

BUKU REFERENSI

FISIKA LINGKUNGAN: Teori dan Aplikasi

Penulis:

Dr. Upik Nurbaiti, M.Si.
Fianti, S.Si., M.Sc., Ph.D.
Dr. Ian Yulianti, M. Eng

Desain Cover & Layout:
Nurma Mediasri H

Cetakan Pertama: 2020

Diterbitkan oleh:

Jurusan Fisika FMIPA UNNES, Gedung D7 Lantai 2
Kampus Sekaran Gunungpati, Semarang, 50229.
Telp. (024) 8508034. Email: fisika@mail.unnes.ac.id

ISBN : 978-602-51186-9-2

Hak cipta pada Penerbit

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku tanpa izin penulis

**FISIKA LINGKUNGAN:
Teori dan Aplikasi**

Tim Penyusun:

Dr. Upik Nurbaiti, M.Si.

Fianti, S.Si., M.Sc., Ph.D.

Dr. Ian Yulianti, M. Eng.

**JURUSAN FISIKA - FMIPA UNIVERSITAS
NEGERI SEMARANG**

KATA PENGANTAR

Segala puji kita haturkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan pertolongan-Nya sehingga penulisan buku referensi ini bisa diselesaikan.

Buku **Fisika Lingkungan: Teori dan Aplikasi** ini disusun oleh para dosen yang mengampu mata kuliah Fisika Lingkungan pada program studi S2 Pendidikan Fisika Pasca Sarjana Universitas Negeri Semarang (PASCA UNNES). Memuat topik kemagnetan lingkungan untuk studi polusi antropogenik berdasarkan sifat oksida besi dan sulfida yg memiliki kemampuan untuk menarik dan menyerap logam berat, kontaminan organik, dan bahkan polutan radioaktif. Dilanjutkan dengan membahas energi terbarukan sebagai teknik yang cepat dan hemat biaya untuk menjamin sustainabilitas terpenuhinya energi. Juga mengupas tuntas materi sensor optic untuk mengukur baik secara in situ maupun di laboratorium kadar polutan tertentu. Secara umum, hasil studi kasus pencemaran yang disajikan di sini dicirikan oleh sumber kontaminan yang berbeda.

Harapan kami buku ini dapat dipergunakan oleh para mahasiswa sebagai panduan dan rujukan yang memadai.

Demikian. Semoga buku ini bermanfaat.

Semarang, 02 November 2020

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI	iv
KEMAGNETAN LINGKUNGAN	1
Prinsip dan Pengertian Kemagnetan Lingkungan	1
Parameter Magnetik untuk Interpretasi	3
Suseptibilitas Magnetik (c).....	3
Magnetisasi Remanen Anhisteretik (ARM)	7
Magnetisasi Remanen Isotermal (IRM)	7
Magnetisasi Saturasi (Ms)	7
Interpretasi Parameter Magnetik	7
Status Domain	8
Substitusi Isomorphous	8
Interaksi Magnetik.....	8
Solusi terhadap Proses Lingkungan.....	9
Mengidentifikasi Mineral Magnetik Alamiah	10
Siklus Mineral Besi di Alam	13
Perkembangan & Masa Depan Lingkungan Magnetik.....	15
Deposisi dalam Rekam Kontinental	15
Deposisi dalam Rekam Laut.....	18
Pasca Deposisi dan Mineral Magnetik Biogenik.....	22
Proses Pedogenik dan Tanah	22
Diagenesis.....	24
Mineral Biogenik.....	25

POLUSI ANTROPOGENIK & STUDI LINGKUNGAN MAGNETIK.....	27
Polusi Antropogenik.....	27
Lingkungan Magnetik dan Studi Masa Depan	29
Peranan Mineral Magnetik Biogenik.....	32
APLIKASI: DETEKSI POLUTAN	37
Suseptibilitas Magnetik sebagai Indikator Polutan	37
Lumpur Sungai	37
Ikan Sungai	43
Deteksi Logam Berat Dalam Air	47
Logam Berat	47
Sensor Logam Berat	51
GLOSARIUM	59
DAFTAR PUSTAKA.....	61

FISIKA LINGKUNGAN: Teori dan Aplikasi

KEMAGNETAN LINGKUNGAN

- Prinsip dan Pengertian Kemagnetan Lingkungan
- Parameter Magnetik untuk Interpretasi
- Interpretasi Parameter Magnetik
- Solusi terhadap Proses Lingkungan
- Mengidentifikasi Mineral Magnetik Alamiah
- Siklus Mineral Besi di Alam
- Perkembangan & Masa Depan Lingkungan Magnetik
- Pasca Deposisi dan Mineral Magnetik Biogenik

KEMAGNETAN LINGKUNGAN

Ilmu kemagnetan lingkungan mulai berkembang pesat pada pertengahan tahun 1970-an, sebagai teknik magnetik batuan dan mineral yang digunakan untuk mengamati proses pembentukan, transportasi, pengendapan, dan perubahan pasca deposisi mineral magnet di bawah pengaruh berbagai lingkungan. Bahkan sekarang sangat besar kontribusinya pada berbagai bidang penelitian, yaitu cabang geosains, fisika, kimia, serta biologi dan ilmu lingkungan. Bidang aplikasinya semakin bertambah luas, termasuk penelitian tentang perubahan iklim, polusi, biomineralisasi besi, proses pengendapan dan diagenesis dalam sedimen. Konsep dasar yang diterapkan sangat sederhana, yakni dengan mengamati perilaku atau respon material terhadap medan magnet luar yang diberikan. Mineral yang paling sensitif terhadap medan magnet adalah besi dan diperlukan beberapa parameter magnetik untuk pengukuran yang terkait dengan keadaan lingkungan. Proses deteksi sinyal untuk memindai sedimen/sampel harus dilakukan secara rutin dan berkala sehingga dibutuhkan pemahaman tentang fisika dan kimia untuk mengatasi kesulitan dalam menginterpretasi data. Selain itu masih diperlukan tahapan evaluasi parameter magnet lingkungan dari hasil interpretasi secara empiris untuk dikonfirmasi dengan dasar teori. Dengan menggunakan teknik gabungan dan menunjukkan kekuatan kemagnetan lingkungan maka interpretasinya dapat digambarkan secara kuantitatif. Manfaat dan arah perkembangan kemagnetan lingkungan terbaru di masa depan juga dibahas dalam buku ini.

Prinsip dan Pengertian Kemagnetan Lingkungan

Mineral magnetik secara alamiah memiliki ukuran yang beragam, mulai dari orde nanometer hingga berskala mikrometer. Mineral magnetik ini dapat dijumpai

tidak hanya pada tanah atau sedimen saja melainkan juga terdapat pada hewan dan bakteri, pada bahan yang dibakar dari situs arkeologi, bahkan juga ada dalam materi partikulat yang dipancarkan oleh sumber industri dan lalu lintas. Keberadaannya pada tempat yang tidak terbatas tersebut menjadikan mineral magnetik dapat dikatakan mendominasi di setiap lini kehidupan. Akibatnya lingkungan sekitar lekat dengan mineral magnetik sehingga diperlukan gabungan kajian ilmu biologi, kimia, geografis, geofisika, mineralogi dan fisika untuk mengamati fenomenanya.

Evans dan Heller, 2003 mempublikasikan buku *Environmental Magnetism* sebagai subjek kemagnetan lingkungan dalam berbagai ilmu yang juga mengintegrasikan dengan berbagai topik penelitian. Prinsip dasar kemagnetan lingkungan melibatkan hubungan sifat magnetis dari kumpulan mineral dengan proses lingkungan yang mengendalikannya. Perubahan lingkungan seperti iklim, terjadi pada berbagai skala waktu dan dapat mempengaruhi moda transportasi, pengendapan dan proses reaksi diagenetik pembentukan sedimen. Sehingga kemagnetan lingkungan adalah ilmu interdisipliner yang kuat dengan bidang aplikasi yang luas, meliputi: arkeologi, iklim, geomagnetisme, kedokteran serta pencemaran lingkungan. Sehingga pengertian kemagnetan lingkungan adalah ilmu yang mempelajari tentang mineral magnet dengan menerapkan metode karakterisasi magnet.

Tujuan awal studi magnetik batuan dan mineral adalah untuk mengetahui stabilitas arah remanen yang dibawa oleh mineral magnetik selama skala waktu geologi, sehingga sifat magnetik dari dapat diteliti secara sistematis. Sebagaimana diketahui bahwa stabilitas magnet tidak hanya bergantung pada status domain dari mineral magnetik pembentuk batuan, tetapi juga bergantung pada proses perubahan dan bagaimana mineral tersebut terbentuk. Sehingga wacana menghubungkan sifat magnetik dari batuan dan mineral serta perubahan konsentrasi, ukuran butir atau bentuk butir merupakan suatu keniscayaan untuk memahami pengetahuan tentang "kemagnetan lingkungan" (Evans and Heller,

2003). Seiring dengan sejarah perkembangan terbaru, teknik kemagnetan ini ternyata mampu meramalkan kemagnetan lingkungan di masa yang akan datang. Keuntungan lain yang tidak kalah penting adalah metode pengukuran yang cukup efisien dan tidak merusak sehingga sangat menarik untuk dipelajari. Diperkuat dengan berbagai produk penelitian yang telah menghasilkan dan campuran mineral magnetik dalam beberapa tahun terakhir yang signifikan meningkatkan hasil dan prosesnya. Juga canggihnya sistem pengukuran magnetik modern dengan kemudahan tehnik mendeteksi kandungan mineral magnet meskipun dalam jumlah kecil. Fakta-fakta ini akan memastikan penggunaan kemagnetan lingkungan mampu secara luas mengatasi banyak masalah di geosains, fisika dan ilmu lingkungan. Berbagai tema akan dibahas dalam buku ini, termasuk perkembangan yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti seperti biomagnetisme, pemantauan polusi di beberapa tempat dan aplikasi terbaru.

Parameter Magnetik untuk Interpretasi

Parameter magnetik diperlukan agar diperoleh informasi tentang karakteristik besaran-besaran fisis terwakili dan dapat ditentukan secara eksak. Terkait dengan proses geologi dan lingkungan pembentuknya misalnya, sangat tergantung pada konsentrasi, mineralogi partikel magnetik dan status domain dalam sampel. Bila status domain diketahui maka secara tidak langsung ukuran butir magnetik sudah terukur. Interpretasi fisik dari banyak parameter magnet akan diberikan secara singkat dalam buku ini untuk memberikan sketsa konsep utama agar dipahami pembaca. Istilah paling sederhana "oksida" untuk memasukkan baik oksida besi dan oksihidroksida. Contoh mineral yang masuk dalam klasifikasi oksida adalah magnetit, maghemit, dan hematit.

Suseptibilitas Magnetik (c)

Suseptibilitas magnetik adalah rasio antara respons magnetik atau magnetisasi yang diinduksi, (M) dari suatu material terhadap medan magnet yang diberikan (H), dituliskan sebagai:

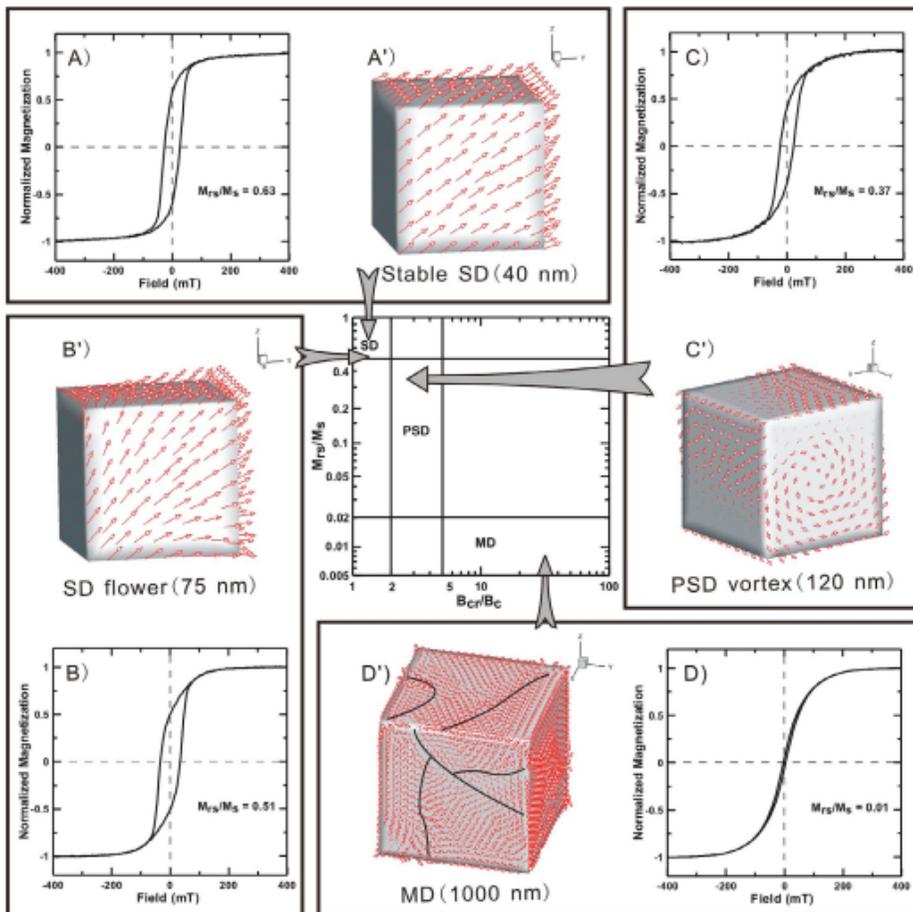
$$\chi = dM/dH \quad \dots \dots \dots (1)$$

Pada temperatur ruang, χ adalah parameter kompleks yang mencerminkan kontribusi dari mineral untuk mempertahankan magnetisasi remanen manakala medan magnet luar yang diberikan dihilangkan. Tiga klasifikasi bahan yaitu: bahan feromagnetik (magnetit, maghemit) dengan katagori magnetisasi remanen kuat, bahan antiferromagnetic (hematit dan goetit) magnetisasi remanen yang lemah dan bahan "nonmagnetik". Bahan nonmagnetic dikelompokkan lagi menjadi 2 macam lagi yaitu: bahan paramagnetik (silikat, lempung) dan bahan diamagnetik (kuarsa, karbonat). Adalagi bahan ferrimagnetik (pirhotit, greigite) yang suseptibilitasnya didefinisikan sebagai:

$$\chi_{\text{ferri}} = \chi - \chi_{\text{high}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

χ_{high} adalah kontribusi komponen bahan paramagnetik dan antiferromagnetic (Hematit dan goetit). Pengurangan ini harus dilakukan mengingat bahwa mineral ferrimagnetik cenderung jenuh bila berada dalam medan magnet besar, sedangkan suseptibilitas dalam keadaan jenuh (χ_{high}) sering digunakan sebagai bagian dari sumbangan bahan nonferrimagnetik (gabungan bahan paramagnetik dan diamagnetik). Sehingga χ_{ferri} sangat bergantung kepada ukuran dan bentuk dari bahan magnet (Liu et al., 2012).

Suseptibilitas ferrimagnetik bergantung pada ukuran butir disebabkan karena efek struktur spin kompleks bahan magnetik. Pada ukuran yang besar (~beberapa ratus nanometer) kristal magnetit akan terbelah menjadi domain-domain magnet seragam. Dinding domain dapat bermigrasi melalui kristal sebagai respons terhadap perubahan kondisi medan dan suhu eksternal membentuk multidomain (MD), lihat Gambar 1D. Berbeda dengan domain tunggal (SD) ideal yang tidak memiliki dinding domain tetapi momen magnet di sepanjang arah tertentu dalam butir yang berperilaku dan memiliki ciri superparamagnetik (SP).



Gambar 1. Kurva histeresis dan status kubus mikromagnetik magnetit dengan ukuran berbeda. (Liu et al., 2012)

Butir dengan ukuran sedang dimana terlalu kecil untuk dikategorikan sebagai domain tetapi terlalu besar untuk dapat dimagnetisasi secara seragam, Gambar 1C, memperlihatkan pola putaran elektronik yang kompleks. Vortex sebagai struktur seperti dinding domain namun bukan merupakan dinding pemisah dua domain, bahkan hampir seluruhnya ditempati oleh butir. Susunan butiran-butiran yang memiliki putaran yang menyebar seperti struktur "bunga". Formasi ini memperlihatkan perilaku transisi antara butir MD dan SD yang disebut dengan butir pseudo domain tunggal (PSD). Dekat batas SP/SD (20-25 nm untuk

magnetit) semuanya menjadi lebih kompleks, ukuran ambang batas di mana bahan dapat bertransformasi dari SD stabil ke perilaku SP atau sebaliknya, bergantung pada waktu dan temperatur pengamatan. Butiran dari status SP di dekat batas SP/SD stabil dapat berubah ke status SD stabil dengan menurunkan temperatur atau rentang waktu pengamatan ketika merespons gaya eksternal oleh medan yang diberikan. Dalam praktek digunakan Instrumen Bartington untuk pengukur suseptibilitas magnetik. Frekuensi operasi alat ini ada dua macam yaitu 470 Hz dan 4700 Hz, data susseptibilitas magnetik pada tiap-tiap frekuensi pengukuran tersebut digunakan untuk menghitung besaran suseptibilitas bergantung frekuensi (χ_{fd}).

$$\chi_{fd} = \chi_{470} - \chi_{4700} \text{ Hz} \quad \dots \dots \dots (3)$$

Normalisasi χ_{fd} terhadap χ_{ferri} menghasilkan:

$$\chi_{fd}\% = \chi_{fd}/\chi_{ferri} \times 100\% \quad \dots \dots \dots (4)$$

Baik χ_{fd} maupun $\chi_{fd}\%$ keduanya digunakan untuk mendeteksi kehadiran butir-butir SD (Liu et al., 2005b). Sementara $\chi_{fd}\%$ juga terkait dengan distribusi ukuran butir dari kumpulan SP/SD. Sedangkan perilaku SP sangat bergantung pada temperatur sehingga pengukuran χ sebagai fungsi suhu sangat penting untuk dilakukan.

Sifat magnet dari bahan MD dan SD pada dasarnya mencerminkan perbedaan mekanisme magnetisasi. Sehingga bahan magnetik sesuai aplikasinya dapat didesain dengan memilih dan mengendalikan proses nukleasi, kondisi lingkungan dan pergerakan dinding domain. Keberhasilan merancang produk bahan tersebut sangat ditentukan oleh hasil pengujian kemampuan momen magnet dalam merespons perubahan medan eksternal pada waktu dan temperatur tertentu, dilanjutkan pengukuran besaran c bergantung frekuensi. Sebaliknya, bahan SP dan MD memiliki banyak kesamaan dalam hal respon magnetiknya, karena keduanya kurang stabil dibandingkan bahan SD.

Magnetisasi Remanen Anhisteretik (ARM)

Magnetisasi remanen anhisteretik adalah kemampuan bahan untuk mempertahankan remanen magnetik setelah diberi medan lemah. Meskipun bahan SD memiliki χ_{ferri} yang rendah namun tetap memiliki remanensi magnetik. Suseptibilitas magnetik ARM (χ_{ARM}) dapat dimanfaatkan melihat perbedaan ukuran butir dengan mengamati perilaku plot grafik χ versus χ_{ARM} .

Magnetisasi Remanen Isothermal (IRM)

Magnetisasi remanen isothermal adalah remanen yang tertinggal dalam sampel setelah diberi medan kuat (1-1000 mT) secara bertahap. Pada temperatur kamar, IRM meningkat seiring dengan penambahan medan yang diberikan hingga mencapai titik jenuh (S_{IRM}). Harga perbandingan $\chi_{\text{ARM}}/S_{\text{IRM}}$ inilah yang digunakan sebagai dasar menentukan ukuran butir. Sementara nilai perbandingan χ/S_{IRM} digunakan untuk menentukan kemampuan perekaman magnetik dari butir SD.

Magnetisasi Saturasi (Ms)

Magnetisasi induksi (M) juga meningkat dengan bertambahnya medan yang diberikan sampai pada titik kritis dimana M tidak lagi merespons medan. Dalam kondisi ini magnetisasi yang dihasilkan disebut sebagai magnetisasi saturasi (Ms). Tidak seperti parameter lain, Ms tidak bergantung pada ukuran butir. Meskipun demikian pengukuran Ms dalam sampel yang mengandung bahan paramagnetik, perlu memperhitungkan keberadaan parameter suseptibilitas paramagnetik.

Interpretasi Parameter Magnetik

Parameter magnet banyak digunakan untuk menjawab pertanyaan lingkungan. Namun seringkali ketidaksesuaian dalam interpretasi parameter magnet terkait dengan proses lingkungan sering diabaikan. Beberapa kelemahan dalam menggunakan parameter magnet dapat diselesaikan dengan mempertimbangkan ketidakunikan dan kompleksitas mineral magnetik campuran.

Status Domain

Secara sistematis, sifat magnetik mineral berubah seiring dengan keadaan domain meskipun banyak kemiripan sifat magnetik antara partikel SP dan MD. Solusi untuk masalah ini adalah dengan menentukan distribusi ukuran butir dari kumpulan mineral magnetik. Korelasi positif antara χ_{fd} dan χ menunjukkan bahwa χ hanya bergantung pada konsentrasi partikel halus. Sementara χ_{fd} (atau $\chi_{fd}\%$) tidak sensitif terhadap partikel yang sangat halus (<10 nm) sehingga χ dari partikel SP ini tidak bergantung pada frekuensi pengukuran. Pengukuran χ_{fd} suhu rendah (<300 K) diperlukan untuk mendeteksi butiran seperti itu. Oleh karena itu diperlukan beberapa pengukuran seperti χ_{fd} , χ/M_s , korelasi antara ARM dan χ , dan peluruhan viskositas IRM untuk menentukan kemungkinan keberadaan partikel SP.

Substitusi Isomorphous

Unsur Fe dalam mineral magnetik sering tersubstitusi secara isomorfis (Ti atau Al dalam kisi kristal). Titanomagnetites secara praktis dianggap sebagai kelas mineral baru daripada sebagai magnetit tersubstitusi Ti sehingga keraguan mengklasifikasikan sebagai magnetit atau titanomagnetit telah teratasi dengan baik.

Interaksi Magnetik

Dalam kebanyakan studi magnet lingkungan, parameter magnet diinterpretasikan dengan mengabaikan pengaruh interaksi magnetostatis di antara partikel dalam bahan. Interaksi magnetostatis tidak dapat diabaikan manakala diaplikasikan pada magnet butir SP/SD. Efek interaksi magnetik pada ARM/ χ harus dipertimbangkan untuk hasil yang untuk memperkirakan paleointensitas geomagnetik relatif. Interaksi di antara partikel SP mengakibatkan penurunan yang berarti terhadap nilai χ_{fd} , secara tidak langsung dapat meningkatkan anisotropi magnetiknya. Ada tiga pendekatan untuk mendeteksi efek dari interaksi magnetik yaitu: (1) penentuan nilai Wohlfarth R dari Cisowski (Cisowski, 1981), (2) menyelidiki distribusi medan interaksi yang sejajar dengan

sumbu y dari diagram FORC (Muxworthy et al., 2004), dan (3) menilai korelasi antara ARM/ χ (atau ARM/SIRM) dan konsentrasi mineral magnetik (Yamazaki, 2008).

Solusi terhadap Proses Lingkungan

Pengukuran parameter magnet dengan menggunakan instrumentasi magnetik yang canggih sangat diperlukan untuk menganalisis data sehingga menghasilkan kesimpulan yang akurat. Namun, masih ada hambatan tambahan untuk menghubungkan parameter magnetik secara unik dengan proses lingkungan. Tidak seperti proksi iklim yang dapat dihubungkan secara kuantitatif terhadap lingkungan, parameter magnetik sering kali hanya memberikan informasi semikuantitatif. Dalam banyak hal, sifat magnetis terkait dengan iklim melalui berbagai proses lingkungan yang kompleks dan berpotensi terjadi interaksi. Mulai dari sumber ke pengendapan, mineral magnetik yang dilepaskan dari batuan melalui pelapukan mengalami proses tektonik, lingkungan, dan iklim yang mengangkut dan mengubah mineral tersebut. Juga variasi ukuran butir dalam magnetit PSD/MD bisa terkait dengan perubahan jarak dari sumber atau kekuatan angin, atau keduanya. Informasi lebih rinci diperlukan untuk membedakan antara proses tersebut. Selain itu, mineral magnetis dalam sampel alami dapat memiliki banyak asal yang terkait dengan proses yang berbeda.

Interpretasi data magnetik batuan dalam banyak konteks membutuhkan evaluasi kemungkinan hubungan antara sumber dan bahan yang diendapkan. Beberapa proses pengukuran harus dapat diandalkan dan pengukuran tidak hanya dilakukan pada sampel. Proses-proses ini termasuk pemilahan dan penampian hidrodinamik selama transportasi, perubahan postdepositional dan pedogenesis, dan kontribusi dari mineral magnetik biogenik.

Mengidentifikasi Mineral Magnetik Alamiah

Sampel alami biasanya berisi kumpulan mineral magnetik kompleks dengan komponen yang berpotensi memiliki asal dan ukuran butir yang berbeda. Diperlukan upaya untuk melepaskan atau menguraikan dalam komponen magnet tertentu sesuai karakter secara fisika maupun kimiawi. Oleh karena itu diperlukan beberapa peralatan yang secara umum dapat digunakan menentukan parameter-parameter magnetik, seperti χ , ARM, IRM, dan berbagai rasio antarparametrik (HIRM).

Setelah dilakukan beberapa pengukuran parameter magnetic maka kandungan mineral magnetik dalam sampel dapat diidentifikasi secara efisien. Metoda yang digunakan juga beragam, salah satu diantaranya adalah metode Lowrie (Lowrie, 1990), yang dapat dilakukan di laboratorium manapun dengan peralatan dasar, yaitu dengan mengukur IRM pada bidang terapan yang berbeda di sepanjang tiga sumbu yang saling ortogonal, diikuti oleh demagnetisasi termal bertahap. Sedangkan proses ekstraksi magnetik sering digunakan untuk memisahkan mineral magnet kuat dari matriks nonmagnetik, meskipun mineral magnetik lemah (misalnya, hematit dan goetit) sering tertinggal dalam residu sehingga tidak berhasil diekstraksi. Beberapa cara mendeteksi mineral magnetik:

- Pengendapan Gafitasi

Untuk membagi ukuran bahan menjadi pecahan partikel-partikel diskrit secara khusus dilakukan dengan pemisahan cairan berat yang dapat memusatkan bahan magnet dengan berbagai koersivitas yang mewakili keseluruhan kumpulan magnet.

- Disagregasi sedimen

Disagregasi sedimen menggunakan natrium heksametafosfat dengan bantuan ultrasonic akan menghasilkan fraksi sedimen untuk pengukuran parameter magnet. Pendekatan ini lebih realistis dilakukan unruk memisahkan antara bahan sedimen dari debu dan aerosol. Khusus untuk

sedimen danau, penghilangan komponen biogenik merupakan kunci dasar untuk identifikasi sumber sedimen yang dapat diandalkan.

➤ Perlakuan kimiawi

Metode citratebicarbonate-dithionite (CBD) digunakan untuk sampel tanah/paleosol, yaitu dengan melarutkan mineral pembawa Fe^{3+} berbutir halus termasuk hematit, goetit, maghemit. Sedangkan komponen tanah “oksida” dengan kristal yang tidak sempurna dapat dihilangkan oleh amonium oksalat asam.

➤ Perlakuan thermal

Pendekatan stabilitas termal juga cukup efisien untuk mengidentifikasi bahan karena sinyal magnetik yang dicirikan akan berbeda untuk bahan yang berbeda. Perlakuan termal dari SIRM pada suhu rendah secara kuantitatif digunakan untuk memperkirakan konsentrasi partikel SP. Goethite sering memiliki remanen yang stabil namun tidak dapat dengan mudah dihilangkan dengan demagnetisasi AF, meskipun demikian dapat mengalami kerusakan magnetik secara efisien dengan perlakuan termal pada suhu 150 C. Sedangkan maghemite dan magnetite memiliki stabilitas termal yang berbeda. Maghemite berukuran nano yang berasal dari pedogenik dapat diubah menjadi hematit oleh perlakuan termal pada suhu $> 300^{\circ} C$.

➤ Data Histerisis

Kumpulan bahan magnetik dapat dianalisis dari data histerisis magnetik. Data yang disajikan dalam plot Mr/Ms versus Bcr/Bc pada dasarnya secara tidak langsung dapat digunakan untuk interpretasi secara kuantitatif. Sementara data histeresis dari bahan alami diperlukan untuk interpretasi kuantitatif.

➤ Non Magnetik

Teknik nonmagnetik juga digunakan untuk menaksir konsentrasi "oksida" besi, misalnya, spektra Mössbauer, pengamatan mikroskop elektron (SEM dan TEM) transmisi, difraksi sinar-X (XRD), dan spektroskopi difus reflektansi (DRS). Selain itu ada teknik nonmagnetik intrinsik (TC, TV) dan nonintrinsik (koersivitas) yang secara definitif untuk mengidentifikasi dan mengukur konsentrasi mineral magnetik dalam magnet lingkungan.

➤ Teknik baru

Magnetisme Lingkungan telah menjadi disiplin ilmu yang rumit dan kuantitatif, karena meningkatnya penggunaan metode pengukuran dan analisis data yang canggih. Teknik sinkrotron memungkinkan identifikasi mineral dan bilangan oksidasi kation, struktur atom, dan sifat magnetis. Dengan teknik ini sifat magnetis dari partikel nano kristalin yang dapat dianalisis semudah partikel kristal yang lebih besar. Keunggulan ini membuka banyak peluang baru untuk pemahaman proses penting untuk magnet lingkungan. Pengukuran berbasis synchrotron juga dapat dilakukan pada skala waktu yang sama dengan reaksi kimia yang mereproduksi reaksi redoks di alam. Keuntungan dari teknik synchrotron adalah fokus pengamatan terukur struktur meskipun fase kristalinitas bahan rendah. Ini adalah minat khusus untuk studi lingkungan, di mana banyak proses terjadi pada permukaan partikel. Pemahaman yang lebih baik tentang sifat magnetik skala atom dari "oksida" besi membantu membangun model yang lebih realistis untuk menjelaskan sifat magnetik dan pengaruhnya terhadap lingkungan. Sehingga penggunaan teknik sinkrotron dalam mempelajari magnet lingkungan saat ini berkembang pesat mengingat kemampuannya pengamatan berskala atomik yang sangat relevan dengan lingkungan.

Siklus Mineral Besi di Alam

Siklus besi global melalui mekanisme kimiawi, fisik, dan biologis adalah daya tarik tersendiri dan berhubungan dengan proses transformasi lokal atau in situ oksida besi. Pada lingkungan yang berbeda akan ditemukan di tanah, debu, dan sedimen lainnya dengan efek mikroba yang berbeda pula. Perubahan sekecil apapun dari lingkungan dapat menimbulkan perubahan yang dapat terukur pada sifat magnetik mineral sehingga dalam studi kasus pada lingkungan dapat dipahami berdasarkan sifat magnetik bahan.

Mineral magnetik dibentuk oleh proses kristalisasi di dalam batuan beku saat mendingin. Mineral magnet yang paling umum dijumpai pada batuan intrusi dan plutonik adalah Magnetit, baik sebagai mineral primer atau sebagai hasil dari perubahan mineral lain. Pada umumnya titanomagnetite ditemukan di basal subaqueous, sementara titanohematite ditemukan di batuan vulkanik felsik. Mineral magnetik dalam batuan intrusif dan plutonik yang mendingin secara perlahan di dalam kerak bumi biasanya memiliki ukuran butir yang lebih kasar, sedangkan mineral dalam batuan ekstrusif yang mendingin dengan cepat di permukaan bumi biasanya memiliki ukuran butir yang lebih halus. Setelah batuan beku bersentuhan dengan udara atau air, mereka mulai mengalami pelapukan. Mineral magnetik yang sudah ada sebelumnya kemudian dilepaskan dari batuan induk dan selanjutnya dapat berubah menghasilkan mineral magnet baru (autigenik).

Mineral magnetik yang paling umum di tanah adalah maghemite, goethite, hematite, dan magnetit. Mineral magnetik di dalam tanah dan bahan induknya saat terkikis oleh air, es atau angin dapat terangkut dengan berbagai mekanisme dan durasi yang bervariasi, kemudian tersimpan dalam sedimen di bawah subaerial (terrestrial) atau subaqueous (lacustrine atau marine). Selama proses transportasi, mineral magnetik dapat berubah secara kimiawi dan dengan penghancuran fisik kecuali mineral magnetik litogenik berbutir kasar yang sering kali bertahan dengan baik setelah pengendapan. Saat sedimen terkubur, proses

diagenesis dalam kondisi tertentu dapat menyebabkan penggantian mineral magnetik detrital melalui pelarutan dan rekristalisasi. Perubahan kimiawi dapat terjadi sepanjang sejarah batuan bahkan ketika sedimen mengalami litifikasi dan berubah menjadi batuan sedimen. Penguburan yang dalam atau pemanasan vulkanik batuan sedimen di bawah pengaruh metamorfisme, yang melibatkan transformasi kimia penting yang bergantung pada kondisi tekanan dan suhu. Peningkatan suhu atau tekanan menyebabkan pelelehan, sehingga siklus batuan kembali ke titik awalnya.

Proses perubahan lingkungan alami (tanah, sedimen, speleothem) dengan sendirinya merekam jejak iklim, hidrologi atau antropogenik. Magnetisme lingkungan adalah salah satu bagian untuk merekam perubahan tersebut melalui deposisi sekaligus perubahan kimiawi ion Fe^{2+} atau Fe^{3+} dalam oksida besi (magnetit, maghemit, hematit), oksida hidroksida besi (goethite, ferrihydrite, lepidocrocite), besi sulfida (greigite, pyrrhotite) atau kisi kristal karbonat (siderit). Transfer elektron antara Fe^{2+} dan Fe^{3+} secara energetik sangat menguntungkan (hanya 0,01 eV), dan setiap transfer menyebabkan perubahan momen magnet 1 Bohr magneton ($9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$) dalam suatu senyawa. Dengan demikian diperlukan alat yang sangat sensitif untuk menguraikan perubahan kecil seperti itu agar sejarah perubahan lingkungan terekam. Sehingga untuk melacak perubahan spesies besi di tanah perlu dilakukan konversi oksida besi atau oksihidroksida menjadi magnetit dengan mereduksi ion besi. Sementara tanah dapat membawa informasi tentang perubahan hidrologi, aktivitas organik, serta aktivitas mikroba pereduksi besi. Konversi magnetit menjadi greigit juga membawa informasi tentang perubahan lingkungan dalam mengurangi lingkungan yang disebabkan oleh degradasi bahan organik.

Siklus besi menjadi faktor utama dalam catatan pengendapan perubahan lingkungan. "Siklus" menunjukkan migrasi ion Fe dari satu kisi kristal (mis., Goetit) ke kisi lainnya (mis., Magnetit). Perubahan kondisi lingkungan dapat dinyatakan dengan menggunakan variabel seperti keasaman, alkalinitas,

kekuatan ion, suhu, karbon organik dan kelimpahan mikrofosil. Siklus besi dilakukan dengan transfer satu elektron dari Fe^{2+} ke Fe^{3+} terjadi peningkatan magnetisasi sebesar 25%, demikian pula magnetisasi untuk proses sebaliknya. Penentuan ukuran partikel magnetik membantu mengidentifikasi perubahan lingkungan tersebut. Misalnya, reduksi besi menimbulkan neoformasi magnetit atau maghemit di lapisan atas tanah sebagai butiran SP (diameter, $d < 20$ nm), yang memiliki χ tinggi, atau sebagai partikel SD yang sedikit lebih besar ($20 \text{ nm} < d < 1 \text{ mm}$) dengan nilai ARM yang besar. Keberadaan partikel SD/SP di tanah memberikan indikasi kuat tentang siklus besi. Siklus besi dalam lingkungan oksidasi dalam "oksida" besi dibantu oleh dua karakteristik: (1) adanya "oksida" besi valensi campuran dan (2) prevalensi rantai polihedral oksigen dan ion hidroksil dalam struktur kristalnya.

Perkembangan & Masa Depan Lingkungan Magnetik

Bagaimana metode magnetis batuan dapat berkontribusi pada penguraian variasi lingkungan baik di masa lalu geologis maupun dalam masa modern. Jejak pengendapan dibahas disini terkait dengan posisi lingkungan yang bersangkutan dengan benua atau laut. Rekam pasca deposisi pedogenik, diagenetik, biomagnetisme, dan polusi antropogenik diberikan secara terpisah karena keduanya menyangkut catatan kontinental dan laut tentang variabilitas lingkungan.

Deposisi dalam Rekam Kontinental

Studi magnetik lingkungan dari sedimen permukaan banyak dilakukan untuk menilai dampak variabilitas iklim pada mineralogi magnetik sumber bahan penyebabnya. Meskipun bahan sumber sangat berbeda di antara daerah-daerah ini namun berdasarkan ciri-ciri umum sumber tersebut dapat dikelompokkan dalam:

➤ **Loess dan Material Eolian**

Loess adalah material yang tertiuap angin (eolian) yang menutupi sekitar 10% dari permukaan tanah dunia, terutama di garis lintang tengah. Debu

pembentuk loess dapat diangkut dalam jarak jauh oleh westerlies ke Samudera Pasifik yang terpencil. Bahkan Asia telah dikenal menjadi sumber debu di es Greenland. Meskipun loess berasal dari gurun di sekitarnya yang asalnya belum dapat ditentukan secara langsung. Selama 2,5 juta tahun terakhir, Dataran Tinggi Loess Cina (CLP) termasuk gurun Gobi di dekatnya dan tiga cekungan pedalaman barat laut (cekungan Junggar, Tarim, dan Qaidam) disinyalir berbutir halus. Sedangkan di Amerika Utara dan Eropa, sebagian besar endapan loess berasal dari tepung batu yang berasal dari daerah glasiasi baru-baru ini. Jika dibandingkan dengan endapan loess di CLP, endapan ini tipis (umumnya <30 m).

➤ Sedimen Aluvial dan Fluvial

Sedimen aluvial dan fluvial dapat terakumulasi dalam periode waktu yang lama dan dalam suksesi yang sangat tebal hingga ribubab m. Sedimen semacam itu sering kali diperkaya oleh oksida besi dengan konsentrasi dan variasi ukuran butirannya dalam jangka Panjang, sehingga dapat mencerminkan perubahan iklim. Terlepas dari itu, sebagian besar sedimen aluvial dan fluvial telah menjadi fokus studi magnetik lingkungan. Selain signifikansi lingkungannya, sedimen fluvial telah dipelajari dalam studi sumber pencemaran untuk membantu interpretasi sedimen laut.

➤ Sedimen Danau

Sedimen danau penting karena dapat merekam sinyal paleoklimatik terestrial secara berkesinambungan dengan resolusi tinggi. Dalam studi rintisan tentang endapan tanah liat di danau, ditemukan bahwa konsentrasi magnetit jauh lebih bervariasi di lapisan musiman. Hal ini menunjukkan bahwa sifat magnetik sedimen danau dikendalikan oleh faktor lingkungan. Perubahan kandungan "oksida" besi magnet baik dari sisi mineralogi, konsentrasi, dan ukuran butir dalam sedimen danau dapat dikaitkan dengan iklim.

Berdasarkan catatan silika biogenik dari Danau Baikal, terdeteksi bahwa terdapat hubungan telekoneksi yang kuat antara Greenland/Atlantik Utara dan perubahan iklim/lingkungan benua. Ditemukan juga bahwa interior benua berinteraksi dengan sistem iklim global, berdasarkan asumsi adanya dominansi samudra/lapisan es terhadap gaya orbital. Diperkuat hasil pengamatan (Thouveny et al., 1994), berupa korelasi skala milenial antara catatan χ dari endapan danau Maar yang mencolok di Massif Central, Prancis. Juga aktivitas gletser gunung, yang sering dikaitkan dengan variabilitas iklim Atlantik Utara. Oleh karena itu wajar apabila perubahan iklim/lingkungan lokal di danau sangat didominasi oleh latar belakang iklim global. Meskipun aktivitas manusia (misalnya, industri ekstraktif, pembukaan lahan, kebakaran, penggembalaan berlebihan, perubahan anggaran nutrisi, konstruksi berat di daerah tangkapan, dll.) juga dapat memodulasi lingkungan lokal secara signifikan.

Ketika efek pasca deposisi terbatas, konsentrasi mineral magnetik dapat digunakan untuk memperkirakan masuknya sedimen secara semikuantitatif dalam daerah tangkapan danau. Oleh karena itu, penting untuk menentukan asal-usul yang berbeda dari kumpulan magnet dalam sedimen danau untuk memungkinkan interpretasi lingkungan yang kuat. Biasanya, partikel magnet yang dihasilkan oleh erosi memiliki ukuran butir yang relatif lebih kasar (PSD/MD). Namun, transformasi pedogenik oksida besi primer (misalnya, dari titanomagnetit menjadi magnetit) di daerah tangkapan dapat menyebabkan sinyal magnetik yang kompleks. Pedogenesis menghasilkan maghemite berbutir halus (SP/SD) dan hematit pigmen. Dengan demikian, perubahan ukuran butir mineral magnetik dan kelimpahan relatif magnetit dan hematit dalam sedimen danau berpotensi dapat digunakan untuk melacak potensi sejarah pelapukan di wilayah sumber.

➤ **Material Kontinental Lainnya**

Selain sedimen dan tanah bahan lain yang dapat memberikan catatan magnetik lingkungan adalah paleoenvironmental benua. Ini termasuk lapisan es kutub, gletser gunung, dan speleothems. Studi lingkungan sampel es dari inti es Greenland (NGRIP) telah menunjukkan korelasi yang erat antara isi debu eolian dan konsentrasi mineral magnetik yang diimbangi oleh variabilitas iklim glasial-interglasial (Lanci et al., 2012). Mineralogi magnetik dari sampel NGRIP terdiri dari campuran magnetit /maghemite dan hematit yang tidak berubah seiring dengan waktu. Studi Speleothems juga telah dilaporkan sebagai inang mineral magnetik yang konsentrasinya dapat diukur dengan menggunakan teknik magnet batuan standar. Meskipun studi magnetik batuan speleothems terbatas pada rekam perilaku medan geomagnetik, jejak magnetisasi alami detrital menunjukkan bahwa studi magnetik lingkungan speleothems berpotensi memberikan rekam iklim yang jauh lebih akurat dibandingkan dengan metoda lainnya.

Deposisi dalam Rekam Laut

Mineral magnetik yang dikirim ke lautan dapat berupa butiran detrital yang sebagian besar dibawa oleh angin, air dan es. Saat ini, pasokan sungai merupakan kontributor utama beban sedimen ke lautan, dengan perkiraan global sekitar 20.000 Tg/tahun. Sedangkan transportasi es dan angin menyumbang beban sedimen yang lebih kecil masing-masing sekitar 2.900 dan 1.100 Tg/tahun. Pemasok beban sedimen lainnya adalah erosi pantai dan partikel kosmik. Erosi pantai memberikan beban sedimen kecil sekitar 200 Tg/tahun. Gunung berapi terkadang mengirimkan abu dalam jumlah yang signifikan (375 Tg/tahun) ke sedimen laut.

Saat ini, es menempati kurang dari 10% permukaan bumi dan terutama terbatas pada garis lintang tinggi (> 60). Meskipun sungai ditemukan di hampir semua garis lintang namun es mengirimkan sekitar 50% dari beban sedimennya ke laut dalam bagian distal. Mekanisme yang dapat mengubah sinyal pengendapan sedimentasi terrigenous adalah reka ulang sedimen oleh arus dasar yang terhubung baik dengan aliran geostropik atau dengan munculnya gerbang laut. Selain itu ada proses yang jauh lebih luas yaitu diagenesis postdepositional yang mengubah sinyal pengendapan sedimentasi terrigenous karena degradasi bahan organik yang dimediasi oleh bakteri. Berikut adalah mekanisme parameter magnetik dalam berkontribusi mengekstraksi informasi lingkungan yang dikodekan dalam rekam sedimen laut:

➤ Pasokan Sedimen Terrigenous oleh Es

Sekitar setengah dari beban sedimen terkikis oleh es dan diangkut ke lingkungan laut (1400 Tg/tahun), kemudian terakumulasi dalam pengaturan proksimal di dalam dasar kontinen dan lereng pada saat es bertemu dengan air dan mencair. Di sana, partikel-partikel yang bervariasi ukurannya dari bongkahan batu sampai lempung akan dipengaruhi oleh aliran gravitasi oleh arus bawah. Saat gunung es mencair, partikel ice rafted debris (IRD) akan tenggelam dan menumpuk di dasar laut. Lapisan IRD dicirikan oleh sebagian besar partikel sedimen berbutir kasar (>150 mm) dan diselingi dengan sedimen biogenik rendah karbonat dan berbutir halus (lempung). Karena tangkapan LIS didominasi oleh kristal magnet yang kuat dan batuan vulkanik yang kaya akan magnetit (titano), lapisan IRD memiliki nilai suseptibilitas magnetik yang jauh lebih tinggi daripada sedimen latar. Parameter magnet yang bergantung pada konsentrasi dan ukuran butir telah digunakan lebih lanjut untuk memvalidasi kesimpulan berdasarkan suseptibilitas magnetik dan untuk memetakan tingkat IRD sejauh selatan lepas pantai Semenanjung. Inilah potensi magnet batuan untuk mengetahui evolusi iklim masa lalu dengan mempelajari material terrigenous yang diangkut oleh es ke lautan.

➤ Pasokan Sedimen Terrigenous oleh Angin

Debu eolian memiliki magnet yang lebih kuat daripada latar belakang. Sedimen akan didominasi bahan biogenik yang terakumulasi di situs laut terbuka bagian distal. Disini susceptibilitas magnetik kembali digunakan untuk mengidentifikasi perubahan debu eolian, yang bersumber dari gurun zonal dan interior kontinental yang kemudian disimpan di cekungan laut tetangga seperti Laut Merah (Rohling et al., 2008). Studi-studi ini telah memberikan kontribusi penting terutama untuk memahami pengaruh dan interaksi iklim lintang tinggi dan rendah yang memaksa evolusi iklim monsoonal. Kombinasi data susceptibilitas magnetik dengan parameter magnet lingkungan lainnya untuk pasokan debu eolian telah menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang menarik antara debu eolian dan susceptibilitas magnetik secara tidak langsung. Begitu juga dengan parameter magnetik lainnya, terutama yang secara kolektif menunjukkan konsentrasi relatif (rasio S) atau absolut (HIRM) dari mineral koersivitas tinggi untuk pasokan debu eolian). Sehingga lingkungan pengoksidasi dan dehidrasi gurun menjadi mudah dideteksi dengan menggunakan pengukuran magnetik lingkungan apabila ditemukan jumlah hematit yang berlimpah dalam debu eolian daerah sumber. Identifikasi yang tepat dari area sumber debu dapat digunakan untuk memprediksi perubahan kekeringan dalam skala regional karena dominasi perubahan kecepatan angin atau pola sirkulasi atmosfer sebagai pembangkit pasokan debu eolian.

➤ Pasokan Sedimen Melalui Sungai

Sungai adalah kontributor utama sedimen ke laut, kenyataan yang menyebabkan daerah fluvial jarang dijadikan fokus studi magnetik lingkungan. Akibatnya, sebagian besar berfokus pada penerapan susceptibilitas magnetik untuk yang mengetahui bagaimana peningkatan nilai χ sebagai respons peningkatan pasokan terrigenous terhadap konsentrasi dan/atau ukuran butir partikel detrital. Dalam kasus ini, rasio

hematit/goetit di sungai tropis besar dikaji dengan mengkaitkan perubahan kekeringan di daerah sumber, mengingat bahwa hematit biasanya terbentuk dalam kondisi yang lebih kering dibandingkan dengan goetit. Perbandingan antara mineral-mineral ini telah digunakan untuk menganalisa perubahan siklik pada aliran fluvial yang berasal dari monsun dari sungai Gangga-Brahmaputra. Terkonfirmasi juga bahwa kekeringan di daerah sumber sungai Gangga-Brahmaputra menjadi penyebab perubahan konsentrasi dan ukuran butir magnetit (titano) yang dihasilkan oleh sungai ini.

➤ Daur Ulang Sedimen oleh Arus Bawah

Setelah diendapkan, sedimen laut dapat dipengaruhi oleh arus bawah yang mengubah karakteristik fisik utama proses pengendapannya. Hal ini akan menghasilkan pembentukan kontur yang disebut atau endapan hanyut, yang karakteristik dan distribusinya tidak bergantung pada garis lintang. Arus dasar tidak hanya mempengaruhi pengurutan partikel dalam sedimen yang hanyut, tetapi juga pengaturan ruangnya. Sebagian besar studi magnetik batuan dan AMS tentang sedimen melayang difokuskan pada dinamika arus bawah seperti di Atlantik Utara dan cekungan peri-Antartika.

➤ Sinyal Sedimen Terrigenous Campuran

Pada umumnya, sumber sedimen terrigenous pada garis lintang tertentu sering bercampur debu eolian dan material terrigenous yang diturunkan secara fluvial. Studi ini secara konsisten menunjukkan terjadinya hubungan antiphase antara debu dan pasokan sungai dengan teridentifikasi hematit eolian di lapisan IRD dari Semenanjung Iberia. Koeksistensi material dari kedua sumber terrigenous menggambarkan kemampuan sistem iklim untuk mengubah distribusi garis lintang material ini. Hal ini menunjukkan bahwa besaran suseptibilitas magnetik berhubungan erat dengan sumber pasokan debu. Betapa penting nya korelasi antara sedimen

laut dan rekaman inti es dalam proses pembentukan model usia sedimen. Bagaimanapun juga baik IRD ataupun debu eolian yang bukan merupakan abu vulkanik terbukti sangat mempengaruhi sifat magnetik sedimen.

Pasca Deposisi dan Mineral Magnetik Biogenik

Pengukuran besaran suseptibilitas magnetik dikendalikan oleh banyak faktor dan tidak sederhana implementasinya. Nilai χ yang diukur pada temperatur rendah banyak dimanfaatkan untuk mengidentifikasi bahan dalam skala local atau regional. Demikian pula dengan beberapa parameter magnet yang digunakan untuk mengetahui konsentrasi, komposisi dan ukuran butir mineral magnetik di suatu tempat. Variasi dalam parameter magnet tidak selalu berhubungan langsung dengan intensitas monsun musim suatu area. Variasi temporal dari sinyal magnetik pada umumnya disebabkan oleh perbedaan geografis dalam waktu dan jumlah curah hujan lokal. Oleh karena itu diperlukan peta variasi spasial suseptibilitas magnetik selama decade tahun terakhir. Dalam peta kontur ini nilai suseptibilitas magnetis rendah dikelompokkan tersendiri karena terkait dengan topografi lokal. Sehingga keberadaan studi magnetik lingkungan bermanfaat untuk studi proses eolian melalui analisis loess dan endapan eolian lainnya.

Proses Pedogenik dan Tanah

Tanah terbentuk melalui perubahan kimia-fisik (pedogenesis) dari bahan induk di bawah pengaruh iklim, organisme, relief dan waktu). Tanah terdiri dari beberapa horizon yang saling berhubungan, yaitu cakrawala A yang memiliki kandungan bahan organik tertinggi meskipun komponen yang terlarut atau bergerak (lempung silikat, besi, aluminium, dan zat humat) dapat diangkut ke cakrawala B. Sedangkan horizon C mewakili materi induk yang relatif tidak berubah. Sifat magnetik dari cakrawala A, B dan C berbeda sehingga sifat magnetik tanah membawa informasi penting tentang dinamika proses pedogenik.

Saat ini ada dua jalur utama alternatif hipotesis pembentukan maghemit di tanah: proses presipitasi langsung dan proses tidak langsung. Untuk presipitasi langsung, fermentasi dilakukan dengan pembentukan magnetit nanopartikel dengan mereduksi Fe^{3+} menjadi Fe^{2+} dengan adanya bahan organik atau bakteri pereduksi besi. Mekanisme kedua adalah melalui pembentukan sementara ferihidrit. Hambatan utama untuk memahami proses transformasi mineral magnetik selama pedogenesis adalah fase perantara yang jarang terjadi bertahan dari proses pedogenik. Namun demikian tetap dapat dilakukan dengan mengamati korelasi positif antara temperatur maghemit yang diproduksi secara pedogenik terhadap konsentrasinya. Meskipun transformasi mineral magnetik selama pedogenesis dikendalikan oleh faktor temperatur, presipitasi, kandungan karbon organik, pH, Eh, dll.

Hasil analisis statistik membuktikan bahwa sifat magnetik (terutama χ) tanah modern sebagian besar ditentukan oleh jumlah curah hujan (Liu et al., 2005a). Dengan demikian maka dimungkinkan untuk merekonstruksi tren temporal dan spasial masa lalu. Karena hubungan antara suseptibilitas magnetis dan curah hujan bersifat nonlinier, maka pada saat curah hujan melebihi ambang batas (550-600 mm/tahun) konsentrasi mineral ferrimagnetik menurun. Sehingga Liu 2005a mengemukakan bahwa adanya respon kompleks antara transformasi mineral magnetik dan iklim disebabkan oleh rasio konsentrasi hematit ke maghemitemagnetite (Hm/Mag) yang tinggi.

Potensi penyimpanan air (PWS) adalah ukuran surplus curah hujan tahunan bersih dan didefinisikan sebagai perbedaan antara curah hujan total perolehan air dan kehilangan air. Curah hujan total juga mengontrol transformasi mineral magnetik selama pedogenesis. Ketika PWS negatif (kehilangan air > perolehan air) maka kondisi reduksi terhambat dan bahan magnetis yang berasal dari eolian dapat dipertahankan. Sebaliknya, bila PWS positif maka mineral magnetis akan habis karena pelarutan. Untuk memperkirakan perubahan iklim paleoklimat secara semikuantitatif pada skala waktu orbital dan pada skala regional, pengaruh

pelarutan mineral magnetik pasca deposisi cukup kecil sehingga bahan induk tanah dan kandungan mineral magnetik cenderung relatif seragam.

Diagenesis

Diagenesis adalah perubahan dari sedimen yang ada menjadi sedimen yang berbeda selama proses pembentukannya. Reaksi kimia yang terjadi selama diagenesis merupakan kunci yang menentukan sifat kemagnetan sedimen laut dan danau. Sehingga interaksi antara pasokan, jenis bahan organik dan kandungan oksigen di dasar perairan akan mempengaruhi karakter zonasi. Sedimen permukaan teroksidasi melalui kontak dengan air dasar beroksigen, sementara sedimen di bawahnya menjadi anoksik dengan cepat karena degradasi bahan organik yang dimediasi secara intens oleh mikroba. Akumulasi sedimen yang cepat akan mencegah difusi oksigen ke bawah dari perairan dasar. Hal ini menghasilkan lapisan oksik atas yang mempertahankan kumpulan mineral magnetik detrital awal. Lapisan suboksik kedua tempat magnetit mulai larut, dan lapisan anoksik ketiga di mana sebagian besar mineral magnet detrital yang tersisa juga telah terlarut. Perubahan diagenesis awal ini disertai dengan pertumbuhan autigenik greigite, pertama sebagai partikel SP (zona perantara) dan akhirnya sebagai partikel SD (zona bawah).

Sedimentasi di laut dangkal pada umumnya terjadi pada zonasi yang bermigrasi ke atas sehingga setelah melewati zona anoksik turut melarut dalam mineral magnetik detrital dan terjadilah greigit SP dan SD. Konsentrasi dan mobilisasi besi dan sulfida dipengaruhi oleh tekstur sedimen dan variasi pengiriman karbon organik. Sementara keberadaan greigite dalam sedimen tidak signifikan terkait dengan konsentrasinya namun hanya menandakan kondisi anoksik semata. Sedangkan proses diagenesis reduktif dilaporkan telah mengubah sinyal magnetik dari sungai dalam sedimen laut. Di laut yang lebih dalam (> 1 km kedalaman air) pasokan bahan terrigenous dan kandungan karbon organik berkurang, yang ditandai dengan tingkat akumulasi sedimen yang rendah. Ketebalan sedimen oksik mengembang ke arah zona anoksik hingga mencapai

kedalaman ratusan meter di bawah antarmuka sedimen/air. Keadaan ini tentu saja dapat mengakibatkan terjadinya kelangkaan bahan organik dan difusi oksigen yang berdampak pada rendahnya tingkat akumulasi sedimen. Dalam hal ini, goetit dan hematit mungkin terbentuk dan hidup berdampingan dengan mineral magnetik yang sudah ada sebelumnya. Dugaan sementara para ahli adalah hematit dan goetit dalam batuan tumbuh secara autigenik antaradalam kurun waktu beberapa ribu bahkan jutaan tahun setelah pengendapan.

Sifat magnetik sedimen danau juga dapat dipengaruhi oleh diagenesis reduktif. Bahan organik di danau, terutama yang timbul dari produktivitas biologis di dalam danau, mengencerkan konsentrasi mineral magnetik litogenik, yang dapat menyebabkan korelasi negatif antara parameter ini. Mineral magnetik litogenik sebagian dapat sepenuhnya larut dalam sedimen air tawar yang kaya organik di bawah kondisi diagenetik anoksik melalui reaksi yang dimediasi secara mikroba, sama seperti yang terjadi dalam sedimen laut. Proses yang didorong redoks dikendalikan oleh ketinggian danau, laju akumulasi sedimen, kandungan bahan organik sedimen, ketersediaan besi dan sulfat, ukuran butir dan komposisi mineral besi.

Mineral Biogenik

Mineral magnetik biogenik ditemukan pada hewan seperti burung, kelelawar (Tian et al., 2010), lebah (Kirschvink and Kirschvink, 1991), ikan (Moore et al., 1990), rayap (Alves et al., 2004), dan bahkan ditemukan pada manusia (Dubiel et al., 1999). Beberapa bahan biomagnetik seperti feritin juga berperan penting dalam penyakit (Brem et al., 2006). Dalam buku ini, akan difokuskan pada organisme yang relevan untuk studi magnetik lingkungan sedimen.

Proses biogenik dapat menghasilkan mineral magnetik dengan dua cara utama dalam lingkungan sedimen, yaitu mineralisasi yang dikendalikan secara biologis dan mineralisasi yang diinduksi secara biologis (Kopp and Kirschvink, 2008). Mineralisasi induksi menghasilkan spesies oksida besi berupa magnetit, goetit, lepidokrosit, dan ferihidrit dengan distribusi ukuran butir yang lebar. Meskipun

didominasi kumpulan magnet karena lebarnya distribusi, rekam mineral magnetik lingkungan yang dihasilkan ternyata sulit untuk dilihat. Sebaliknya, pada jalur mineralisasi yang dikendalikan diperoleh kristal magnetosom (SD) yang murni secara stoikiometri dan berbeda secara morfologis dari kedua magnetit [Li et al., 2010] (Gambar 12) atau greigite [Kasama et al., 2006].

Produksi magnetit biogenik telah terbukti menurun selama kondisi glasial di proses pengendalian sebagai respons terhadap penurunan kandungan oksigen di air yang kemungkinan disebabkan oleh penurunan oksigenasi air dasar atau peningkatan pasokan karbon organik. Dalam sedimen laut, bakteri magnetotaktik ditemukan dari pengendalian laut dangkal (pesisir) hingga kedalaman 4.500 m [Kopp dan Kirschvink, 2008]. Studi ini menyiratkan bahwa magnetit bakteri dominan diproduksi di atas antarmuka air sedimen. Sementara pada pengendalian laut dalam, mikronutrien besi merupakan pembatas penting untuk fitoplankton. Kondisi optimal akan dicapai bila terjadi akumulasi dan pelestarian magnetofosil magnetit oleh debu eolian (Larrasoana et al., 2012). Pemupukan besi semacam itu akan meningkatkan produktivitas primer dan ekspor karbon organik berikutnya ke dasar laut, sehingga memberikan kondisi reduksi besi ringan yang akan melepaskan besi dari komponen paling reaktif.

FISIKA LINGKUNGAN: Teori dan Aplikasi

POLUSI ANTROPOGENIK & STUDI LINGKUNGAN MAGNETIK

- Polusi Antropogenik
- Lingkungan Magnetik dan Studi Masa Depan
- Peranan Mineral Magnetik Biogenik

POLUSI ANTROPOGENIK & STUDI LINGKUNGAN MAGNETIK

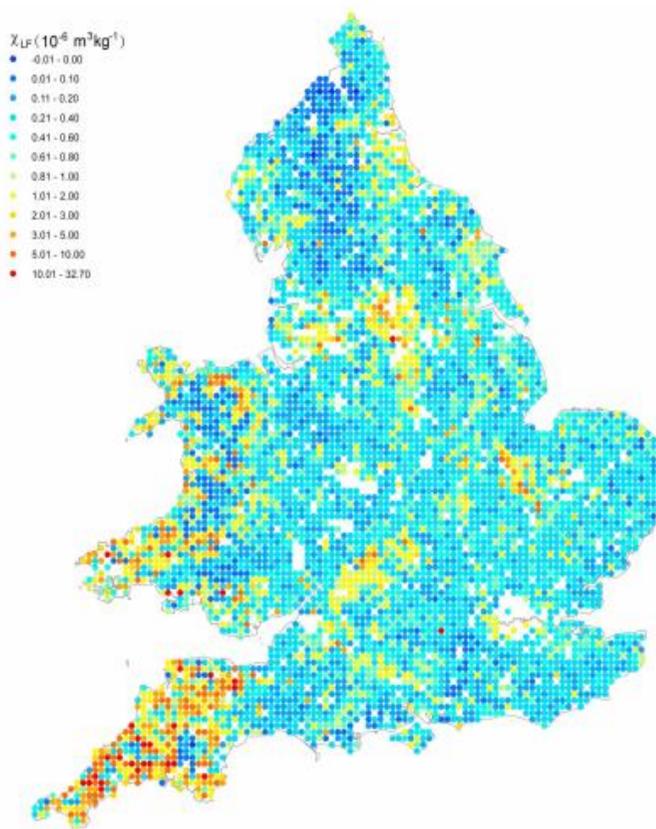
Metode magnet lingkungan telah banyak digunakan untuk menyelidiki derajat, sumber, ruang lingkup dan evolusi temporal dari polusi antropogenik yang terkait dengan aktivitas industri dan manusia lainnya. Daya Tarik pengamatan terhadap lingkungan selama dua dekade terakhir didukung penuh oleh berkembangnya teknik pengukuran baru. Aplikasi sangat relevan untuk menjawab serangkaian permasalahan yang timbul, tidak terbatas hanya pada analisis sedimen.

Polusi Antropogenik

Pada tahun 1980-an adalah fase awal dimana prinsip dasar dari teori kemagnetan ini dibangun untuk mengidentifikasi hubungan antara sifat magnetik dan konsentrasi logam berat. Lengkap dengan pengenalan morfologi yang spesifik dari partikel magnetik yang diproduksi secara antropogenik. Pada tahun 1998, Heller dkk berhasil membedakan bola magnet yang dihasilkan selama pembakaran bahan bakar fosil dan selama produksi besi/baja. Mineral magnetik yang berasal dari industri memiliki ukuran butir yang lebih besar daripada mineral magnet alami, sehingga memiliki rasio ARM/SIRM yang lebih rendah. Sementara pada kebanyakan kasus yang berhubungan dengan pembakaran bahan bakar fosil, terdapat korelasi positif antara konsentrasi mineral magnetik dan logam-logam berat seperti Pb, Zn, Cu, Co, Ni dalam polutan. Mineral magnetik dapat bertindak sebagai pembawa polutan melalui adsorpsi dengan jalan menggabungkan struktural logam berat ke dalamnya. Inilah penyebab mengapa parameter magnet digunakan sebagai kuantifikasi tingkat polusi skala regional.

Pada dekade terakhir fase studi parameter magnetik untuk polusi lingkungan terlihat pesat kemajuannya. Didukung oleh kemudahan akses baik materi maupun instrumentasi untuk studi kasusnya. Diawali dengan kajian yang terfokus pada sedimen permukaan danau/sungai, Kemudian meluas ke kajian terbaru dalam berbagai bahan termasuk tanah (Blundell et al., 2009), filter udara (Sagnotti et

al., 2006), debu kereta bawah tanah (Zhang et al., 2011), abu terbang (Blaha et al., 2008), rumput (Jordanova et al., 2003), cincin pohon (Zhang et al., 2008), akar pohon (Jordanova et al., 2003), daun pohon (Szönyi et al., 2008) dan lain-lain. Daun pohon merupakan media yang sangat baik untuk pengumpulan partikel karena permukaan total dan penyebarannya yang luas. Daun pohon juga memberikan latar belakang nonmagnetik untuk mengumpulkan partikel dan lilin daun membantu daun untuk menjebak dan menahan polutan partikulat.



Gambar 2. Distribusi suseptibilitas magnetik pada tanah di England dan wales [Blundell et al 2009a]

Kemajuan parameter magnetik lingkungan untuk kajian polusi dalam skala regional dan waktu musiman/tahunan tertentu telah menginspirasi Blundell et al., 2009 untuk menerapkan skala yang lebih luas. Teknik tersebut digunakan untuk

mengumpulkan data suseptibilitas magnet dari kawasan tanah dalam skala nasional untuk mengidentifikasi dan mengukur tingkat pencemaran (Gambar 2). Meskipun anomali suseptibilitas magnet terdeteksi dengan mudah, namun masih diperlukan diagnostik lainnya untuk memahami detail sifat polusi. Manfaat dari deteksi pencemaran secara magnetik adalah kecepatan, efektivitas biaya dan kepekaannya terhadap rentang ukuran partikel. Oleh karena itu banyak digunakan untuk mendeteksi polutan terutama berupa partikulat yang membahayakan. Selain itu, metode magnetik dapat digunakan untuk mendeteksi “titik panas” polusi yang dapat juga digunakan untuk mendiagnosis kesehatan manusia atau bahaya lainnya. Kedepan diarahkan untuk digunakan pemantauan pencemaran dengan kajian multidisiplin, sehingga ditinjau secara toksikologi, epidemiologi, sistem informasi geografis, statistik lingkungan, dan lain-lain. Ada banyak peluang untuk yang dapat dikembangkan untuk masa depan.

Lingkungan Magnetik dan Studi Masa Depan

Setiap bahan magnetis akan menunjukkan respons bila diletakkan dalam medan magnet. Oleh karena itu parameter magnet dapat digunakan untuk kajian proses alami perubahan iklim, perubahan lingkungan, dan berbagai proses geologi. Meskipun interpretasi parameter magnet sedikit rumit, kontribusi magnetisme untuk studi iklim dan lingkungan dapat divariasikan. Sedangkan untuk meningkatkan signifikansi dan objektivitas studi magnet lingkungan, perlu diklasifikasikan sifat magnet sesuai dengan kepentingan. Sifat magnet banyak digunakan untuk membantu mengukur efek perubahan iklim, meskipun dalam sistem lingkungan yang kompleks meskipun tidak selalu dapat langsung memisahkan antara sebab dan akibat.

Pendekatan interdisipliner tidak hanya melibatkan pengukuran secara magnetik atau nonmagnetik, tetapi juga pembahasan yang mengakomodir para spesialis yang berbeda. Sehingga dibutuhkan waktu yang relatif lama (~satu dekade) untuk menentukan mekanisme yang tepat dari peningkatan χ untuk sedimen danau. Penting juga untuk terus mengembangkan teknik analisis, statistik tambahan serta

studi tentang hematit. Penelitian selanjutnya cenderung melibatkan lokasi transisi antara zona bioklimatik yang berbeda. Agar interpretasi lingkungan yang lebih akurat maka dipandang perlu tidak mengabaikan sumber penyebab terjadinya sedimen. Sehingga lokasi situs dapat dipilih dengan lebih akurat untuk meminimalkan variabel lingkungan di area sumber.

Daya tarik lain dari sifat magnetis adalah sangat bervariasi bahkan untuk partikel berukuran nano sehingga parameter magnet memiliki kekuatan untuk mengkarakterisasi kumpulan mineral magnet. Selain itu, pengukuran magnetik memiliki kekuatan untuk konsentrasi yang berada jauh di bawah ambang batas pengukuran disbanding dengan teknik mineralogi konvensional seperti XRD dan geokimia. Sehingga hubungan halus antara mineral ferrimagnetik dan antiferromagnetik dalam konsentrasi rendah dapat diamati secara kuantitatif untuk diterapkan pada:

➤ Loess dan Tanah

Masalah penting yang perlu diselesaikan untuk studi loess dan paleosol ada dua. Pertama, adalah mekanisme pembentukan dan transformasi mineral magnet selama pedogenesis perlu dipelajari lebih lanjut. Kedua, dalam konteks perubahan iklim global dan ekspresi regional diperlukan eksplorasi loess magnetism yang rinci. Tanah yang kering secara musiman tetapi tetap lembab cukup lama memproduksi sedikit magnetit/maghemite. Tanah Mediterania yang tidak kering dengan sempurna cenderung memproduksi Fe^{2+} di musim dingin sehingga jumlah goetit dominan. Selain membantu untuk membedakan antara mekanisme penggerak global dan lokal, diharapkan juga kontribusi untuk meningkatkan pemahaman tentang perubahan atmosfer pada skala global sehingga kajian asal loess sangat penting untuk menghasilkan model komprehensif perubahan pasca deposisi.

➤ Sedimen Kontinental

Penekanan lanjutan diharapkan pada studi paleoenvironmental dan paleomagnetik. Danau memiliki keunggulan dalam merekam sinyal lokal dalam konteks historis dalam kaitannya dengan aktivitas manusia. Dengan pendekatan yang relevan untuk studi source-to-sink untuk menafsirkan rekaman sedimen di lingkungan laut maka potensi sumber dapat diukur.

➤ Sedimen Laut

Studi magnetik lingkungan dari sedimen drift dapat memberikan wawasan penting tentang evolusi sirkulasi termohalin dan konfigurasi serta fungsi gerbang laut. Pasokan sungai telah diidentifikasi lebih rendah dibandingkan dengan sumber sedimen terrigenous meskipun sungai memiliki peran penting dalam perputaran besi dan karbon. Dengan mempelajari sedimen sezaman, dan jauh lebih penting secara volumetrik, berbutir halus, dan mengandung IRD, studi magnetik lingkungan telah banyak memberikan wawasan baru tentang tingkat dan dinamika lapisan es kuno.

Studi magnetik lingkungan tentang debu eolian dalam sedimen laut diharapkan akan meningkat jumlahnya, mengingat manfaat mineral magnetis dalam mengidentifikasi debu eolian dan menilai variabel lingkungan pembentukannya. Debu atmosfer adalah pendorong penting dan indikator perubahan iklim, namun pengetahuan tentang peran globalnya selama Kuartar tak dapat dirunut dengan baik. Oleh karena itu, debu eolian sering dijadikan sebagai sampel bersamaan dengan magnetit biogenik (Larrasoana et al., 2012). Meskipun hubungan potensial antara debu dan bakteri magnetotaktik belum diketahui secara rinci, fakta yang sering diperlihatkan adanya hubungan kausal melalui debu sebagai penyedia besi reaktif untuk biomineralisasi. Hubungan umum tersebut mengantarkan kepada pemahaman yang lebih baik tentang faktor-faktor yang

mengontrol pembentukan dan pelestarian magnetit bakteri dalam catatan sedimen laut.

Perubahan diagenesis pasca deposisi, disolusi reduktif mineral magnetik dan pembentukan autigenik serta pengawetan greigite diharapkan semakin banyak digunakan untuk mengidentifikasi variabel antara kondisi anoksik dan oksik. Aplikasi prospektif tambahan dari magnet lingkungan adalah peluang mendeteksi keberadaan gas hidrat masa lalu di sedimen laut purba oleh *cooccurrence* dari akhir diagenetic pyrrhotite dan greigite. Kajian semacam ini dapat mengungkap peristiwa baru di mana peran penting stabilitas hidrat dari gas alam dalam mendorong atau merespon perubahan iklim. Sampai ditemukan lapisan merah samudra kapur sebagai tempat penyimpanan hematit diagenetik awal dan goetit sebagai respons terhadap perubahan pasokan karbon organik ke dasar laut dan oksigenasi air bawah.

Peranan Mineral Magnetik Biogenik

Dua kriteria magnetik untuk identifikasi magnetit biogenik adalah uji Moskowitz suhu rendah dan pola SD non-interaksi yang khas dalam diagram FORC (Egli et al., 2010). Meskipun belum ada jaminan identifikasi yang valid, namun setidaknya telah membantu membatasi asal biotik atau abiotik dari mineral magnetik. Kajian biomagnetisme cenderung berfokus pada studi yang mendasar, yaitu mengidentifikasi mineral magnetik biogenik, proses biomineralisasi serta menentukan informasi lingkungan dari mineral magnet biogenik yang dapat diandalkan. Untuk memahami proses biomineralisasi dinamis, perlu ditentukan bagaimana faktor lingkungan mengontrol pembentukan magnetosom. Demikian pula, kemampuan untuk menggunakan magnetofosil dengan morfologi berbeda untuk menafsirkan rekam paleoenvironmental. Oleh karena itu sangat diperlukan pemahaman detail tentang lingkungan modern dan lokasi habitat spesies bakteri magnetotaktik dalam gradien redoks lokal. Manfaat positif lainnya dari penelitian biomineralisasi magnetik adalah sangat potensi untuk berkontribusi pada

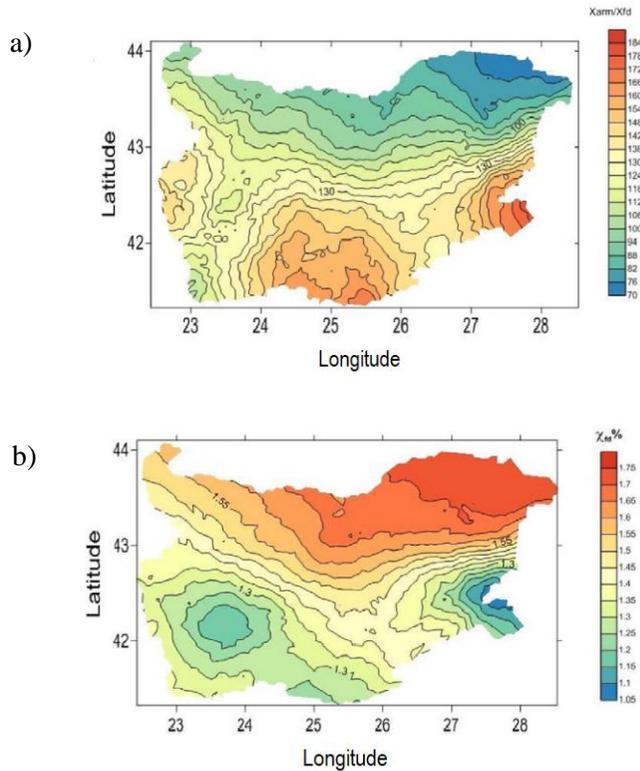
pemahaman tentang kemagnetan batuan dasar, terutama dalam sistem superparamagnetik untuk studi magnet lingkungan.

Perkembang lingkungan selama 30 tahun terakhir cukup pesat sehingga menjadi daya tarik tersendiri. Teknik pengukuran dan analisis data yang semakin canggih telah merubah pematangan dan pemahaman subjek yang lebih baik. Kompleksitas saat menafsirkan sifat magnetis dan dalam menjawab permasalahan lingkungan merupakan tantangan tersendiri bagi peneliti. Secara keseluruhan, ramalan kajian tentang kemagnetan lingkungan dalam konteks interdisipliner sangat menjanjikan peluang yang semakin penting ke depannya. Magnetisme lingkungan terkait dengan fakta bahwa besi adalah salah satu unsur kimia paling dominan keberadaannya di kerak bumi. Dengan demikian, dapat dipastikan mineral magnetik sulfur dan oksigen tersebar di mana-mana di lingkungan sekitar kita. Tanah mengandung mineral magnet yang dihasilkan dari proses alam dan aktivitas manusia (pembakaran industri, tempat kebakaran). Pemetaan kerentanan magnetik memberi Anda gambaran umum singkat tentang peningkatan magnetis alami di tanah, tingkat polusi tanah, atau melokalisasi artefak arkeologi di bawah permukaan dangkal. Tiga skema penting yang dapat dijadikan acuan kegiatan ilmiah di laboratorium kemagnetan lingkungan yaitu:

- Skema penanggalan archaeomagnetic dan magnetostratigraphic.
Pada kelompok kajian ini berfokus pada fenomena medan magnet, arah magnetisasi dan intensitas mineral magnet yang ada di berbagai struktur arkeologi dan geologi. Berdasarkan informasi tentang variasi temporal dan pembalikan polaritas dari medan magnet masa lalu oleh bumi.

- Skema merekonstruksi iklim masa lalu atau memetaan pencemaran tanah.
Dengan fokus pada fenomena proses biogeokimia dan proses antropogenik seperti pembakaran bahan bakar fosil yang tercemar sehingga mineral besi magnetik terbentuk terekam. Karena proses ini

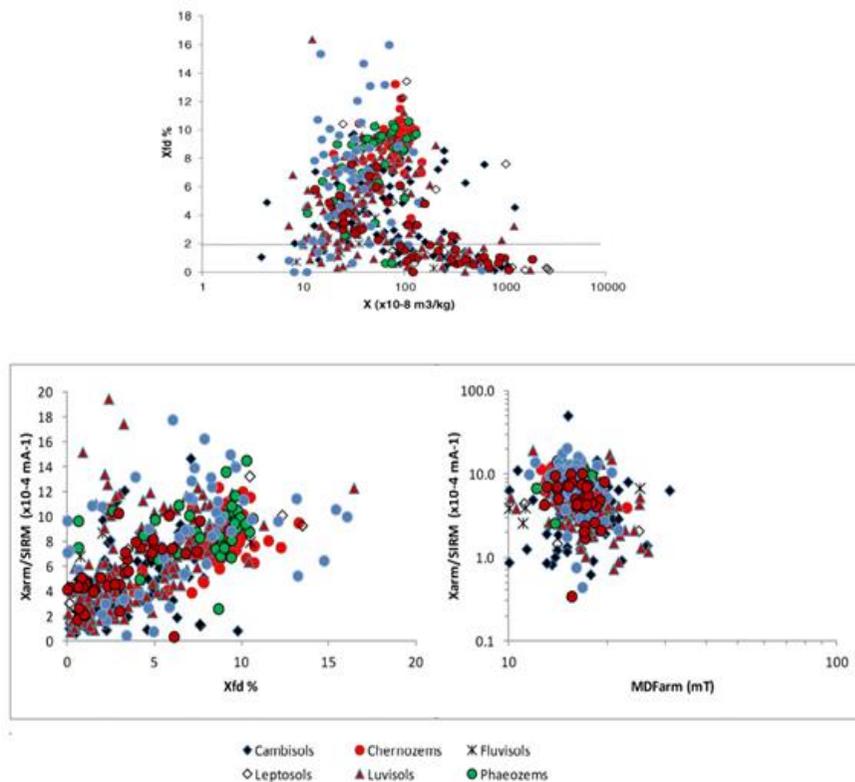
menentukan sifat magnetis berbagai jenis, ukuran dan kuantitas maka formasi lingkungan dapat ditelusuri. Skema karakterisasi sifat magnetik nanopartikel untuk aplikasi biomedis. Jalur penelitian berbasis metode pencitraan medis atau hipertermia magnetik dengan fokus eksperimen antikanker.



Gambar 3. Peta interpolasi distribusi sifat magnetik tanah: a) rasio anhisterisis terhadap suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi, b) persen suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi (Jordanova et al., 2016) magnetic susceptibility.

Gambar 3 adalah contoh intrepetasi peta suseptibilitas magnetis untuk mengidentifikasi keadaan di suatu Kawasan. Peta atas memperlihatkan plot peningkatan perbandingan suseptibilitas magnet anhisteristik dan suseptibilitas magnet bergantung frekuensi, sedangkan peta bawah menunjukkan peningkatan persentase suseptibilitas magneti bergantung

frekuensi. Substansi pemetaan disesuaikan dengan masalah lingkungan yang akan dikembangkan, seperti pemetaan yang diperlihatkan oleh Gambar 4. Gambar 4 atas adalah persentase suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi dari ± 510 sampel tanah lapisan luar sebagai fungsi suseptibilitas massa spesifik. Jenis tanah yang berbeda diplot dengan simbol yang berbeda.



Gambar 4. Pemetaan hubungan berbagai parameter suseptibilitas magnetic untuk interpretasi lingkungan (Jordanova et al., 2016).

Magnetisme lingkungan yang diterapkan di Yunani sejak dekade terakhir untuk studi polusi antropogenik didasari oleh pemikiran atas sifat oksida besi dan sulfida yang dapat menyerap logam berat, kontaminan organik,

dan bahkan polutan radioaktif. Dengan mengukur besaran susceptibilitas magnetik bersama dengan beberapa parameter magnet lainnya baik secara insitu atau di laboratorium maka teknik ini relatif cepat dan hemat biaya untuk karakterisasi dan pemetaan distribusi pencemaran

FISIKA LINGKUNGAN: Teori dan Aplikasi

APLIKASI: DETEKSI POLUTAN

- Suseptibilitas Magnetik sebagai Indikator Polutan
- Deteksi Logam Berat Dalam Air

APLIKASI: DETEKSI POLUTAN

Pada bab ini dihadirkan baik metode magnetik maupun non-magnetik serta analisis kimia untuk aplikasi lingkungan. Bagaimana korelasi masing-masing parameter yang terlibatpun dibahas berdasarkan kajian teoritik dengan intepretasi data dari lapangan sebagaimana diketahui bahwa metode magnetik bukan satu-satu jalan menyelesaikan masalah polusi lingkungan.

Suseptibilitas Magnetik sebagai Indikator Polutan

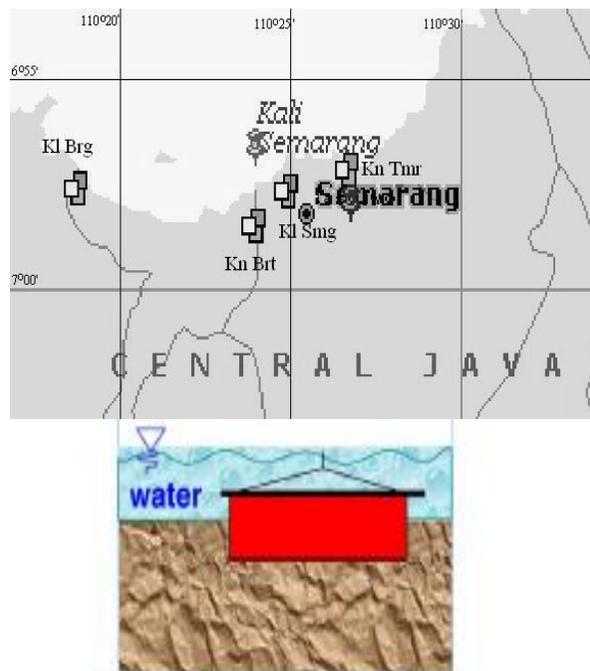
Pengukuran suseptibilitas magnetik dilakukan dengan memasukkan sampel-sampel kedalam pot berbentuk silinder berukuran diameter 2,54 cm (1 inchi) dan tinggi 2,2 cm. Setiap sampel ditandai dengan seteliti mungkin. Masing-masing sampel diukur suseptibilitas magnetiknya dengan alat *Bartington magnetik susceptibility meter* MS2B dual frequency, 470 dan 4700Hz. Datanya dianalisis dengan menggunakan PC untuk dilihat pola sebaran suseptibilitas magnetiknya. Selain itu juga dilakukan pengukuran parameter magnetik Isothermal Remanent Magnetization (IRM) dan Anhysteristic Remanent Magnetization (ARM) dengan menggunakan Minispin Magnetometer. Perbedaan pengukurannya terletak pada perlakuan sebelum melakukan pengukuran. Untuk IRM sample dimagnetisasi menggunakan peralatan Elektromagnet Weiss. Sedangkan untuk ARM sample didemagnetisasi menggunakan peralatan Molspin AF Demagnetize.

Tabel 1. Koordinat titik/lokasi pengambilan sampel

No	Position							
	Kali Beringin		Kanal Barat		Kali Semarang		Kanal Timur	
1	6°:57':12,5"S	110°:19':04,8"E	6°:56':53,0"S	10°:23':44,6"E	6°:57':15,8"S	110°:24':34,1"E	6°:56':28,2" S	110°:26':40,7" E
2	6°:57':48,2"S	110°:24':39,3"E	6°:57':58,2"S	10°:24':1,7" E	6°:57':31,8"S	110°:24':52" E	6°:56':59,5" S	110°:26':27,1" E
3	6°:58':19,9"S	10°:24':26,1" E	6°:58':52,2"S	10°:24':16,2"E	6°:57':38,3"S	110°:25':01,8"E	6°:57':38,2"S	110°:26':32,1"E
4			6°:59':43,4"S	10°:24':7,1" E	6°:57':51,0"S	110°:25':18,0"E	6°:58':24,6"S	110°:26':33,6" E

Lumpur Sungai

Sampel sedimen yang digunakan diambil dari endapan di dasar sungai (Gambar 5) dengan titik koordinat seperti ditunjukkan dalam table 1. Endapan dipilih karena merupakan akumulasi dari timbunan polutan yang mengendap di dasar sungai. Empat varian sampel yang diambil dari sungai Beringin (Kl Brg), Kanal Barat (Kn Brt), Kali Semarang (Kl Smg), dan Kanal Timur (Kn Tmr) yang diprediksi lokasi tersebut banyak mengandung polutan.

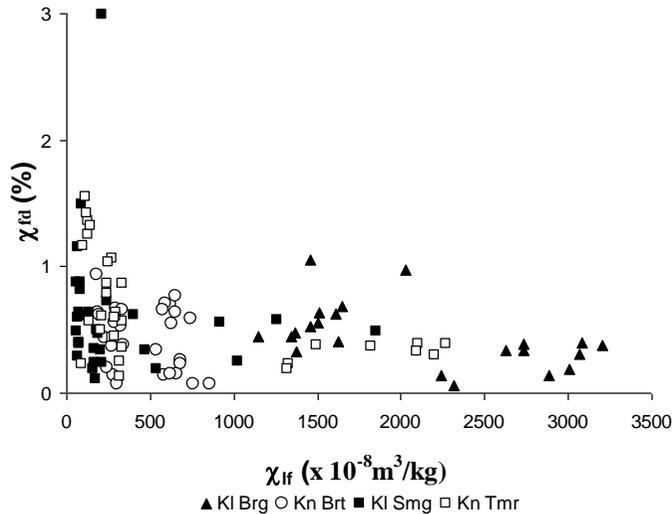


Gambar 5. Peta sungai-sungai di Semarang (atas) dan titik/lokasi pengambilan sampel didalam sungai (bawah)

Peta hasil pengukuran parameter magnetik yang telah dilakukan di Laboratorium kemagnetan dan batuan ITB, yaitu; suseptibilitas magnet, ARM, dan IRM diplot dalam gambar 6, gambar 7, dan gambar 8. Besaran suseptibiitas bergantung frekuensi (χ_{fd}) yang dinyatakan dalam % dihitung berdasarkan:

$$\chi_{fd} = \frac{\chi_{lf} - \chi_{hf}}{\chi_{lf}} \times 100\%$$

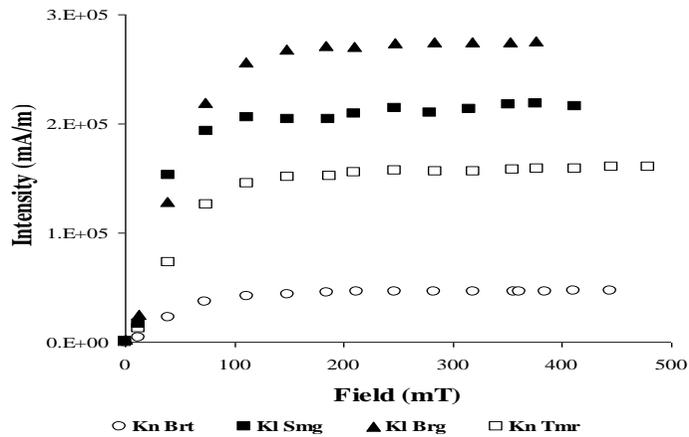
dengan χ_{lf} adalah suseptibilitas magnetik frequenci rendah 470 Hz dan χ_{hf} adalah suseptibilitas magnetik frequenci tinggi 4700Hz.



Gambar 6. Plot gabungan suseptibilitas magnetik versus suseptibilitas bergantung frekuensi

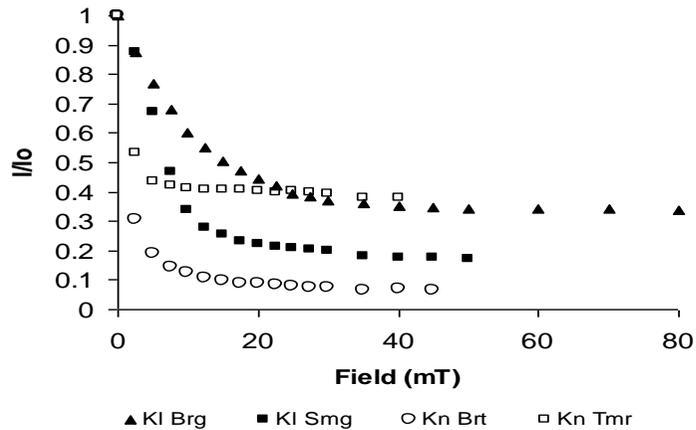
Mineral magnetik dalam lumpur (*suspended sediment*) yang ditumbuhkan dari proses lithogenik atau anthropogenic. (Lu and Bai, 2006) telah menemukan bagaimana merunut asal mineral magnetik dari suatu endapan berdasarkan plot grafik antara χ_{lf} terhadap χ_{fd} . Pada endapan yang tidak tercemar, χ_{lf} bernilai rendah tetapi χ_{fd} bernilai tinggi (lebih besar 4%). Sebaliknya pada sample yang mengandung polutan, χ_{lf} bernilai tinggi sedangkan χ_{fd} bernilai rendah (kurang dari 3 %). Dalam penelitian ini, besarnya χ bernilai antara 58 sampai dengan $3585 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, artinya mempunyai χ yang tinggi. Sedangkan nilai suseptibilitas bergantung frekuensi $\chi_{fd} < 3 \%$, harga ini termasuk dalam katagori χ_{fd} bernilai rendah. Sehingga kandungan mineral magnetik yang mendominasi lumpur endapan sungai-sungai di Semarang disebabkan oleh adanya aktifitas

anthropogenik. Empat sampel yang representative terpilih untuk diukur pola IRM dan ARM. Analisis IRM dilakukan untuk mengetahui dominasi kandungan mineral magnetiknya. Hasilnya berupa plot kurva saturasi seperti yang diperlihatkan oleh gambar 7.



Gambar 7. Peluruhan IRM

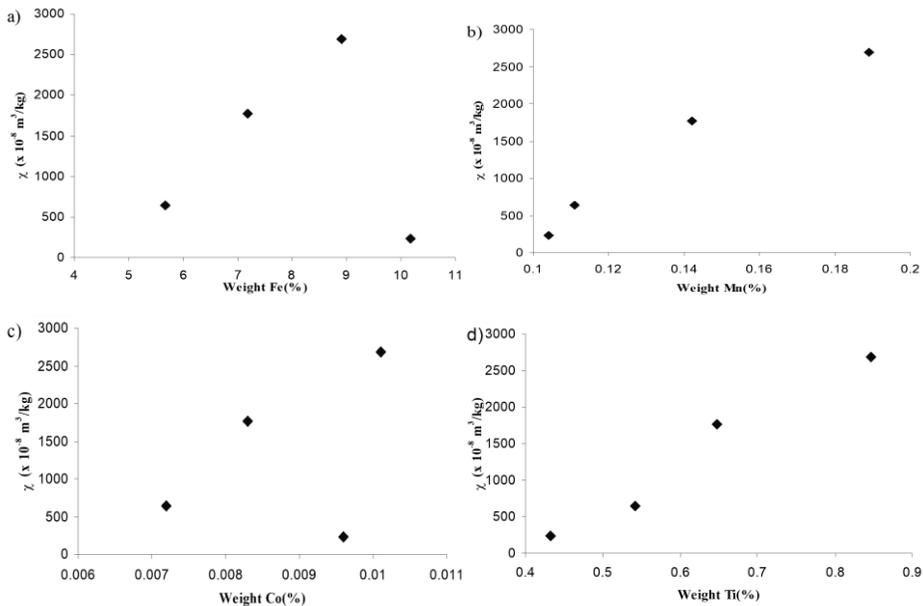
Tampak bahwa seluruh sampel lumpur pada empat sungai di Semarang mengalami saturasi dibawah medan magnet sebesar 200 mT. Ini berarti bahwa sample didominasi magnetite (Fe_3O_4). Sementara tujuan dilakukan analisis ARM adalah untuk mengetahui bentuk bulir mineral magnetik dari lumpur sungai. Sedangkan plot peluruhan ARM keempat sungai di Semarang dapat dilihat pada Gambar 8. Kurva peluruhan ARM yang dihasilkan tampak menurun tajam menunjukkan ketidakstabilan remanensi, sehingga dapat diindikasikan bahwa bulir lumpur sungai sebagian besar terdiri dari mineral magnetik multi domain (MD) yang kasar.



Gambar 8. Peluruhan ARM

Analisis kuantitatif seluruh sampel menghasilkan tingginya tingkat konsentrasi unsur Pb dan Fe di Kali Semarang dibandingkan dengan tiga sungai lainnya, sehingga dapat dikatakan bahwa Kali Semarang merupakan sungai yang paling besar konsentrasi polutannya. Bila dibandingkan dengan komposisi kimia dari sungai secara global, seperti terhadap sungai Pasig di Manila, Philippines, semua sungai di Semarang teridentifikasi sangat tinggi kandungan logam beratnya. Korelasi antara susceptibilitas magnetik dan konsentrasi Zn, Pb dan Cd dilakukan Lu dan Bai (2006) dan oleh Hulisen dan Bijaksana (2006). Sedangkan hubungan antara susceptibilitas magnetik rerata terhadap konsentrasi beberapa unsur logam berat (Fe, Mn, Co dan Ti) dapat dilihat pada Gambar 9. Hubungan korelasi positif antara susceptibilitas magnetik dengan Fe sangat mudah dimengerti karena Fe adalah unsur magnetik. Akan tetapi hubungan susceptibilitas magnetik dengan unsur-unsur lain (Mn, Co, dan Ti) tidak kelihatan, ini disebabkan karena unsur-unsur tersebut bukan merupakan unsur magnetik. Namun ada kemungkinan kelimpahan unsur-unsur Mn, Co, dan Ti berhubungan erat dengan kelimpahan unsur Fe.

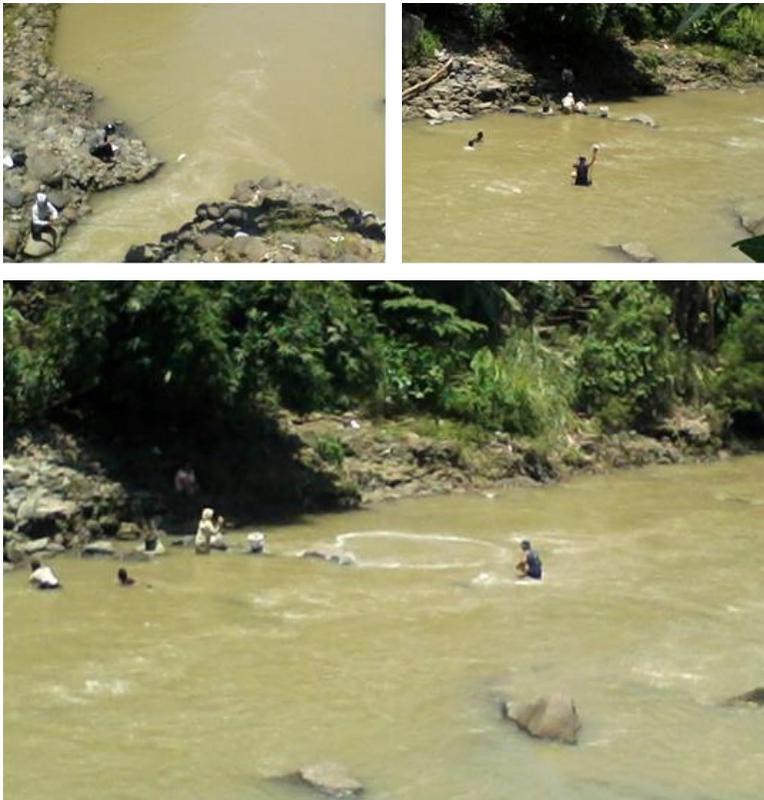
Pengukuran dengan metode magnetik dan analisis kimia yang telah dilakukan ternyata memberikan korelasi yang positif antara suseptibilitas magnetik terhadap kandungan logam berat dari lumpur sungai-sungai di Semarang. Selain itu, dari analisis IRM dan ARM didapatkan juga hasil bahwa mineral magnetik yang mendominasi lumpur sungai adalah magnetite (Fe_3O_4) dengan bulir yang multi domain. Dilengkapi dari hasil pengukuran suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi yang bernilai rendah padahal nilai suseptibilitas magnetiknya tinggi sebagai indikasi bahwa keberadaan mineral magnetik dari lumpur sungai tersebut berasal dari aktifitas anthropogenik.



Gambar 9. Plot suseptibilitas magnetik rerata terhadap kandungan logam berat: a. Al, b. Mn, c. Co, dan d. Ti

Ikan Sungai

Pada pertemuan tiga sungai di Desa Sukorejo masih dijumpai warga pencari ikan sungai menangkap *Wader* dengan memancing atau menggunakan jaring (Gambar 10). *Wader* adalah jenis ikan yang hidup di sepanjang aliran sungai Kaligarang yang mayoritas berukuran antara 10-15 cm panjangnya dan bersisik. Ikan-ikan tersebut kebanyakan dijual di warung makan sekelas warung tegal sebagai menu pelengkap dan digemari konsumennya. Ada juga yang dipasarkan langsung kepada pelanggan setia secara door to door.

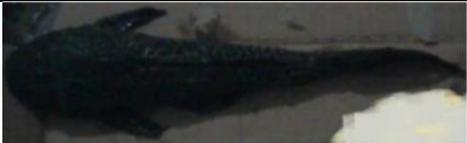


Gambar 10. Aktivitas Warga Sukorejo memancing dan persiapan menebar jaring (atas), tebaran jaring di dekat warga yang sedang mencuci di sungai

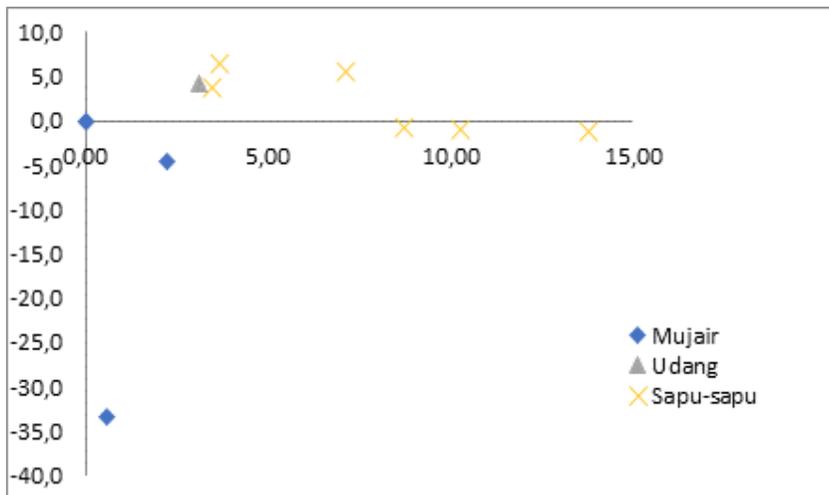
Aktivitas serupa juga banyak dilakukan oleh masyarakat yang tinggal disekitar muara sungai, bedanya terletak pada ikan hasil tangkapan, di daerah ini ikan-

ikannya lebih bervariasi jenis maupun ukurannya. Beberapa jenis sampel ikan yang diperoleh diperairan tersebut ikan mujair (penduduk lebih suka menyebut ‘wader’, sebagian menyebutnya dengan nama ‘nila’), lele, udang dan sapu-sapu (Tabel 2). Fakta ini menunjukkan bahwa masih ada penduduk yang mengkonsumsi ikan yang hidup dari sungai yang sudah tercemar oleh aktivitas antropogenik. Setelah sampel dipreparasi, kemudian sampel diukur menggunakan Bartington magnetik susceptibility MS2B dual frequency ke UM Malang.

Tabel 2. Jenis-jenis Ikan Sungai

No	Ikan	Gambar
1	Mujair	
2	Lele	
3	Udang	
4	Sapu-sapu	

Nilai suseptibilitas magnetik untuk ikan lele yang berharga negatif menunjukkan bahwa ikan lele bersifat diamagnetik. Oleh karena itu plot suseptibilitas bergantung frekuensi terhadap suseptibilitas frekuensi rendah dibuat hanya untuk ikan mujair, udang dan sapu-sapu (Gambar 11).



Gambar 11. Plot suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi vs suseptibilitas frekuensi rendah

Mineral magnetik dalam ikan yang ditumbuhkan dari asupan makanan dan habitatnya, dianalisis sebagaimana Lu dan Bai (2006) merunut asal mineral magnetik berdasarkan plot grafik antara χ_{lf} terhadap χ_{fd} . Ikan yang tidak tercemar, χ_{lf} bernilai rendah tetapi χ_{fd} bernilai tinggi (lebih besar 4%). Sebaliknya pada ikan yang mengandung polutan, χ_{lf} bernilai tinggi sedangkan χ_{fd} bernilai rendah (kurang dari 3%). Ikan-ikan yang kita dapatkan dipreparasi dalam bentuk kering dengan tahapan proses pengeringan dan furnace pada suhu 200°C yang tidak mempengaruhi besaran suseptibilitas magnetik hasil pengukuran. Setelah itu baru dihaluskan dimasukkan dalam tabung plastik yang sekaligus kompatibel dengan sampel holder dari Bartington magnetik susceptibility MS2B dual frequency. Diperoleh hasil bahwa besarnya χ bernilai tinggi, sedangkan nilai suseptibilitas bergantung frekuensi χ_{fd} bernilai rendah maka kandungan mineral magnetik yang mendominasi ikan sungai di Semarang disebabkan oleh adanya aktifitas antropogenik.

Sedangkan korelasi antara suseptibilitas magnetik ikan terhadap konsentrasi Zn, P, Mn, Ti dan Cd dapat dimaknai secara umum. Terindikasinya hubungan

korelasi positif antara susceptibilitas magnetik dengan Fe adalah sangat mudah dimengerti karena Fe adalah unsur magnetik. Sebaliknya untuk unsur-unsur lain seperti Mn dan Ti mengingat keduanya masuk dalam katagori unsur non-magnetik. Namun, ada kemungkinan kelimpahan unsur-unsur Mn dan Ti berhubungan dengan kelimpahan unsur Fe.

Sepanjang perjalanan rantai makanan, logam berat ini dapat mengumpul dalam tubuh suatu organisme dan tetap tinggal dalam tubuh dalam jangka waktu lama sebagai racun yang terakumulasi. Sebagai contoh logam air raksa (Hg), khrom (Cr), timbal (Pb), dan Nikel (Ni). Kadmium (Cd) dan vanadium (V) tergolong katagori khusus karena mempunyai efek yang merugikan tetapi belum tergolong unsur yang sangat beracun seperti timbal, arsen, dan berlium. Selain berada dalam bentuk ion logam bebas, kompleks anorganik, dan pasangan ion, logam juga dapat membentuk kompleks dengan senyawa organik dan partikel koloid. Yang perlu diwaspadai adalah pada umumnya logam berat walaupun berkadar rendah sudah bersifat toksik pada tumbuhan, hewan, dan manusia. Mekanisme proses logam berat masuk ke dalam jaringan tubuh ada beberapa jalan, yaitu: melalui saluran pernafasan, saluran pencernaan dan penetrasi kulit. Di dalam tubuh ikan, logam diabsorpsi darah yang dapat mengikat protein dan kemudian didistribusikan ke seluruh jaringan tubuh. Akumulasi logam yang tertinggi biasanya dalam detoksikasi (hati) dan ekskresi (ginjal).

Pada ikan atau udang, beberapa logam sangat esensial untuk perkembangan tubuhnya, misalnya kalsium (Ca) dan magnesium (Mg) yang berguna untuk pembentukan kutikula atau sisik. Logam berat seperti tembaga (Cu), zink (Zn), dan mangan (Mn) sangat diperlukan dalam pembentukan hemosianin dalam sistem darah dan enzimatik pada hewan air tersebut. Sedangkan timbal (Pb), merkuri (Hg), arsenik (As) dan cadmium (Cd) adalah beberapa logam-logam yang tidak mempunyai fungsi hayati dan bahkan sangat berbahaya serta menyebabkan keracunan pada makhluk hidup, sehingga dikatagorikan sebagai logam berat yang sangat tidak diinginkan kehadirannya.

Kadar standar baku mutu beberapa logam berat pada ikan dan dampaknya dalam kehidupan dapat dilihat pada tabel 4. Adanya kandungan logam-logam berat pada ikan disebabkan karena logam berat dalam air (walaupun kecil/sedikit) terabsorpsi oleh ikan melalui rantai makanan. Sehingga ikan dapat dijadikan sebagai salah satu indikator tingkat pencemaran yang terjadi di sungai. Jika di dalam tubuh ikan telah terkandung kadar logam berat yang tinggi dan melebihi batas normal maka hal ini dapat dijadikan sebagai indikator bahwa dalam perairan tersebut telah tercemar. Pada umumnya, jumlah logam runtuhan yang cukup besar disumbangkan oleh limbah rumah tangga berupa sampah-sampah metabolik, korosi pipa-pipa cair (Cu, Pb, Zn dan Cd) dan produk-produk konsumen (misalnya formula deterjen yang mengandung Fe, Mn, Cr, Ni, Co, Zn, Cr dan As).

Deteksi Logam Berat Dalam Air

Logam Berat

Logam berat banyak dihasilkan dari berbagai aktivitas manusia, seperti penggunaan bahan bakar fosil, pertambangan, industri, penggunaan pestisida secara berlebihan, dan penggunaan pupuk. Tingkat toksisitas logam berat tergantung pada elemen logam dan bioavailabilitas di tanah. Bioavailabilitas logam berat merupakan fungsi dari faktor abiotik seperti konsentrasi logam, kelembaban, dan pH tanah dan faktor biotik seperti kehadiran bakteri (Kumar et al., 2016). Logam berat tidak dapat terurai didalam tubuh manusia dan mencemari lingkungan sehingga menyebabkan resiko yang sangat besar bagi kesehatan manusia dan lingkungan (Gumpu et al., 2015).

Logam berat merupakan unsur kimia dengan berat jenis yang lebih besar dari 5 cm/g³, densitas rendah, dengan berat atom 200,6 g/mol. Logam berat hampir sama dengan kriteria logam lainnya, hanya saja akibat yang ditimbulkan dari logam berat lebih berbahaya (Sobirin, 2010). Sifat toksik pada limbah logam berat menyebabkan logam berat tersebut berbahaya. Berbagai macam logam berat yang beracun diantaranya Cd²⁺, Pb²⁺, Ni²⁺ dan Hg²⁺ (Yulaipi and

Aunurohim, 2013). Berdasarkan tingkat beracunnya suatu logam, logam berat dapat dikelompokkan menjadi 4 kelompok:

1. Sangat beracun, menyebabkan kematian yang dapat pulih dalam jangka waktu cepat seperti (Hg, Pb, Cd, dan Cr).
2. Moderat, mengakibatkan gangguan fisik dan pulih dalam jangka waktu yang lama seperti (Mn, Li, Co dan Cu)
3. Kurang beracun, dalam jumlah besar logam ini akan menimbulkan kesehatan seperti (Ag, K, Mg, dan Ni).
4. Tidak beracun, dimana logam ini tidak mengganggu kesehatan dan tidak berbahaya seperti (Na, Al, dan Ca) (Palar, 1994)

➤ **Kadmium**

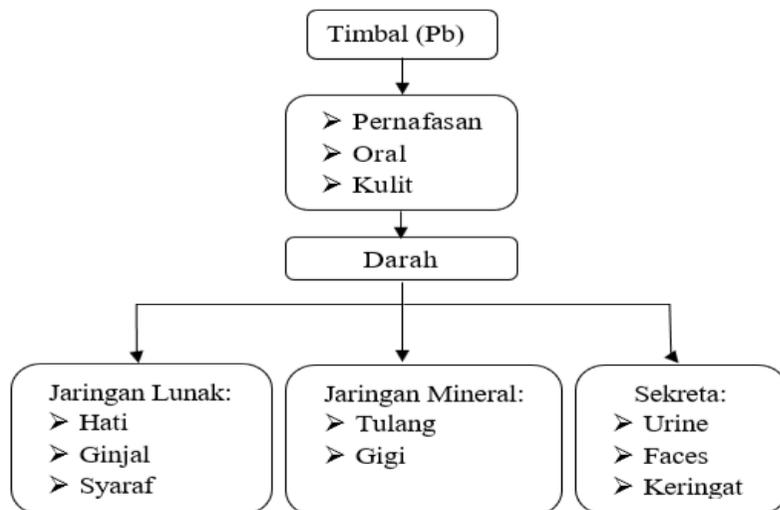
Kadmium (Cd) adalah logam putih yang lunak, dan merupakan racun bagi tubuh manusia. Waktu paruhnya 30 tahun dan dapat terakumulasi pada ginjal, sehingga ginjal mengalami disfungsi. Kadmium yang memiliki nomor atom 48 dengan berat atom 112,40 dengan titik cair 321oC dan titik didik 765oC tersebar luas dan mudah teroksidasi oleh udara bebas. Cd yang mempunyai dua valensi (Cd²⁺) terdapat di perairan alami dengan kadar berkisar antara 0,29-0,55 ppb dengan rata-rata 0,42 ppb (Sanusi, 2006). Menurut badan dunia WHO, konsumsi per minggu yang ditoleransikan bagi manusia adalah 400-500 g per orang atau 7 mg per kg berat badan. Kadmium merupakan salah satu jenis logam berat yang berbahaya karena elemen ini beresiko tinggi terhadap pembuluh darah. Waktu paruh kadmium 10-30 tahun. Akumulasi pada ginjal dan hati 10-100 kali konsentrasi pada jaringan yang lain.

Pada tubuh manusia, kadmium mengalami dieliminasi melalui urin. Proporsi penyerapan Cd adalah absorpsi melalui pernafasan yaitu antara 10-40%, tergantung keadaan fisik. Uap kadmium sangat toksis dimana diperkirakan 10 menit terpapar kadmium bisa terhirup sampai dengan 190 mg/m³ dan selama 240 menit akan dapat menimbulkan kematian. Jika terpapar oleh kadmium (Cd) secara akut dapat menyebabkan gejala nausea

(mual), kram otot, anemia, dermatitis, pertumbuhan lambat, kerusakan ginjal dan hati, dan gangguan kardiovaskuler. Perkiraan dosis mematikan akut adalah sekitar 500 mg/kg untuk dewasa dan efek dosis akan nampak jika terabsorpsi 0,043 mg/kg per hari (Widaningrum et al., 2007).

➤ Timbal

Timbal merupakan logam berat yang sangat beracun, berwarna abu-abu dengan titik didih 1620°C dan titik leleh 327,5°C (Dewi, 2012). Sumber pencemaran utama emisi gas buang kendaraan bermotor adalah timbal. Selain itu penambahan aditif pada bahan bakar yang berfungsi untuk memperbaiki mutu bakar juga menggunakan timbal. Komponen ini beracun terhadap seluruh aspek kehidupan (Naria, 2005).



Gambar. Akumulasi Timbal Dalam Tubuh. Sumber: Depkes RI, 2001.

Public Health Service Amerika Serikat menetapkan bahwa sumber air tidak boleh mengandung timbal lebih dari 0,05 mg/L kemudian rekomendasi dari WHO, batas minimal timbal dalam air sebesar 0,1 mg/L dan Indonesia menetapkan nilai ambang batas untuk timbal untuk air minum berdasarkan Permenkes RI No. 416 tahun 1990 sebesar 0,05 mg/L.

Timbal dapat menyebabkan keracunan pada sistem saraf, hematologic, dan mempengaruhi kerja ginjal. Mekanisme masuknya timbal ke dalam tubuh dapat melalui sistem pernafasan, oral ataupun melalui kulit. Gambar 2.1 yang menunjukkan akumulasi timbal dalam tubuh.

➤ Nikel

Nikel yang masuk dalam kelompok logam transisi adalah logam berwarna putih perak yang keras. Nikel mempunyai titik didih sebesar 283°C, titik lebur 155°C dengan massa jenis 8,9 g/mL. Keberadaan nikel dapat ditemukan dalam batu baterai nikel-kadmium, dan diaplikasikan untuk baja tahan karat. Selain digunakan untuk aplikasi tersebut sumber utama kontaminan logam nikel berasal dari udara dan air (Mayr et al., 2003). Oleh karena itu, melalui udara saat bernapas, air untuk konsumsi maka logam nikel termasuk salah satu logam berat yang berbahaya bagi manusia karena sifatnya yang karsinogen yang mampu merusak DNA dan menyebabkan iritasi serta imun-toksisitas. Nikel dapat masuk melalui proses penghirupan, makanan dan minuman yang terkontaminasi (Yuan and El-sheerif, 2003).

➤ Merkuri

Merkuri adalah unsur logam yang mempunyai nomor atom 80 serta mempunyai massa molekul relatif 200,59 (Järup, 2003). Merkuri (Hg) merupakan logam yang berbentuk cair pada suhu kamar. Logam murninya cair tak berbau, mengkilap, dan berwarna keperakan. Pengaruh yang ditimbulkan oleh merkuri adalah dapat terhambatnya kinerja enzim dan mengikat dengan dalam molekul enzim dan dinding sel.

Merkuri termasuk logam yang sangat berbahaya karena merkuri dapat menyebabkan kerusakan otak, hati, dan ginjal. Merkuri dapat digolongkan sebagai merkuri anorganik dan merkuri organik. Merkuri anorganik pada tahap pengoksidan, Hg^{2+} adalah lebih reaktif karena dapat membentuk

kompleks dengan ligan organik, terutama golongan sulfurhidril (Herman & Zulkipli, 2006).

Merkuri dan turunannya mempunyai sifat yang sangat beracun, sehingga kehadirannya di lingkungan perairan dapat mengakibatkan kerugian pada manusia karena sifatnya yang mudah larut dan terikat dalam jaringan tubuh organisme air. Polutan merkuri banyak dihasilkan oleh aktivitas industri pembangkit listrik. Paparan merkuri dapat membahayakan manusia dan tanaman (Wolfbeis, 2005). Oleh karena itu, U.S. Food and Administration (FDA) menentukan pembakuan atau Nilai Ambang Batas (NAB) kadar merkuri yang ada dalam jaringan tubuh badan air, yaitu sebesar 0,005 ppm. Agen Perlindungan Lingkungan memperbolehkan tingkat maksimum merkuri pada air minum adalah 2,0 ppb (Liu et al., 2009). NAB yaitu suatu keadaan dimana suatu larutan kimia, dalam hal ini merkuri dianggap belum membahayakan bagi kesehatan manusia. Kadar merkuri jika sudah melampaui NAB dalam air atau makanan, maka air maupun makanan yang diperoleh dari tempat tertentu harus dinyatakan berbahaya. NAB air yang mengandung merkuri total 0,002 ppm baik digunakan untuk perikanan. Pedoman buku mutu lingkungan menjelaskan bahwa, kadar merkuri pada makanan yang dikonsumsi langsung maksimum sebesar 0,001 ppm. Kadar merkuri yang aman dalam darah maksimal 0,04 ppm. Kadar merkuri sebesar 0,1-1 ppm dalam jaringan sudah dapat menyebabkan munculnya gangguan fungsi tubuh.

Sensor Logam Berat

Pencemaran lingkungan oleh ion logam berat merupakan masalah yang serius karena mengakibatkan berbagai masalah kesehatan seperti menaikkan resiko terjadinya kanker payudara, penyakit kardiovaskular atau paru-paru, dan penyakit jantung. Efek lain yang menunjukkan toksisitas ion logam berat adalah kegagalan fungsi ginjal, encok, pembentukan artritis, juga kerusakan tulang (Bernhoft, 2013). Oleh karena itu, deteksi ion logam berat perlu dilakukan sedini mungkin agar dapat dilakukan upaya penanggulangan dan pengelolaan agar

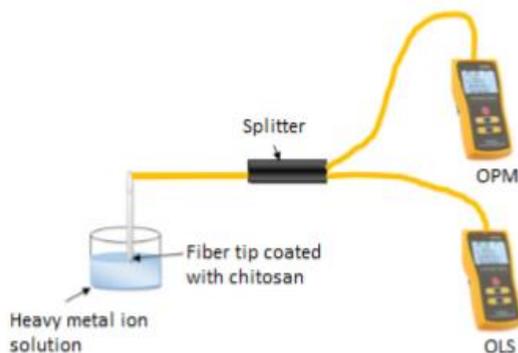
pencemaran tidak berkembang semakin luas. Namun, metode deteksi ion logam berat yang sekarang ini umum dilakukan adalah metode berbasis laboratorium yang mana dalam prosesnya diperlukan prosedur yang panjang dan rumit seperti aktivasi neutron cepat (AANC), ekstraksi larutan sampel, ekstraksi fase solid berdasarkan adsorpsi atau pertukaran ion, dan teknik elektroanalitik (Ho et al., 2012). Dengan demikian, deteksi ion logam berat dengan metode konvensional memerlukan waktu, tenaga dan biaya yang tinggi.

Upaya untuk mengatasi kelemahan metode konvensional telah dilakukan dengan menggunakan sensor berbasis fiber optik karena dengan menggunakan fiber optik, pengukuran dapat dilakukan secara in-situ dan real time. Selain itu, dengan teknologi fiber optik, pengukuran dalam sistem terdistribusi dan jarak jauh mungkin dilakukan. Dari segi biaya, sensor berbasis fiber optik juga memiliki kelebihan karena harganya yang murah.

Dalam pengembangannya, berbagai metode telah digunakan untuk mendeteksi ion logam berat dengan teknologi sensor fiber optik seperti fluoresensi (Avcı & Kaya, 2015), absorpsi evanescent wave (Wu et al., 2007; Xin et al., 2017; Xiong et al., 2017) dan interferometer (Tou et al., 2014). Diantara metode-metode tersebut, metode interferometer memiliki kelebihan dimana pengukuran dengan metode ini didasarkan pada pergeseran panjang gelombang sehingga hasil pengukuran lebih akurat karena tidak dipengaruhi oleh rugi daya akibat fluktuasi pada sumber cahaya, akibat lengkungan serta akibat koneksi antar fiber optik. Metode interferometer sendiri dapat direalisasikan dalam konfigurasi Fabry-Perot interferometer (FP), Sagnac interferometer (SI), Mach-Zehnder interferometer (MZI) dan Michelson interferometer (MI).

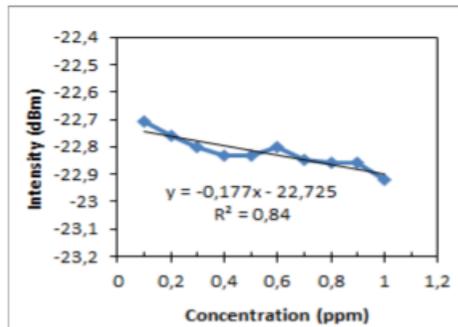
Konfigurasi SI telah digunakan sebagai sensor kelembaban dengan memberikan coating kitosan (Chen & Chan, 2012). Namun dengan menggunakan konfigurasi ini, dimensi sensor menjadi terlalu panjang (50cm). Selain itu, konfigurasi ini menggunakan bahan kimia yang berbahaya untuk proses etching. Sementara itu, konfigurasi FP dan MI tidak praktis karena memerlukan komponen optik

tambahan (optical circulator dan optical splitter) dalam proses pendeteksian keluarannya. MZI menarik untuk dikembangkan karena tidak memerlukan komponen optik tambahan dalam proses deteksi cahayanya. Tou et al. (2014) telah menggunakan MZI untuk deteksi nikel (Ni^{2+}) dengan menggabungkan photonic crystal fiber (PCF) dengan single mode silica fiber (SMF). Namun, struktur ini memerlukan teknik yang rumit dalam proses fabrikasinya. Yulianti et al (2019) juga telah melakukan studi mengenai sensor logam berat dengan memberikan *coating* kitosan berbasis *Fabry Perot-Interferometer* (FPI) untuk mendeteksi timbal (Pb^{2+}), air raksa Hg^{2+} , dan nikel (Ni^{2+}) seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 12.

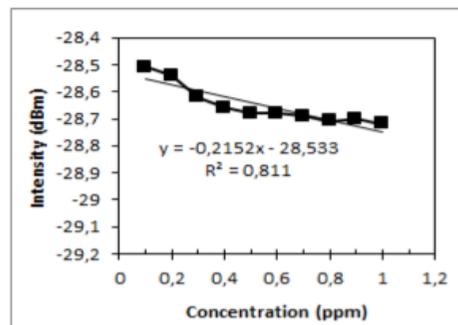


Gambar 12. Sensor Logam Berat (Yulianti *et al*, 2019)

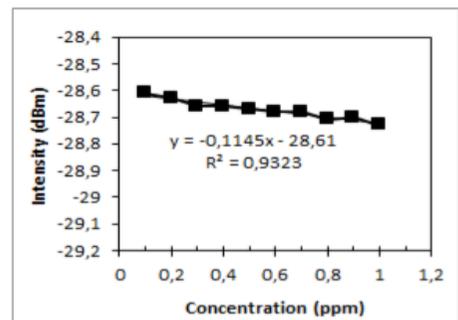
Intensitas cahaya yang dipantulkan diterima oleh Optical Power Meter (OPM) diplotkan terhadap konsentrasi larutan ion logam berat seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 13. Terlihat bahwa semua sampel ion logam berat intensitasnya menurun seiring dengan peningkatan konsentrasi larutan. Intensitas pantulan FPI bergantung pada panjang rongga. Panjang rongga terjadi karena adanya adsorpsi ion logam berat oleh kitosan. Sensor ion logam berat juga telah dikembangkan dengan menggunakan polymer optical fiber (POF) untuk mendeteksi cadmium (Cd^{2+}) dengan mekanisme adsorpsi gelombang evanescent pada batas inti-selubung (Yulianti, 2017). Sensor POF berbasis gelombang difabrikasi dengan cara memodifikasi lapisan selubung bagian penginderaan dengan bahan polymer kitosan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.



(a)



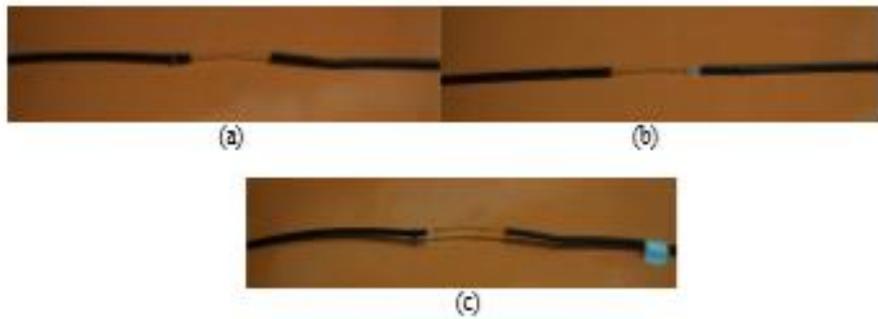
(b)



(c)

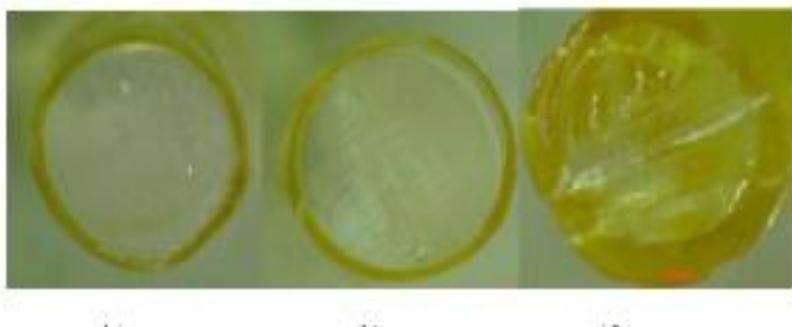
Gambar 13. Intensitas cahaya yang dipantulkan terhadap konsentrasi ion logam berat

(a) Pb^{2+} , (b) Hg^{2+} , (c) Ni^{2+} (Yulianti et al, 2019)



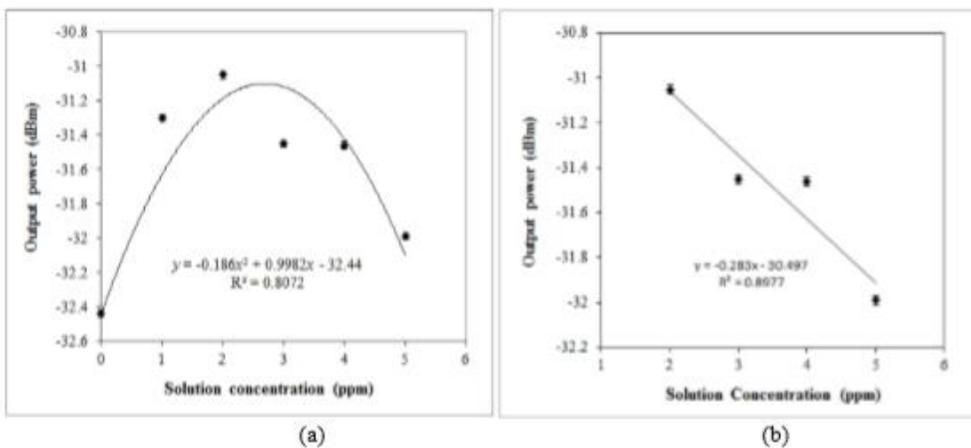
Gambar 14. Sensor Ion Logam Berat (a) Sensor A (b) Sensor B, dan (c) Sensor C (Yulianti, 2017).

Ketika sensor POF dicelupkan pada larutan ion Cd, maka ion Cd yang teradsorpsi oleh lapisan kitosan akan memasuki rongga-rongga didalam lapisan kitosan sehingga menyebabkan kitosan membengkak seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 15. Seiring dengan pembengkakan kitosan, kerapatan kitosan berkurang yang berakibat indeks biasnya mengecil. Perubahan indeks bias pada selubung akibat pengisian rongga menyebabkan berubahnya sudut kritis pada pemantulan internal total di dalam inti serat optik. Perubahan sudut kritis ini menyebabkan sebagian daya optis cahaya terserap oleh selubung keluar. Energi cahaya yang terserap mantel keluar dari inti serat secara eksponensial sebagai gelombang *evanescent* (Maddu et al, 2006).



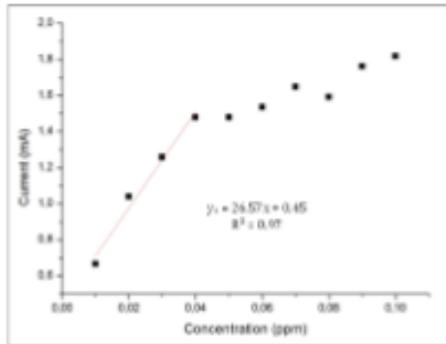
Gambar 15. Penampang lapisan kitosan yang teradsorpsi oleh logam berat(Yulianti, 2017)

Sensor dicelupkan pada konsentrasi larutan cadmium 2 ppm – 5 ppm. Intensitas keluaran yang dihasilkan oleh optical power meter terhadap konsentrasi larutan kadmium ditunjukkan oleh Gambar 16. Nilai gradien mengindikasikan bahwa intensitas keluaran menurun seiring dengan kenaikan konsentrasi larutan kadmium. Penurunan intensitas cahaya disebabkan oleh kenaikan nilai indeks bias lapisan kitosan yang disebabkan oleh adsorpsi ion kadmium. Ketika sensor POF tercelup kedalam larutan kadmium, terjadi interaksi antara kitosan dan kadmium. Pori-pori kitosan tersubstitusi oleh ion kadmium membentuk struktur dan pelepasan kelat. Proses ini membuat permukaan kitosan menjadi lebih halus kemudian sebelum teradsorpsi oleh ion kadmium dan massa jenis kitosan meningkat.

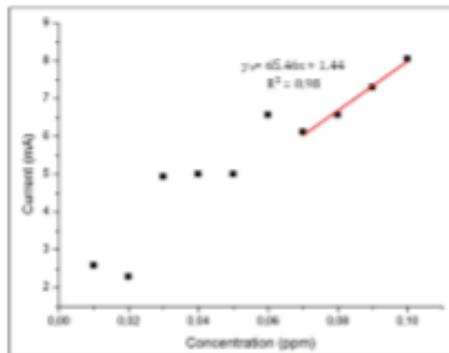


Gambar 16. Intensitas cahaya terhadap konsentrasi larutan. (a) Regresi polinomial (b) Regresi Linear (Yulianti, 2017)

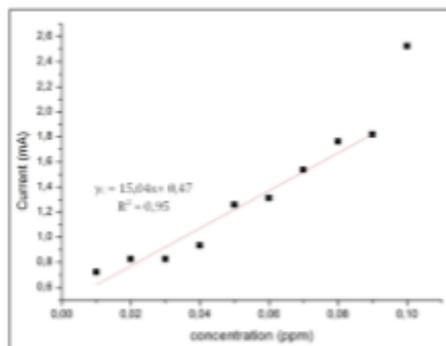
Sensitivitas dan waktu respon sensor serat optik plastik (POF) berlapis kitosan terhadap konsentrasi ion kadmium. Prinsip kerja sensor didasarkan pada perubahan intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh POF berlapis kitosan akibat perubahan konsentrasi ion kadmium. Tiga buah probe sensor difabrikasi dengan berbagai ketebalan lapisan yaitu $100.24 \mu m$ (sensor A), $131.97 \mu m$ (Sensor B), dan $376.24 \mu m$ (Sensor C). Karakterisasi dilakukan dengan memaparkan sensor pada berbagai larutan kadmium.



(a)



(b)



(c)

Gambar 17. Arus keluaran terhadap konsentrasi ion kadmium (a) Sensor A, (b) Sensor B, dan (c) Sensor C (Yulianti, 2018)

Gambar 17 menunjukkan bahwa kurva sensor A memiliki daerah linier pada kisaran 0,01 ppm-0,04 ppm dengan sensitivitas 26,57 mA/ppm dan koefisien

korelasi 0,97. Sedangkan sampel B memiliki daerah linier pada kisaran 0,07 ppm-0,1 ppm dengan sensitivitas dan koefisien korelasi masing-masing 65,46 mA/ppm dan 0,98. Rentang linier yang jangkauan jauh lebih luas ditunjukkan oleh sensor C yang berada dalam kisaran 0,01 pp-0,09 ppm. Meskipun jangkauannya lebih luas, sensor C memiliki sensitivitas terendah dan koefisien korelasi terendah (Yulianti, 2018).

GLOSARIUM

- $\chi(k)$: susceptibilitas magnetic (massa/volume-spezifik)
- χ_{para} : χ mineral paramagnetik
- χ_{high} : χ medan-high
- χ_{ferri} : χ minerals ferrimagnetik ($\chi_{ferri} = \chi - \chi_{high}$)
- χ_{fd} : susceptibilitas bergantung frekuensi ($\chi_{fd} = \chi_{lf} - \chi_{hf}$)
- χ_{lf} : χ low-frequency
- χ_{hf} : χ high-frequency
- $\chi_{fd}\%$: $\chi_{fd}/\chi_{ferri} \times 100\%$
- AF : alternating field
- DC : direct current
- H, B : magnetic field, H (A/m) and B (T)
- ARM : anhysteretic remanent magnetization
- χ_{ARM} : ARM normalized by the magnitude of the DC field used during ARM acquisition
- IRM : isothermal remanent magnetization
- SIRM : (M_{rs}) saturation isothermal remanent magnetization
- HIRM : the “hard” (or high-field) IRM
- NRM : natural remanent magnetization
- SD : single domain
- SP : superparamagnetic
- PSD : pseudo single domain
- MD : multidomain
- M_s : saturation magnetization
- T_C : Curie temperature
- T_N : Néel temperature
- T_b : blocking temperature
- T_V : Verwey transition temperature (120–122 K) for magnetite
- T_M : Morin transition temperature (250 K) for hematite

BCM : biologically controlled mineralization
BIM : biologically induced mineralization
CBD : citrate-bicarbonate-dithionite
DRS : diffuse reflectance spectroscopy
FORC : first-order reversal curve
HE Heinrich event
IRD ice-rafted debris
OATZ oxic-anoxic transition zone
OAE oceanic anoxic event
PETM Paleocene-Eocene thermal maximum

DAFTAR PUSTAKA

- Alves, O.C., Wajnberg, E., de Oliveira, J.F., Esquivel, D.M.S., 2004. Magnetic material arrangement in oriented termites: a magnetic resonance study. *J. Magn. Reson.* 168, 246–251.
- Avci, A. and Kaya, İ. 2015. "A new selective fluorescent sensor for Zn(II) ions based on poly(azomethine-urethane)." *Tetrahedron Letters*, 56 (14): 1820-1824.
- Bernhoft, R. A., 2013, "Cadmium Toxicity And Treatment", *The Scientific World Journal* 2013: 2013
- Blaha, U., Sapkota, B., Appel, E., Stanjek, H., Rösler, W., 2008. Micro-scale grain-size analysis and magnetic properties of coal-fired power plant fly ash and its relevance for environmental magnetic pollution studies. *Atmos. Environ.* 42, 8359–8370.
- Blundell, A., Hannam, J.A., Dearing, J.A., Boyle, J.F., 2009. Detecting atmospheric pollution in surface soils using magnetic measurements: A reappraisal using an England and Wales database. *Environ. Pollut.* 157, 2878–2890.
- Brem, F., Hirt, A.M., Winklhofer, M., Frei, K., Yonekawa, Y., Wieser, H.-G., Dobson, J., 2006. Magnetic iron compounds in the human brain: a comparison of tumour and hippocampal tissue. *J. R. Soc. Interface* 3, 833–841. <https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0133>
- Chen, L. H., Li, T., Chan, C. C., Menon, R., Balamurali, P., Shailender, M., and Leong, K. C. (2012). Chemical Chitosan based fiber-optic Fabry – Perot humidity sensor. *Sensors and Actuators*, 169, 167–172.
- Cisowski, S., 1981. Interacting vs. non-interacting single domain behavior in natural and synthetic samples. *Phys. Earth Planet. Inter.* 26, 56–62.
- Dewi, D.C., 2012. Determinasi kadar logam timbal (Pb) dalam makanan kaleng menggunakan destruksi basah dan destruksi kering. *Alchemy* 2, 12–25.
- Dubiel, S.M., Zablotna-Rypien, B., Mackey, J.B., 1999. Magnetic properties of human liver and brain ferritin. *Eur. Biophys. J. EBJ* 28, 263–267.
- Egli, R., Chen, A.P., Winklhofer, M., Kodama, K.P., Horng, C.-S., 2010. Detection of noninteracting single domain particles using first-order reversal curve diagrams. *Geochem. Geophys. Geosystems* 11.
- Evans, M., Heller, F., 2003. *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics*. Academic Press.

- Garcia, T. P., Urase, T., and Suzuki, Y., "Comparison of heavy metal pattern between Water and Sediments in Pasig River System, Philippines, Report of Japan-Philippines Exchange Program, JSPS, 2003.
- Gumpu, M. B., Sethuraman, S., Krishnan, U. M. and Rayappan, J. B. B. 2015. "A review on detection of heavy metal ions in water – An electrochemical approach." *Sensors and Actuators B*, 213: 515-533.
- Huliselan, E. K., and Bijaksana, S., "Magnetik Properties as Proxy Indicators of Heavy Metals in Leachate: A Case Study from Jelekong Solid Waste Disposal Site Bandung", *Proc. of ICMNS*, 819-822, Bandung, November 29-30, 2006.
- Jarup, Lars., 2003, "Hazards of Heavy Metal Contamination", *British medical bulletin* 68 (1), 167-182, 2003.
- Jordanova, N.V., Jordanova, D.V., Veneva, L., Yorova, K., Petrovsky, E., 2003. Magnetic response of soils and vegetation to heavy metal pollution--a case study. *Environ. Sci. Technol.* 37, 4417–4424.
- Kirschvink, J.L., Kirschvink, A.K., 1991. Is Geomagnetic Sensitivity Real? Replication of the Walker-Bitterman Magnetic Conditioning Experiment in Honey Bees. *Integr. Comp. Biol.* 31, 169–186. <https://doi.org/10.1093/icb/31.1.169>
- Kopp, R.E., Kirschvink, J.L., 2008. The identification and biogeochemical interpretation of fossil magnetotactic bacteria. *Earth-Sci. Rev.* 86, 42–61.
- Kumar, R., et al. (2016). Chapter 13 - Detoxification and Tolerance of Heavy Metals in Plants. *Plant Metal Interaction*. Ahmad, P., Elsevier: 335-359.
- Lanci, L., Delmonte, B., Kent, D.V., Maggi, V., Biscaye, P.E., Petit, J.-R., 2012. Magnetization of polar ice: a measurement of terrestrial dust and extraterrestrial fallout. *Quat. Sci. Rev.* 33, 20–31.
- Larrasoaña, J.C., Roberts, A.P., Chang, L., Schellenberg, S.A., Fitz Gerald, J.D., Norris, R.D., Zachos, J.C., 2012. Magnetotactic bacterial response to Antarctic dust supply during the Palaeocene–Eocene thermal maximum. *Earth Planet. Sci. Lett.* 333–334, 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.04.003>
- Liu, C., Huang, C., Chang, H., 2009. Highly Selective DNA-Based Sensor for Lead (II) and Mercury (II) Ions 81, 6824–6828.
- Liu, J., Qu, W., & Kadiiska, M. B. 2009. Role of oxidative stress in cadmium toxicity and carcinogenesis. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 238: 209–214.
- Liu, Q., Banerjee, S.K., Jackson, M.J., Deng, C., Pan, Y., Zhu, R., 2005a. Inter-profile correlation of the Chinese loess/paleosol sequences during Marine Oxygen Isotope Stage 5 and indications of pedogenesis. *Quat. Sci. Rev.* 24, 195–210.

- Liu, Q., Roberts, A.P., Larrasoana, J.C., Banerjee, S.K., Guyodo, Y., Tauxe, L., Oldfield, F., 2012. Environmental magnetism: Principles and applications. *Rev. Geophys.* 50.
- Liu, Q., Torrent, J., Maher, B.A., Yu, Y., Deng, C., Zhu, R., Zhao, X., 2005b. Quantifying grain size distribution of pedogenic magnetic particles in Chinese loess and its significance for pedogenesis. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 110.
- Lowrie, W., 1990. Identification of ferromagnetic minerals in a rock by coercivity and unblocking temperature properties. *Geophys. Res. Lett.* 17, 159–162.
- Lu, S.G., Bai, S.Q., 2006. Study on the correlation of magnetic properties and heavy metals content in urban soils of Hangzhou City, China. *J. Appl. Geophys.* 60, 1–12.
- Maddu, A., Modjahidin, K., Sardy, S., & Zain, H. (2006). Pengembangan Probe Sensor Kelembaban Serat Optik dengan Cladding Gelatin. *Makara, Teknologi*, 10(1), 45–50.v
- Mayra, T., Igel, C., Liebsch, G., Klimant, I., Wolfbeis, O.S., 2003. Cross-Reactive Metal Ion Sensor Array in a Micro Titer Plate Format 75, 4389–4396.
- Mayra, T., Klimant, I., Wolfbeis, O. S., Werner, T. 2008. Dual lifetime referenced optical sensor membrane for the determination of copper (II) ions. *Analytical ChimicaActa*, 462: 1 - 10.
- Moore, A., Freake, S.M., Thomas, I.M., 1990. Magnetic Particles in the Lateral Line of the Atlantic Salmon (*Salmo salar* L.). *Philos. Trans. Biol. Sci.* 329, 11–15.
- Muxworthy, A., Heslop, D., Williams, W., 2004. Influence of magnetostatic interactions on first-order-reversal-curve (FORC) diagrams: a micromagnetic approach. *Geophys. J. Int.* 158, 888–897.
- Naria, E., 2005. Mewaspadai Dampak Pencemaran Timbal (Pb) di Lingkungan Terhadap Kesehatan. *J. Komun. Penelit.* 17, 66–72.
- Rohling, E.J., Grant, K., Hemleben, C., Kucera, M., Roberts, A.P., Schmeltzer, I., Schulz, H., Siccha, M., Siddall, M., Trommer, G., 2008. New constraints on the timing of sea level fluctuations during early to middle marine isotope stage 3. *Paleoceanography* 23.
- Sagnotti, L., Macrì, P., Egli, R., Mondino, M., 2006. Magnetic properties of atmospheric particulate matter from automatic air sampler stations in Latium (Italy): Toward a definition of magnetic fingerprints for natural and anthropogenic PM10 sources. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 111.
- Sobirin, 2010. Identifikasi Unsur dan Kadar Logam Berat Pada Waduk Cacaban Kabupaten Tegal Dengan Metode Analisis Pengaktifan Neutron 27, II.

- Szönyi, M., Sagnotti, L., Hirt, A.M., 2008. A refined biomonitoring study of airborne particulate matter pollution in Rome, with magnetic measurements on *Quercus Ilex* tree leaves. *Geophys. J. Int.* 173, 127–141.
- Thouveny, N., de Beaulieu, J.-L., Bonifay, E., Creer, K.M., Guiot, J., Icole, M., Johnsen, S., Jouzel, J., Reille, M., Williams, T., Williamson, D., 1994. Climate variations in Europe over the past 140 kyr deduced from rock magnetism. *Nature* 371, 503–506.
- Tian, L., Lin, W., Zhang, S., Pan, Y., 2010. Bat head contains soft magnetic particles: evidence from magnetism. *Bioelectromagnetics* 31, 499–503.
- Widaningrum, Miskiyah, Suismono, 2007. Bahaya Kontaminasi Logam Berat Dalam Sayuran Dan Alternatif Pencegahan Cemarannya. *Bul. Teknol. Pascapanen Pertan.* 3, 16–27.
- Wolfbeis, O.S., 2005. Materials for fluorescence-based optical chemical sensors 2657–2669.
- Wu, Y., Deng, X., Li, F. and Zhuang, X. 2007. "Less-mode optic fiber evanescent wave absorbing sensor: Parameter design for high sensitivity liquid detection." *Sensors and Actuators B*, 122: 127-133.
- Xin Xin, Zhong, N., Liao, Q., Cen, Y., Wu, R., and Wang, Z., 2017, "High-sensitivity Four-Layer Polymer Fiber-Optic Evanescent Wave Sensor", *Biosensors and Bioelectronics* 91, 623-628, 2017.
- Xiong, Y., Tan, J., Wang, C., Wu, J., Wang, Q., Chen, J., Fang, S., and Duan, M., 2017, "A Miniaturized Evanescent-Wave Free Chlorine Sensor Based On Colorimetric Determination By Integrating On Optical Fiber Surface", *Sensors and Actuators B: Chemical* 245, 674-682, 2017.
- Yuan, J. & El-Sherif M., 2003, "Fiber-Optic Chemical Sensor Using Polyaniline as modified Cladding Material", *IEEE Sensors Journal* 3 (1), 5-12, 2003.
- Yulaipi, S., & Aunurohim, 2013, "Bioakumulasi Logam Berat Timbal (Pb) dan Hubungannya Dengan Laju Pertumbuhan Ikan Mujair (*Oreochromis Mossambicus*)", *Jurnal Sains dan Seni Its* 2 (2), E166-E170, 2013.
- Yulianti, I., Putra, N M D., Fianti, Akmalia, N., Pratiwi, D A., and Albadiyah, I., 2019. "Study of chitosan layer-based Fabry Perot Interferometer optical fiber sensor properties for detection of Pb²⁺, Hg²⁺ and Ni²⁺", *Journal of Physics: Conf. Series* 1170 (2019) 012079.
- Yulianti, I., S S Edy, B A Saputra, M P Aji, Susanto, dan O Kurdi. 2017. Detection of Cadmium Ion by Evanescent Wave Based Chitosan Coated Optical Fiber Sensor. *Journal of Physics: Conf. Series* 824 (2017) 012002.
- Yulianti, I., N M D Putra, Masturi, I V Albadiyah, D A Pratiwi dan N Akmalia. Characterization of Sensitivity and Response Time of Plastic Optical

Fiber Sensor to Cadmium Ion. *Journal of Physics: Conf. Series* 983 (2018) 012013.

- Zhang, C., Huang, B., Piper, J.D.A., Luo, R., 2008. Biomonitoring of atmospheric particulate matter using magnetic properties of *Salix matsudana* tree ring cores. *Sci. Total Environ.* 393, 177–190.
- Zhang, W., Jiang, H., Dong, C., Yan, Q., Yu, L., Yu, Y., 2011. Magnetic and geochemical characterization of iron pollution in subway dusts in Shanghai, China. *Geochem. Geophys. Geosystems* 12.