasikhudin, Diantoro, M., Kusumaatmaja, A., & Triyana, K. (2018). Study on Photocatalytic Properties of TiO₂ Nanoparticle in various pH condition. *Journal of Physics: Conference Series*, 1011(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1011/1/012069>.
- Obaidat, I. M., Narayanaswamy, V., Alaabed, S., Sambasivam, S., & Muralee Gopi, C. V. V. (2019). Principles of magnetic hyperthermia: A focus on using multifunctional hybrid magnetic nanoparticles. *Magnetochemistry*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry5040067>.
- Omidfar, K., Ahmadi, A., Syedmoradi, L., Khoshfetrat, S. M., & Larijani, B. (2020). Point-of-care biosensors in medicine: a brief overview of our achievements in this field based on the conducted research in EMRI (endocrinology and metabolism research

- Institute of Tehran University of medical sciences) over the past fourteen years. *Journal of Diabetes and Metabolic Disorders*. <https://doi.org/10.1007/s40200-020-00668-0>
- Piramanayagam, S. N., & Srinivasan, K. (2009). Recording media research for future hard disk drives. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321(6), 485–494. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.05.007>.
- Pouramini, Z., Mousavi, S. M., Babapoor, A., Hashemi, S. A., Pynadathu Rumjit, N., Garg, S., Ahmed, S., & Chiang, W. H. (2023). Recent Advances in MXene-Based Nanocomposites for Wastewater Purification and Water Treatment: A Review. *Water (Switzerland)*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/w15071267>.
- Puspitarum, D. L., Istiqomah, N. I., Larasati, D. A., Kusumaatmaja, A., Aliah, H., & Suharyadi, E. (2023). Photocatalytic mechanism and properties of recyclable hybrid magnetic/semiconductor nanocomposites synthesized via green route for organic dye degradation. *Results in Materials*, 19(August), 100439. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100439>
- Puspitarum, D. L., Istiqomah, N. I., Tumbelaka, R. M., Kusumaatmaja, A., Oshima, D., Kato, T., & Suharyadi, E. (2022). High performance of magnetically separable and recyclable photocatalyst of green-synthesized $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{TiO}_2$ nanocomposites for degradation of methylene blue. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 13(4), 45003. <https://doi.org/10.1088/2043-6262/ac996b>
- Ramesh, M., Janani, R., Deepa, C., & Rajeshkumar, L. (2023). Nanotechnology-Enabled Biosensors: A Review of Fundamentals. *Biosensors*, 13(40), 1–32.
- Rehman, A., Daud, A., Warsi, M. F., Shakir, I., Agboola, P. O., Sarwar, M. I., & Zulfikar, S. (2020). Nanostructured maghemite and magnetite and their nanocomposites with graphene oxide for photocatalytic degradation of methylene blue. *Materials Chemistry and Physics*, 256(May), 123752. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123752>
- Rini, N. P., Istiqomah, N. I., Sunarta, & Suharyadi, E. (2023). Enhancing photodegradation of methylene blue and reusability

- using CoO/ZnO composite nanoparticles. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100301>
- Saini, R. K., Sivanesan, I., & Keum, Y. S. (2016). Phytochemicals of *Moringa oleifera*: a review of their nutritional, therapeutic and industrial significance. *3 Biotech*, 6(2), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0526-3>.
- Salunkhe, A. B., Khot, V. M., & Pawar, S. H. (2014). Magnetic Hyperthermia with Magnetic Nanoparticles: A Status Review. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 14(5), 572–594. <https://doi.org/10.2174/1568026614666140118203550>.
- Sardjono, P. et al. (2012) “Aplikasi Magnet Permanen di Indonesia: Data Pasar dan Pengembangan Material Magnet”, *Seminar Nasional Ilmu Pengetahuan Teknik*, (Des 2012), hal. 85–89.
- Sari, E. K., Tumbelaka, R. M., Ardiyanti, H., Istiqomah, N. I., Chotimah, & Suharyadi, E. (2023). Green synthesis of magnetically separable and reusable Fe₃O₄/Cdots nanocomposites photocatalyst utilizing *Moringa oleifera* extract and watermelon peel for rapid dye degradation. *Carbon Resources Conversion*, 6(4), 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2023.04.003>.
- Singh, J., Dutta, T., Kim, K. H., Rawat, M., Samddar, P., & Kumar, P. (2018). “Green” synthesis of metals and their oxide nanoparticles: Applications for environmental remediation. *Journal of Nanobiotechnology*, 16(1), 1–24. <https://doi.org/10.1186/s12951-018-0408-4>.
- Suharyadi, E., Muzakki, A., Istiqomah, N. I., Puspitarum, D. L., Purnama, B., & Djuhana, D. (2022). Reusability of Photocatalytic CoFe₂O₄ @ZnO Core–Shell Nanoparticles for Dye Degradation. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 11(2), 023004. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/ac4c7c>.
- Tanaka, Y. (2005). Fundamental features of perpendicular magnetic recording and the design consideration for future portable HDD integration. *INTERMAG ASIA 2005: Digests of the IEEE International Magnetism Conference*, 41(10), 82. <https://doi.org/10.1109/intmag.2005.1463510>.

- Tumbelaka, R. M., Istiqomah, N. I., Kato, T., Oshima, D., & Suharyadi, E. (2022). High reusability of green-synthesized $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ photocatalyst nanoparticles for efficient degradation of methylene blue dye. *Materials Today Communications*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104450>.
- Utami, M., Zahra', H. A., Khoirunisa, & Dewi, T. A. (2022). Green synthesis of magnetic activated carbon from peanut shells functionalized with TiO_2 photocatalyst for Batik liquid waste treatment. *Open Chemistry*, 20(1), 1229–1238. <https://doi.org/10.1515/chem-2022-0231>
- Wang, H., Lu, C., Chen, J., Liu, Y., Yuan, S. L., Cheong, S. W., Dong, S., & Liu, J. M. (2019). Giant anisotropic magnetoresistance and nonvolatile memory in canted antiferromagnet Sr_2IrO_4 . *Nature Communications*, 10(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10299-6>
- Wibowo, N. A., Juharni, J., Sabarman, H., & Suharyadi, E. (2021). A Spin-Valve GMR Based Sensor with Magnetite@silver Core-Shell Nanoparticles as a Tag for Bovine Serum Albumin Detection. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 10(10), 107002. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/ac2d4e>
- Wibowo, N. A., Sabarman, H., & Suharyadi, E. (2022). A new platform of iron oxide-based nanoparticles assay using GMR chip-based sensor with microcontroller. *IEEE Sensors Journal*, 22(21), 1–1. <https://doi.org/10.1109/jsen.2022.3207213>
- Wu, K., Su, D., Liu, J., Saha, R., & Wang, J. P. (2019). Magnetic nanoparticles in nanomedicine: A review of recent advances. *Nanotechnology*, 30(50). <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab4241>.
- Yasemian, A. R., Almasi Kashi, M., & Ramazani, A. (2019). Surfactant-free synthesis and magnetic hyperthermia investigation of iron oxide (Fe_3O_4) nanoparticles at different reaction temperatures. *Materials Chemistry and Physics*, 230(February), 9–16.
- Yew, Y. P., Shamel, K., Miyake, M., Ahmad Khairudin, N. B. B., Mohamad, S. E. B., Naiki, T., & Lee, K. X. (2020). Green biosynthesis of superparamagnetic magnetite Fe_3O_4

- nanoparticles and biomedical applications in targeted anticancer drug delivery system: A review. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 2287–2308. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.04.013>.
- Zhang, J., Huang, H., Song, G., Huang, K., Luo, Y., Liu, Q., He, X., & Cheng, N. (2022). Intelligent biosensing strategies for rapid detection in food safety: A review. *Biosensors and Bioelectronics*, 202(November 2021), 114003. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114003>.
- Zhao, G., Zhang, X., & Morvan, F. (2015). Theory for the Coercivity and Its Mechanisms in Nanostructured Permanent Magnetic Materials. *Reviews in Nanoscience and Nanotechnology*, 4(1), 1–25. <https://doi.org/10.1166/rnn.2015.1063>
- Zheng, Y. H., Cheng, Y., Bao, F., & Wang, Y. S. (2006). Synthesis and magnetic properties of Fe₃O₄ nanoparticles. *Materials Research Bulletin*, 41(3), 525–529. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2005.09.015>

BIODATA



Nama : Prof. Dr.Eng. Edi Suharyadi, S.Si., M.Si.,
M.Eng.
Jenis Kelamin : Laki-laki
Tempat, Tanggal Lahir : Sampang, 15 Maret 1975
NIP : 197503151999031003
Pangkat/Golongan : Pembina Tk.1/IVb
Alamat Kantor : Departemen Fisika FMIPA UGM
Alamat Rumah : Jl. Kabupaten KM 6 Kronggahan I,
Trihanggo Gamping, Sleman

Keluarga

Istri : Ati Brata, STP
Anak : 1. Fauzan Abdurrahim
2. Hanifah Arraihanah
3. Taqi Abdurrahman

Pendidikan

1993 – 1998 : S.Si., Fisika, FMIPA UGM
1998 – 2000 : M.Si., Fisika, FMIPA UGM
2001 – 2003 : M.Eng., Department of Applied Chemistry, Waseda
University, Tokyo, Jepang
2003 – 2006 : Dr.Eng., Department of Electronics, Electrical
Engineering, & Computer Science, Nagoya University,
Jepang

PUBLIKASI

(Jurnal Internasional pada 3 tahun terakhir: 2022, 2023, 2024)

2024

1. Muhammad Riswan, Eri Widiyanto, Nurul Imani Istiqomah, Cipto Driyo, Muhammad Arifin, Iman Santoso, and Edi Suharyadi, ***“Tuning Optical Properties of Au Thin Film Using Electric Field for Surface Plasmon Resonance Biosensor Application”***, **Optical Materials** 2024, 150, 115221.
2. Hasniah Aliah, Nugraheni Puspita Rini, Irfan Syafar Farouk, Zurnansyah, Larrisa Jestha Mahardhika, Putri Dwi Jayanti, Hafid Perdana Kusumah, Rivaldo Marsel Tumbelaka, Nurul Imani Istiqomah, Nining Sumawati Asri, Ryan Nur Iman, Edi Suharyadi, ***“Microstructures, Optical, magnetic Properties, and photocatalytic activity of magnetically separable and reusable ZnO-Doped Fe₃O₄/rGO nanocomposite synthesized via green route”***, **Carbon Resources Conversion**, 2024, 7, 100235.
3. Leni Rumiyantri, Shania Garcia, Muhammad Mahfudz Fauzi Syamsuri, Ronius Marjunus, Nurul Imani Istiqomah, Chotimah Chotimah, Edi Suharyadi, ***“Characteristics of Mesoporous Silica Nanoparticles-Benzotriazole Using Rice Husk as an Environmentally Friendly Precursor”***, **Solid State Phenomena**, 2024, 356, 107.
4. Lufsyi Mahmudin, Rafiq Wulandani, Muhammad Riswan, Emi Kurnia Sari, Putri Dwi Jayanti, M Syahrul Ulum, Muhammad Arifin, Edi Suharyadi, ***“Silver nanoparticles-based localized surface plasmon resonance biosensor for Escherichia coli detection”***, **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, 2024, 311, 123985.
5. Marhan Ebit Saputra, Nurul Imani Istiqomah, Laeli Alvi Nikhmah, Leni Rumiyantri, Rivaldo Marsel Tumbelaka, and Edi Suharyadi, ***“A Study on Microstructural and Optical Properties of Green Synthesized Fe₃O₄/Mesoporous Silica Nanoparticles”***, **Advances in Science and Technology**, 2024, 143, 47.
6. Mahardika Yoga Darmawan, Rivaldo Marsel Tumbelaka, Nurul Imani Istiqomah, Ari Dwi Nugraheni, and Edi Suharyadi, ***“Heating***

Efficiency of Green Synthesized Fe₃O₄ Nanoparticles Utilizing Moringa oleifera Extract for Magnetic Hyperthermia Applications”, **Advances in Science and Technology**, 2024, 143, 21.

7. Nur Aji Wibowo, Risha PA Sutrisna, Candra Kurniawan, Edi Suharyadi, Budi Purnama, “*Writing temperature and thickness dependence of perpendicular magnetic-dot magnetization reversal probability*”, **Kuwait Journal of Science**, 2024, 51, 100190.
8. Sari Wahyuni, Muhammad Riswan, Rivaldo Marsel Tumbelaka, Rona Cuana, Nurul Imani Istiqomah, Edi Suharyadi, “*Green Synthesis of Magnetite Nanoparticles using Moringa oleifera and their Electro-Optic Surface Plasmon Resonance Properties*”, **Materials Science Forum**, 2024, 1114, 21-26.
9. Shania Garcia, Ni’matil Mabarroh, Rona Cuana, Harlina Ardiyanti, Nurul Imani Istiqomah, Edi Suharyadi, “*Detection of Green-Synthesized Fe₃O₄/ Chitosan Using Spin Valve GMR Sensor with Wheatstone Bridge Circuit*”, **Materials Science Forum**, 2024, 1114, 9-14.
10. Harlina Ardiyanti, Ni’matil Mabarroh, Nur Aji Wibowo, Nurul Imani Istiqomah, Moh Adhib Ulil Absor, Edi Suharyadi, “*Direct Detection of Green-Synthesized Fe₃O₄ Magnetic Nanotag Using Double-Chip Configuration of Commercial Giant Magnetoresistance Sensor*”, **Materials Science Forum**, 2024, 1114, 3-8.
11. Wiwien Andriyanti, Maureen Annisatul Choir Hidayati Nur, Deska Lismawenning Puspitarum, Tjipto Sujitno, Hari Suprihatin, Setyo Purwanto, Edi Suharyadi, “*Microstructures, magnetic properties and microwave absorption of ion-implanted bismuth ferrite thin films*”, **Physica B: Condensed Matter**, 2024, 676, 415690
12. Zurnansyah Zurnansyah, Putri Dwi Jayanti, Larrisa Jestha Mahardhika, Hafil Perdana Kusumah, Nurul Imani Istiqomah, Edi Suharyadi, “*Microstructural and Optical Properties of Green-Synthesized rGO Utilizing Amaranthus viridis Extract*”, **Materials Science Forum**, 2024, 1133, 3-8.

13. Nur Aji Wibowo, Candra Kurniawan, Dewi K. A. Kusumahastuti, Andreas Setiawan and Edi Suharyadi, “*Review—Potential of Tunneling Magnetoresistance Coupled to Iron Oxide Nanoparticles as a Novel Transducer for Biosensors-on-Chip*”, **Journal of The Electrochemical Society**, 2024, 171, 017512.
14. Sudarmono, Nurul Imani Istiqomah, Siska Irma Budi, Rona Cuana, Deska Lismawenning Puspitarum, Larrisa Jestha Mahardhika, Chotimah, Edi Suharyadi, *Magnetically Separable and Reusable Fe₃O₄/Chitosan Nanocomposites Green Synthesized utilizing Moringa Oleifera Extract for Rapid Photocatalytic Degradation of Methylene blue*, **Results in Chemistry**, 2024, 7, 101245.

2023

15. Haryani, Nurul Imani Istiqomah, Daiki Oshima, Takeshi Kato, Edi Suharyadi, *Crystal Structure, Optical and Magnetic Properties of Green-Synthesized NiZnFe₂O₄/SiO₂ for Degradation of Methylene Blue*, **Materials Science Forum**, 2023, 1104, 105.
16. Siska Irma Budianti, Nurul Imani Istiqomah, Rivaldo Marsel Tumbelaka, Daiki Oshima, Takeshi Kato, Edi Suharyadi, *Effect of TiO₂ on Photocatalytic Activity of NiZnFe₂O₄/TiO₂ Nanocrystalline for Methylene Blue Degradation*, **Materials Science Forum**, 2023, 1104, 117.
17. Shania Garcia, Mahardika Yoga Darmawan, Nur Aji Wibowo, Harlina Ardiyanti, Rivaldo Marsel Tumbelaka, Nurul Imani Istiqomah, Edi Suharyadi, *Two spin-valve GMR thin films on half wheatstone bridge circuit for detecting green-synthesized Fe₃O₄@Ag nanoparticles-labeled biomolecule*, **Materialia**, 2023, 32, 101930.
18. Adhistinka Jiananda, Emi Kurnia Sari, Dyah Ayu Larasati, Rivaldo Marsel Tumbelaka, Harlina Ardiyanti, Mahardika Yoga Darmawan, Nurul Imani Istiqomah, Sigit Tri Wicaksono, Edi Suharyadi, *Optical, microstructural, and magnetic hyperthermia properties of green-synthesized Fe₃O₄/carbon dots nanocomposites utilizing Moringa oleifera extract and watermelon rinds*, **Carbon Trends**, 2023, 13, 100305.

19. Sari Wahyuni, Muhammad Riswan, Nanang Adrianto, Mahardika Yoga Dharmawan, Rivaldo Marsel Tumbelaka, Rona Cuana, Nurul Imani Istiqomah, Adhistinka Jiananda, Shania Garcia, Edi Suharyadi, *Localized surface plasmon resonance properties dependence of green-synthesized Fe₃O₄/Ag composite nanoparticles on Ag concentration and an electric field for biosensor application*, **Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications**, 2023, 57, 101191.
20. Widya Nurul Jannah, Ahmad Taufiq, Siti Zulaikah, Arif Hidayat, Edi Suharyadi, Sigit Tri Wicaksono, Sunaryono Sunaryono, *Fe₃O₄-graphene/polyethylene glycol-SiO₂ as a phase change material for thermal energy storage*, **Materials Chemistry and Physics**, 2023, 310, 128457.
21. Muhammad Riswan, Nanang Adrianto, Ilyas Maulana Yahya, Nurul Imani Istiqomah, Andi Marwanti Panre, Sari Wahyuni, Muhammad Arifin, Iman Santoso, Edi Suharyadi, *Effect of electric field on localized surface plasmon resonance properties of Fe₃O₄/Ag composite nanoparticles*, **Optik**, 2023, 293, 171404.
22. Dyah Ayu Larasati, Deska Lismawenning Puspitarum, Mahardika Yoga Darmawan, Nurul Imani Istiqomah, Juliasih Partini, Hasniah Aliah, Edi Suharyadi, *Green synthesis of CoFe₂O₄/ZnS composite nanoparticles utilizing Moringa Oleifera for magnetic hyperthermia applications*, **Results in Materials**, 2023, 100431.
23. Deska Lismawenning Puspitarum, Nurul Imani Istiqomah, Dyah Ayu Larasati, Ahmad Kusumaatmaja, Hasniah Aliah, and Edi Suharyadi, *Photocatalytic Mechanism and Properties of Recyclable Hybrid Magnetic/Semiconductor Nanocomposites Synthesized via Green Route for Organic Dyes Degradation*, **Results in Material**, 2023, 19, 100439.
24. Nurul Imani Istiqomah, Dyah Ayu Larasati, Aprinanda Nafla Aulia Hanifah, Lusiana Olivia, Daiki Oshima, Takeshi Kato, and Edi Suharyadi, *“Photocatalytic Removal of Methylene Blue Dye Using CoZnFe₂O₄/SiO₂ Magnetic Nanoparticles”*, **Key Engineering Materials**, 2023, 940, 55-64.
25. Nugraheni Puspita Rini, Nurul Imani Istiqomah, and Edi Suharyadi, *“Photocatalytic Activity of CoO/ZnO Nanocrystalline*

- for Dye Wastewater Treatment under UV Light*”, **Materials Science Forum**, 2023, 1080, 85-97.
26. Erna Juwita, Fitria Ayu Sulistiani, Mahardika Yoga Darmawan, Daiki Oshima, Takeshi Kato, and Edi Suharyadi, “*Microstructures, Magnetic Properties and Specific Absorption Rate of Polymer-Modified Bismuth Ferrite Nanoparticles*”, **Key Engineering Materials**, 2023, 940, 21-29.
 27. Nur Aji Wibowo, Cucun Alep Riyanto, Edi Suharyadi, and Harsojo Sabarman, “*Giant Magnetoresistance sensor for rapid and simple bovine serum albumin assay with Ag-functionalized iron oxide nanoparticles label*”, *IEEE Sensors Journal*, 2023.
 28. Muhammad Sadat Hamzah, Muhammad Waziz Wildan, Kusmono, and Edi Suharyadi, “*Effect of sintering temperature on physical, mechanical, and electrical properties of nano silica particles synthesized from Indonesia local sand for piezoelectric application*”, **Journal of Asian Ceramic Societies**, 2023, 11 (1), 178-187.
 29. Leni Rumiyantri, Catur Destiana, Ria Oktaviani, Roniyus Marjunus, and Edi Suharyadi, “*Facile pore size control and low-cost synthesis of mesoporous silica nanoparticles based on rice husk*”, **Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology**, 2023, 14 (1), 015007.
 30. Friska Suryani Sitorus, Rivaldo Marsel Tumbelaka, Nurul Imani Istiqomah, Aulia Nuswantari, and Edi Suharyadi, “*Dielectrics and Optical Properties of Green-Synthesized Fe₃O₄ Nanoparticles*”, **Key Engineering Materials**, 2023, 941, 173-181.
 31. Emi Kurnia Sari, Rivaldo Marsel Tumbelaka, Harlina Ardiyantri, Nurul Imani Istiqomah, and Edi Suharyadi, “*Green Synthesize of Magnetically Separable and Reusable Fe₃O₄/Cdots Nanocomposites Photocatalyst utilizing Moringa Oleifera Extract and Watermelon Peel for Rapid Dye Degradation*”, **Carbon Resources Conversion**, 2023, 6, 274.
 32. Ruth Meisye Kaloari, Eri Widiyanto, I Ketut Agus Putra Dana, Arif Lukmantoro, Edi Suharyadi, Takeshi Kato, Satoshi Iwata, Moh Adhib Ulil Absor, and Iman Santoso, “*Anomalous optical properties of bismuth ultrathin film using spectroscopic*

- ellipsometry in the visible-Ultraviolet range*”, Thin Solid Films, 2023, 773, 139825.
33. Nugraheni Puspita Rini, Nurul Imani Istiqomah, and Edi Suharyadi, “*Enhancing photodegradation of methylene blue and reusability using CoO/ZnO composite nanoparticles*”, Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 2023, 7, 100301.
34. Harlina Ardiyanti, Nur Aji Wibowo, Nurul Imani Istiqomah, Rivaldo Marsel Tumbelaka, Moh Adhib Ulil Absor, and Edi Suharyadi, “*New design of a commercial chip-based GMR sensor with magnetite nanoparticles for biosensing applications*”, Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 2023, 8 (2), 100556.
35. Mahardika Yoga Darmawan, Nurul Imani Istiqomah, Nanang Adrianto, Rivaldo Marsel Tumbelaka, Ari Dwi Nugraheni, and Edi Suharyadi “*Green Synthesis of Fe₃O₄/Ag Composite Nanoparticles using Moringa Oleifera: Exploring Microstructure, Optical, and Magnetic Properties for Magnetic Hyperthermia Applications*”, Results in Chemistry, 2023, 100999.
36. Januar Widakdo, Grandprix Thomryes Marth Kadja, Anawati Anawati, TM Subrahmanya, Hannah Faye Mercado Austria, Tsung-Han Huang, Edi Suharyadi, and Wei-Song Hung, “*Graphene oxide-melamine nanofilm composite membrane for efficient CO₂ gas separation*”, Separation and Purification Technology, 2023, 323, 124521.

2022

37. Rivaldo Marsel Tumbelaka, Nurul Imani Istiqomah, Takeshi Kato, Daiki Oshima, and Edi Suharyadi, “*High Reusability of Green-Synthesized Fe₃O₄/TiO₂ Photocatalyst Nanoparticles for Efficient Degradation of Methylene Blue Dye*”, Materials Today Communications, 2022, 33, 104450.
38. Deska Lismawenning Puspitarum, Nurul Imani Istiqomah, Rivaldo Marsel Tumbelaka, Ahmad Kusumaatmaja, Daiki Oshima,

- Takeshi Kato, and Edi Suharyadi, “*High Performance of Magnetically Separable and Recyclable Photocatalyst of Green-Synthesized $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{TiO}_2$ Nanocomposites for Degradation of Methylene Blue*”, *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2022, 13, 4, 045003.
39. Ni'matil Mabarroh, Taufikuddin Alfansuri, Nur Aji Wibowo, Nurul Imani Istiqomah, Rivaldo Marsel Tumbelaka, and Edi Suharyadi, “*Detection of Green-Synthesized Magnetite Nanoparticles Using Spin-Valve GMR-Based Sensor and Their Potential as Magnetic Labels*”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 560, 169645.
 40. Nur Aji Wibowo, Harsojo Sabarman, Edi Suharyadi, “*A New Platform of Iron Oxide-Based Nanoparticles Assay Using GMR Chip-Based Sensor With Microcontroller*”, *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22, 21, 20093-20101.
 41. Rona Cuana, Andi Marwanti Panre, Nurul Imani Istiqomah, Rivaldo Marsel Tumbelaka, Sunaryono, Sigit Tri Wicaksono, and Edi Suharyadi, “*Green Synthesis of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Chitosan}$ Nanoparticles Utilizing Moringa Oleifera Extracts and Their Surface Plasmon Resonance Properties*”, *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2022, 11, 083015.
 42. Erna Juwita, Fitria Ayu Sulistiani, Mahardika Yoga Darmawan, Nurul Imani Istiqomah, and Edi Suharyadi, “*Microstructural, Optical, and Magnetic Properties and Specific Absorption Rate of Bismuth Ferrite/ SiO_2 Nanoparticles*”, *Materials Research Express*, 2022, 9, 076101.
 43. Nanang Adrianto, Andi Marwanti Panre, Nurul Imani Istiqomah, Muhammad Riswan, Fajar Apriliani, and Edi Suharyadi, “*Localized Surface Plasmon Resonance Properties of Green Synthesized Silver Nanoparticles*”, *Nano-Structures & Nano-Objects*, 2022, 31, 100895.
 44. Muhammad Sadat Hamzah, Muhammad Waziz Wildan, Kusmono, and Edi Suharyadi, “*Synthesis of Silica Nanoparticles from Silica Sand via Vibration Assisted Alkaline Solution Method*”, *International Journal of Engineering*, 2022, 35, 7, 1300-1306.

45. Budi Purnama, Retna Arilasita, Nilam Rikamukti, Utari, Sri Budiawanti, Suharno, Agung Tri Wijayanta, Suharyana, Dede Djuhana, Edi Suharyadi, Terumitsu Tanaka, and Kimihide Matsuyama, “*Annealing Temperature Dependence of Crystalline Structure and Magnetic Properties in Nano-Powder Strontium-Substituted Cobalt Ferrite*”, **Nano-Structures & Nano-Objects**, 2022, 30, 100862.
46. Edi Suharyadi, Afifah Muzakki, Nurul Imani Istiqomah, Deska Lismawenning Puspitarum, Budi Purnama, and Dede Djuhana, “*Reusability of Photocatalytic CoFe₂O₄@ZnO Core-Shell Nanoparticles for Dye Degradation*”, **ECS Journal of Solid State Science and Technology**, 2022, 11, 2, 023004.
47. Andi Marwanti Panre, Ilyas Maulana Yahya, Juharni Juharni and Edi Suharyadi, “*Magneto-Optic Surface Plasmon Resonance Properties of Core-Shell Fe₃O₄@Ag Nanoparticles*”, **Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology**, 2022, 12, 4, 045011.
48. Nur Aji Wibowo, Harsojo, and Edi Suharyadi, “*Prospect of Core-Shell Fe₃O₄@Ag Label Integrated with Spin-Valve Giant Magnetoresistance for Future Point-Of-Care Biosensor*”, **Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology**, 2022, 12, 4, 045013.
49. Ni'matil Mabarroh, Taufikuddin Alfansuri, Nurul Imani Istiqomah, Rivaldo Marsel Tumbelaka, and Edi Suharyadi, “*GMR Biosensor Based on Spin-Valve Thin Films for Green-Synthesized Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles Label Detection*”, **Nano Hybrids and Composites**, 2022, 37, 9-14.
50. Januar Widakdo, Hannah Faye M. Austria, T. M. Subrahmanya, Edi Suharyadi, Wei-Song Hung, Chih-Feng Wang, Chien-Chieh Hu, Kueir-Rarn Lee, and Juin-Yih Lai, “*Switching Gas Permeation Through Smart Membranes by External Stimuli: A Review*”, **Journal of Materials Chemistry A**, 2022, 10, 32, 16743-16760.
51. Rivaldo Marsel Tumbelaka, Nurul Imani Istiqomah, Ni'matil Mabarroh, and Edi Suharyadi, “*Green Synthesis of Fe₃O₄/TiO₂ Nanoparticles Using Extracts of Moringa oleifera*”

Microstructural and Optical Properties”, Solid State Phenomena, 2022, 332, 91-99.

52. Nanang Adrianto, Nurul Imani Istiqomah, Andi Marwanti Panre, and Edi Suharyadi, “*Microstructural and Surface Plasmon Resonance Properties of Green-Synthesized Ag Nanoparticles Using Moringa oleifera Extract*”, Solid State Phenomena, 2022, 332, 85-90.