



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



**Solusi Berkelanjutan
terhadap Permasalahan Eksplorasi,
Geoteknik, dan Lingkungan
Menggunakan Metode Geoelektromagnetik**

Profesor Wahyudi Widyatmoko Parnadi
Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan
Institut Teknologi Bandung

Aula Barat ITB
7 Desember 2024

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**SOLUSI BERKELANJUTAN TERHADAP
PERMASALAHAN EKSPLORASI,
GEOTEKNIK, DAN LINGKUNGAN
MENGGUNAKAN METODE
GEOELEKTROMAGNETIK**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**SOLUSI BERKELANJUTAN TERHADAP
PERMASALAHAN EKSPLORASI,
GEOTEKNIK, DAN LINGKUNGAN
MENGGUNAKAN METODE
GEOELEKTROMAGNETIK**

Prof. Wahyudi Widyatmoko Parnadi

7 Desember 2024
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin
dari penerbit

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

**Solusi Berkelanjutan terhadap Permasalahan Eksplorasi, Geoteknik, dan
Lingkungan Menggunakan Metode Geoeletromagnetik**

Penulis : Prof. Wahyudi Widyatmoko Parnadi

Reviewer : Prof. Umar Fauzi

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-640-5

e-ISBN : 978-623-297-641-2 (PDF)



✉ Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132

📞 +62 22 20469057

🌐 www.itbpress.id

✉ office@itbpress.id

Anggota Ikapi No. 043/JBA/92

APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Buku ini disusun sebagai pelengkap dalam Orasi Ilmiah sebagai pertanggungjawaban penulis atas penerimaannya sebagai Guru Besar di bidang Elektromagnetik Dekat Permukaan. Bidang geoeletromagnetik merupakan bidang yang sedang berkembang sebagai salah satu metode geofisika yang digunakan dalam pendugaan kondisi di bawah permukaan bumi yang tidak bisa dilihat dengan mata telanjang. Metode geoeletromagnetik ini menjadi salah satu metode geofisika yang dapat mengidentifikasi, melokalisir, mengarakterisasi, memonitor, maupun menentukan volume anomali di bawah bumi yang sedang kita cari, baik pada kedalaman dangkal, sedang, maupun dalam. Perkembangan metode ini teridentifikasi dan terdokumentasi dengan baik dalam hal teknik akuisisi, pemrosesan maupun analisis dan interpretasi datanya.

Metode geoeletromagnetik merupakan metode standar dalam eksplorasi bijih logam di mana kontras nilai sifat keelektromagnetannya relatif lebih tinggi daripada batuan induknya. Sifat keelektromagnetan yang dimaksud disini adalah sifat kelistrikan yang digambarkan melalui parameter resistivitas dan permitivitas listriknya serta sifat kemagnetan yang digambarkan oleh nilai permeabilitas magnetiknya.

Metode geoeletromagnetik ini berkembang pesat sebagai solusi yang berkelanjutan terhadap permasalahan geoteknik, di mana ketelitian, kecepatan penyelesaian pekerjaan, dan biaya yang lebih kompetitif sangat dituntut. Salah satu kelebihan metode ini adalah bisa menentukan distribusi spatial dari sifat keteknikan tanah dan batuan yang merupakan kekurangan metode geoteknik, di mana data yang diperoleh berupa data yang hanya berlaku di titik di mana data diambil.

Dalam memberikan solusi terhadap permasalahan lingkungan seperti pencemaran, penentuan bidang yang berpotensi longsor, dan pemantauan perubahan parameter lingkungan, metode ini punya potensi yang besar. Penggunaan *bioagent* dalam stabilisasi tanah sangat prospek di mana prosesnya bersifat ramah lingkungan, dan dapat dikerjakan secara berkelanjutan. Proses yang disebut MICP (*Microbial-Induced Calcite Precipitation*) saat ini sedang menjadi fokus riset banyak peneliti yang

menggabungkan disiplin geofisika, mikrobiologi, dan kimia sebagai kontribusi dalam perawatan bumi yang berkelanjutan. Geofisika dalam hal ini berperan dalam pemantauan keefektifan proses MICP yang sedang terjadi.

Dalam perkembangannya, pendekatan metode elektromagnetik yang relatif efisien secara waktu dan biaya, ramah lingkungan, serta pengukurannya dapat diulang dengan mudah, semakin banyak digunakan dalam eksplorasi dan penyelidikan bumi. Dalam buku ini diberikan beberapa contoh aplikasi dan pengembangan metode elektromagnetik yang sudah dan sedang penulis tekuni dengan harapan semakin besar peranan dari metode elektromagnetik dalam memberikan solusi permasalahan geoteknik dan lingkungan yang berkesinambungan.

Akhir kata, buku ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan ilmu geoelektronagnetik, memberikan manfaat langsung maupun tidak langsung pada perkembangan bidang eksplorasi, keteknikan dan lingkungan di Indonesia dan mendukung pelaksanaan tridarma perguruan tinggi. Saran dan kritik yang membangun sangat kami harapkan demi sempurnanya buku ini.

Bandung, 7 Desember 2024

Prof. Wahyudi Widyatmoko Parnadi

SINOPSIS

Buku ini disusun untuk mengambarkan ilmu geoelektrik secara komprehensif khususnya pada kedalaman dangkal dan aplikasi beserta pengembangannya sebagai solusi permasalahan eksplorasi, geoteknik dan lingkungan. Dalam buku ini, ilmu geoelektrik dibahas secara mendalam dan detail, dimulai dari Bab Pendahuluan yang menjelaskan tentang permasalahan eksplorasi, geoteknik, dan lingkungan dan solusi yang mungkin dari pendekatan geoelektrik yang mendasarkan pada kontras nilai resistivitas dan permitivitas listrik serta permeabilitas magnetik dari batuan yang tersebar di bumi hingga bab peluang dan tantangan metode elektromagnetik dalam menjawab persoalan kebumian. Dalam pendahuluan diuraikan tentang kedalaman investigasi dari beberapa jenis metode elektromagnetik beserta potensi aplikasinya. Penjelasan teori dasar metode elektromagnetik dan teknik-teknik geoelektrik yang berkembang dalam penyelidikan bumi diuraikan pada 2 bab selanjutnya. Setelah itu dibahas tentang solusi permasalahan eksplorasi, geoteknik dan permasalahan lingkungan pada 3 bab berikutnya.

Solusi permasalahan eksplorasi diuraikan melalui contoh-contoh pada eksplorasi airtanah dan mineral logam di mana metode geoelektrik merupakan teknik standar dan umum diaplikasikan pada kedua bidang tersebut.

Solusi permasalahan geoteknik ditampilkan melalui contoh pertama berupa deteksi otomatis keberadaan pipa yang terpendam di dalam bumi pada data *Ground-Penetrating Radar* (GPR) menggunakan teknik *machine learning* algoritma faster R-CNN yang dapat mempercepat identifikasinya dibanding cara konvensional. Deteksi otomatis ini sangat penting, terutama jika kita punya data hasil pengukuran yang banyak sekali dengan kendala waktu yang sangat terbatas dan hasilnya diharapkan segera diperoleh. Keberadaan pipa ini dapat diidentifikasi melalui bentuk hiperbola pada radargram. Algoritma faster R-CNN ini berhasil mengenali pola hiperbola pada radargram, mengestimasi kedalaman dan posisi dari puncak hiperbola yang pada beberapa kasus sulit dipecahkan dari data radargram. Contoh kedua adalah

solusi yang juga menggunakan *Deep Learning*, di mana kami menampilkan perbaikan algoritma dalam menentukan posisi dan kedalaman dari pipa.

Solusi permasalahan lingkungan disajikan melalui 2 kegiatan, yaitu monitoring proses stabilisasi tanah yang menggunakan *bioagent* dan penentuan kualitas tanah pada eks lokasi TPA (Tempat Pembuangan Sampah Akhir) Leuwi Panjang. Proses yang pertama dikenal sebagai MICP (*Microbial-Induced Calcite Precipitation*) dan dapat dimonitor prosesnya menggunakan metode geofisika. Perubahan kekuatan tanah dengan perlakuan bioagent tersebut berhasil dimonitor menggunakan metode geolistrik IP. Kegiatan kedua melibatkan penggunaan metode polarisasi terimbas, metode resistivitas arus searah, dan metode EMI (*Electromagnetic Induction*) dengan bilangan induksi <1 . Terakhir dijelaskan tentang peluang dan tantangan aplikasi dan pengembangan metode geoeletromagnetik ini dalam eksplorasi, penyelidikan geoteknik, dan lingkungan.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	V
SINOPSIS	VII
DAFTAR ISI.....	IX
DAFTAR GAMBAR	XI
DAFTAR TABEL.....	XIII
1 PENDAHULUAN	1
1.1 Permasalahan Eksplorasi, Geoteknik, dan Lingkungan yang Sering Dihadapi.....	2
1.2 Geoelektrik Sebagai Solusi Permasalahan Geoteknik dan Lingkungan yang Berkelanjutan	3
1.3 Jenis, Spesifikasi, dan Kedalaman Penetrasi Metode Geoelektrik	3
2 METODE GEOELEKTROMAGNETIK	5
2.1 Persamaan Maxwell dan Konstitutif	6
2.2 Persamaan Telegraf, Persamaan Gelombang, dan Persamaan Difusi.....	8
2.3 Solusi Persamaan Medan Elektromagnetik	9
2.4 Kasus Batas	10
2.5 Refleksi dan Transmisi pada Bidang Batas	12
2.6 Resolusi	14
3 METODE GEOELEKTROMAGNETIK SEBAGAI SOLUSI PERMASALAHAN GEOTEKNIK DAN LINGKUNGAN	17
3.1 Metode <i>Ground-Penetrating Radar</i> (GPR)	17
3.2 Metode <i>Electromagnetic Induction</i> (EMI)	17
3.3 Metode <i>Induced Polarization</i> (IP)	18
4 SOLUSI PERMASALAHAN GEOTEKNIK	21
4.1 Deteksi Otomatis Lokasi dan Kedalaman Pipa Terpendam Menggunakan Teknik Convolutional Neural Network	21
5 SOLUSI PERMASALAHAN LINGKUNGAN	27
5.1 Penentuan Kesuburan Tanah Pertanian	27
5.2 Monitoring Proses <i>Microbial-Induced Calcite Precipitation</i> (MICP) pada Proses Stabilisasi Tanah	29

6	TANTANGAN DAN PELUANG MASA DEPAN METODE GEOELEKTROMAGNETIK SEBAGAI SOLUSI PERMASALAHAN GEOTEKNIK DAN LINGKUNGAN.....	35
7	PENUTUP.....	37
8	UCAPAN TERIMA KASIH	39
	DAFTAR PUSTAKA	43
	CURRICULUM VITAE	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Kedalaman penetrasi beberapa jenis sistem geoelektrik (modifikasi dari Tezkan, 1988)	4
Gambar 2.1	Ilustrasi persamaan Maxwell (2.1) (a); persamaan Maxwell (2.2) (b); persamaan Maxwell (2.3) (c); dan persamaan Maxwell (2.4) (d)	7
Gambar 2.2	Kecepatan fasa (gambar kiri) dan kedalaman penetrasi τ (gambar kanan) sebagai fungsi frekuensi untuk beberapa media dengan asumsi sifat elektromagnetik yang konstan (Forkmann & Petzold, 1989; Parnadi, 2001).....	11
Gambar 2.3	Efek dispersi dari kecepatan rambat gelombang elektromagnetik v (gambar kiri) dan kedalaman penetrasi τ (gambar kanan) dari batuan lunak (batubara dan lanau). Garis putus-putus adalah kurva dispersi dari v dan τ dengan asumsi sifat elektromagnetik yang konstan (Forkmann & Petzold, 1989; Parnadi, 2001)	11
Gambar 2.4	Refleksi dan transmisi gelombang yang datang pada bidang batas (a) bidang datang yang dibentuk oleh vektor gelombang datang yang tegak lurus bidang batas (b)	12
Gambar 2.5	Amplitudo (a) dan fasa (b) dari koefisien refleksi R_{\parallel} dan koefisien transmisi T_{\parallel} pada suatu bidang batas antara pasir dan gneis	14
Gambar 3.1	Kurva arus yang diberikan (atas) dan kurva potensial (bawah) sebagai fungsi waktu pada metode IP. Ketika arus I_p dimatikan masih terdapat potensial V_s yang berangsur-angsur meluruh dengan waktu.	18
Gambar 3.2	Membrane polarization: (a) ketika medan listrik belum diterapkan, dan ketika medan listrik diterapkan (b)	19
Gambar 3.3	Kondisi pada konduksi elektrolitik di mana efek polarisasi terimbas IP tidak terjadi (a), dan kondisi ketika arus listrik diterapkan (b).....	19

Gambar 4.1	Bagan alir kerangka kerja dalam kerangka kerja penentuan deteksi hiperbola dan ekstraksi koordinat puncak dari pipa yang terpendam menggunakan teknik CNN	22
Gambar 4.2	Radargram yang disimulasikan menggunakan simulated by software gprMax:(a) Dataset 1, (b) Dataset 2, (c) Dataset 3 (Dewantara & Parnadi, 2022)	23
Gambar 4.3	Radargram lapangan dari lokasi uji IFSTTAR: (a) radargram lapangan 1. (b) radargram lapangan 2.....	24
Gambar 4.4	Algoritma Faster R-CNN	24
Gambar 4.5	Hasil deteksi objek hiperbola pada dataset 1 sintetik.	25
Gambar 4.6	Hasil deteksi objek hiperbola pada data lapangan 1. Terlihat bahwa sebagian besar objek hiperbola dapat dideteksi lokasi dan kedalaman puncaknya.....	26
Gambar 5.1	Distribusi konduktivitas pada lapangan uji di Eks TPA Leuwi Gajah menggunakan teknik EMI, geolistrik, dan pengukuran parameter sampel di lapangan.....	28
Gambar 5.2	Peta kandungan fosfor (kiri) dan kadar air (kanan) dari lokasi uji pada lokasi eks Tempat Pembuangan Akhir.....	28
Gambar 5.3	Proses persiapan sampel yang ditreatment dengan bioagent	30
Gambar 5.4	Perubahan kekuatan tanah yang diberi perlakuan bioagent, dalam bentuk tegangan vs. regangan pada 2 jenis perlakuan yang berbeda.	31
Gambar 5.5	Kurva tegangan regangan tanah yang diberi perlakuan <i>bioagent</i> dibandingkan dengan tanah yang tidak diberi perlakuan sebagai kontrol.	31
Gambar 5.6	Diagram Mohr kekuatan tanah sebagai fungsi waktu pada tanah dengan <i>treatment 1:1</i>	32
Gambar 5.7	Diagram Mohr kekuatan batuan sebagai fungsi waktu pada tanah dengan <i>treatment 2:2</i>	32
Gambar 5.8	Sistem peralatan untuk mengukur nilai resistivitas tanah pada <i>sample box</i>	33
Gambar 5.9	Penampang resistivitas dari pengukuran IP yang memperlihatkan perubahan nilai yang semakin tinggi dengan berjalananya waktu	33

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Spesifikasi dataset untuk simulasi	23
Tabel 4.2	Spesifikasi komputer yang digunakan untuk simulasi	24
Tabel 5.1	Kebutuhan bahan untuk uji di laboratorium dan di lapangan uji	30
Tabel 5.1	Treatment untuk skala laboratorium	30

1 PENDAHULUAN

Seiring dengan kemajuan kegiatan perekonomian di Indonesia, banyak timbul permasalahan dalam kehidupan sehari-hari yang perlu segera dicarikan solusinya. Permasalahan di bidang eksplorasi, geoteknik, juga di bidang lingkungan muncul mengikuti kemajuan tersebut. Disiplin geofisika bisa berperan sebagai *tool* yang dapat memberikan solusi atas permasalahan yang timbul, baik sebagai pendekripsi utama maupun berperan secara sekunder. Metode geofisika sebagai suatu metode eksplorasi dan penyelidikan bumi berperan dalam eksplorasi bahan tambang, minyak dan gas, geothermal, hingga eksplorasi airtanah; penyelidikan geoteknik, serta penyelidikan lingkungan, dengan memetakan kondisi di bawah permukaan bumi, dari kedalaman yang sangat dangkal (beberapa cm) hingga kedalaman dalam (beberapa km).

Geofisika diartikan sebagai bagian dari ilmu yang mempelajari bumi melalui penerapan kaidah-kaidah atau prinsip fisika. Dalam perkembangannya, metode geofisika didukung oleh perkembangan dalam bidang kimia, biologi, dan matematika serta komputasi matematik. Metode geoelektrik magnetik adalah salah satu metode geofisika yang mempelajari interaksi antara kuat medan listrik dan kuat medan magnet dengan sistem bumi. Aplikasi metode ini berkembang dengan pesat seiring dengan perkembangan dalam perangkat kerasnya, perangkat lunaknya, metodologi, metode, teknik akuisisi, pengolahan data dan interpretasinya. Beberapa institusi, baik universitas maupun institusi pemerintah di Indonesia dan di luar negeri mengembangkan jenis metode elektromagnetik yang disesuaikan dengan kebutuhannya.

Istilah eksplorasi dalam ilmu kebumian mengacu pada kegiatan mencari untuk mendapatkan informasi tentang batuan yang bernilai ekonomis. Geoteknik diartikan secara khusus sebagai cabang ilmu teknik sipil/teknik tambang yang mempelajari sifat fisik dan sifat mekanik tanah atau batuan serta penerapannya dalam perancangan, pelaksanaan pekerjaan, dan pemeliharaan berbagai struktur bangunan. Dalam arti yang lebih luas, penulis mengartikan istilah geoteknik sebagai segala teknik yang diterapkan untuk mempelajari bumi, termasuk geologi teknik dan teknik tanah, sedangkan lingkungan adalah lingkungan fisik bumi.

Pada subbab berikut, dijelaskan tentang permasalahan eksplorasi, geoteknik, dan lingkungan yang sedang kita hadapi, serta solusi permasalahan pada ketiga bidang di atas menggunakan metode geoelektronik.

1.1 Permasalahan Eksplorasi, Geoteknik, dan Lingkungan yang Sering Dihadapi

Permasalahan eksplorasi yang sering timbul dalam pelaksanaan sehari-hari adalah menemukan airtanah di daerah di mana pada saat musim kemarau mengalami kekeringan. Dengan semakin intensifnya industrialisasi, kebutuhan air untuk industri banyak tergantung pada ketersediaan airtanah di mana semakin lama permukaan airtanah semakin menurun yang meningkatkan kesulitan dalam eksploitasiannya.

Permasalahan geoteknik yang sering dihadapi sebagai contoh adalah terjadinya efek *mud pumping* pada jalan kereta api, terdapatnya potensi longsor lereng di samping jalan tol, rembesan air pada tubuh bendungan air, mengetahui zona retak pada tiang jembatan jalan layang, mengetahui zona lemah pada tuang struktur bangunan tingkat tinggi, terjadinya kegagalan bangunan akibat kesalahan dalam penentuan kedalaman tanah keras untuk bangunan gedung bertingkat tinggi; mengetahui terdapatnya rongga-rongga di bawah badan jalan; hingga mengetahui zona rekahan pada rencana tapak bangunan di fasilitas pembangkit listrik tenaga panasbumi. Pada beberapa kasus yang ditemui, terdapat beberapa rongga di bawah tanah yang tidak dapat diduga oleh data geoteknik yang biasa dilakukan, seperti sondir, boring, N-SPT maupun metode geoteknik lainnya, tetapi berpotensi untuk mengalami keruntuhan, sedemikian rupa sehingga mengancam keselamatan bangunan.

Dibanding permasalahan geoteknik, permasalahan pada bidang lingkungan tidak kalah banyaknya. Sebagai contoh beberapa kasus ini dapat ditemui: pencemaran lindi terhadap air tanah di perkampungan yang berlokasi dekat dengan tempat pembuangan sampah akhir (TPA); potensi longsor pada lereng di perkampungan yang berbukit-bukit dengan lereng yang terjal; terjadinya pencemaran akibat tumpahan minyak di pantai disebabkan kegiatan industri minyak di sana; terjadinya rembesan maupun tetesan minyak di jalur pipa distribusi minyak kedalam tanah yang

mencemari lingkungan; hingga mengetahui perlapisan tanah dan batuan untuk kegiatan infrastruktur.

1.2 Geoeletromagnetik Sebagai Solusi Permasalahan Geoteknik dan Lingkungan yang Berkelanjutan

Pada banyak kasus metode geofisika dapat digunakan dalam identifikasi, lokalisir, karakterasi, delienasi, zonasi, monitoring, dan/atau penentuan *volume anomaly* yang kita cari. Metode geoeletromagnetik merupakan salah satu metode geofisika, di samping metode seismik refraksi, seismic refleksi, metode gravitasi dan metode geomagnetik, yang dapat melakukan kegiatan-kegiatan tersebut berdasarkan kontras sifat elektromagnetiknya (resistivitas, permitivitas listrik dan permeabilitas magnetik) akibat dari gelombang elektromagnetik yang menjalar pada tanah maupun batuan. Pada kasus di mana kontras nilai parameter-parameter di atas cukup besar, metode geoeletromagnetik dapat melakukan kegiatan tersebut dengan tingkat kepercayaan yang cukup besar.

1.3 Jenis, Spesifikasi, dan Kedalaman Penetrasi Metode Geoeletromagnetik

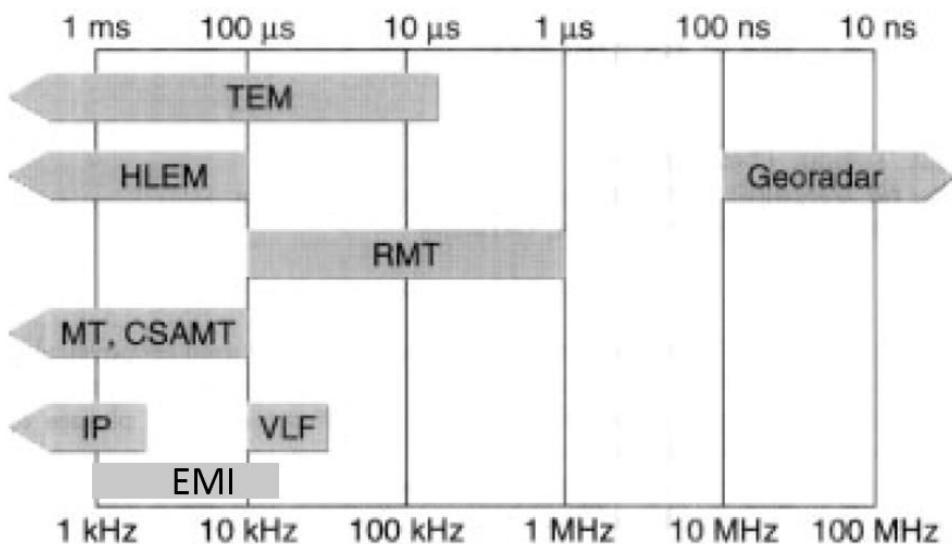
Metode geoeletromagnetik dalam praktiknya berupa teknik tertentu yang dikembangkan oleh banyak pihak, baik oleh universitas, lembaga penelitian, maupun industri. Jenis metode elektromagnetik (EM) tersebut sebagai contoh adalah: metode VLF (*Very Low Frequency*); metode Magnetotelurik (MT) dan keluarganya, yaitu *Controlled-source Audio Magnetotellurics* (CSAMT), *Audiao Magnetotellurics* (AMT), *Radio Magnetotellurics* (RMT); metode *Ground-Penetrating Radar* (GPR); dan metode *Induced Polarization* (IP).

Dihubungkan dengan sistem perekaman datanya, metode geoeletromagnetik dapat dikelompokkan pada dua jenis metode, yaitu *Frequency-Domain Electromagnetics* (FDEM) dan *Time-Domain Electromagnetics* (TDEM). FDEM merupakan sistem EM di mana perekaman datanya dilakukan pada saat medan primer dan sekunder ada, sedangkan TDEM adalah sistem EM di mana perekaman datanya dilakukan pada saat medan primer dimatikan. Termasuk dalam metode FDEM adalah metode MT dan keluarganya, sedangkan metode TDEM disebut juga metode *Transient*

Electromagnetics (TEM). Terdapat beberapa varian metode TEM, antara lain SHOTEM (*Short-Offset TEM*) dan LOTEM (*Long-Offset TEM*, dikembangkan oleh University of Cologne, Jerman), dan TEMfast (dikembangkan oleh AEMR Ltd. dari Belanda).

Kedua sistem di atas merupakan jenis metode EM dikembangkan dengan sumber berfrekuensi rendah yang berdasarkan pada persamaan difusi, di mana responsnya tidak memperlihatkan fenomena refleksi (Strack, 1992). Metode GPR merupakan metode EM yang memperlihatkan fenomena refleksi pada data perekamannya.

Kedalaman penetrasi metode-metode di atas bervariasi, tergantung pada frekuensi gelombang elektromagnetik yang dibangkitkan. Gambar di bawah memperlihatkan kedalaman penetrasi dan spesifikasi dari jenis metode elektromagnetik.



Gambar 1.1 Kedalaman penetrasi beberapa jenis sistem geoelektromagnetik (modifikasi dari Tezkan, 1988)

2 METODE GEOELEKTROMAGNETIK

Teori dasar yang menjelaskan tentang kelakuan medan-medan elektromagnetik telah mapan sejak abad yang lalu. Jika arus listrik mengalir, maka akan timbul medan magnetik di sekitarnya. Jika medan magnetik tersebut berubah terhadap waktu maka medan listrik akan terbentuk. Juga diamati bahwa fluks (arus) listrik dan fluks magnetik adalah tetap. Empat hukum fisis yang masing-masing diamati oleh orang yang berbeda ini kemudian dirumuskan oleh Maxwell pada tahun 1873 sebagai dasar untuk teori medan-medan elektromagnetik. Setiap usaha untuk menggunakan medan elektromagnetik untuk eksplorasi bumi harus didasarkan pada hukum-hukum fisis ini dan akibat matematisnya.

Dalam bab ini akan dikembangkan aspek-aspek dasar dari teori elektromagnetik untuk teknik-teknik eksplorasi yang akan didiskusikan dalam buku ini. Pengujian teori elektromagnetik akan dibatasi pada kasus-kasus yang sesuai ketika medan-medan tersebut berinteraksi dengan bumi. Gelombang elektromagnetik akan mengalami atenuasi ketika menembus material bumi, di mana sebagian energi akan diserap dan amplitudonya diperlemah. Tingkat atenuasi gelombang elektromagnetik ini secara umum jauh lebih besar daripada tingkat atenuasi gelombang seismik yang menjalar dalam medium yang sama. Untuk itu, pemrosesan data elektromagnetik harus lebih diperhatikan.

Dalam kasus di mana material bersifat konduktif, gelombang elektromagnetik yang menjalar pada medium tersebut akan mengalami atenuasi yang sangat besar. Komponen-komponen medan elektromagnetik akan berubah secara pelan terhadap waktu atau hampir tidak berubah sama sekali. Dengan spektrum gelombang elektromagnetik yang sangat lebar, sedangkan rentang frekuensi yang digunakan pada geoelektromagnetik hanya pada orde 10^{-3} Hz – 1000 MHz, pembahasan medan-medan tersebut dapat dibatasi dalam lingkup quasi-stasioner atau stasioner. Pada kasus di mana medium bersifat resistif, gelombang elektromagnetik akan menempuh jarak yang cukup jauh. Transport energi yang bersifat radiatif akan menjadi lebih penting. Pada medium yang bersifat konduktif, sifat difusi dari batuan di bumi lebih mendominasi. Pada Kedua jenis penjalaran gelombang ini masing-masing mempunyai kegunaan tertentu dalam eksplorasi geofisika.

2.1 Persamaan Maxwell dan Konstitutif

Teori untuk eksplorasi dengan menggunakan metode elektromagnetik telah dikembangkan dari hukum-hukum fisis yang menjelaskan tentang kelakuan medan-medan elektromagnetik ke dalam bumi yang bersifat konduktif dan tidak homogen. Proses perambatan gelombang elektromagnetik pada batuan diatur oleh 4 Persamaan Maxwell. Pendekatan sederhana untuk gelombang bidang dalam media homogen isotropik dari 4 persamaan Maxwell tersebut dapat diberlakukan sebagai berikut.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

di mana

\mathbf{J} : Rapat arus (A/m^2)

\mathbf{D} : Perpindahan listrik (As/m^2)

\mathbf{H} : Kuat medan magnet (A/m)

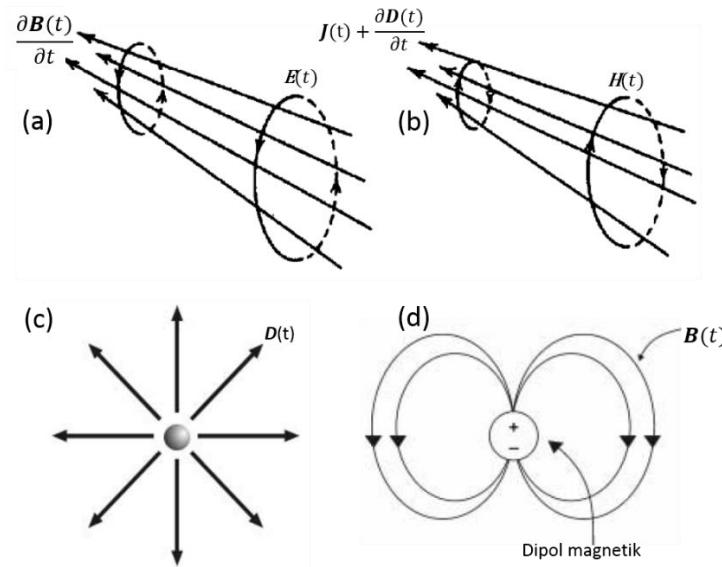
\mathbf{B} : Induksi magnet (Vs/m^2)

\mathbf{E} : Kuat medan listrik (V/m)

t : Waktu penjalaran gelombang (s)

q : Rapat muatan (As/m^3)

Persamaan Maxwell (2.1) – (2.4) di atas menggambarkan syarat-syarat sumber gelombang dari vektor kuat medan listrik dan vektor kuat medan magnet maupun hubungan antara kedua vektor tersebut. Gambar di bawah mengilustrasikan ke 4 persamaan Maxwell tersebut:



Gambar 2.1 Ilustrasi persamaan Maxwell (2.1) (a); persamaan Maxwell (2.2) (b); persamaan Maxwell (2.3) (c); dan persamaan Maxwell (2.4) (d)

Dalam penjalarannya, gelombang elektromagnetik pada persamaan-persamaan tersebut dihubungkan dengan batuan di bumi menggunakan persamaan-konstitutif:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (2.7)$$

di mana

σ : Konduktivitas listrik (Siemens/m)

ϵ_0 : Permitivitas listrik diruang vakum = $8,85 \times 10^{-12}$ (Farad/m)

ϵ_r : Permitivitas listrik relatif batuan (tanpa satuan)

μ_0 : Permeabilitas magnetik diruang vakum = $4\pi \times 10^{-7}$ (Henry/m)

μ_r : Permeabilitas magnetik relatif (tanpa satuan)

Persamaan konstitutif (2.5) hingga (2.7) memperlihatkan hubungan antara kuat medan dengan sifat material, yaitu konduktivitas, polaritas, dan kemampuan magnetisasi. Parameter-parameter material σ , ϵ_r dan μ_r di atas tergantung pada besaran-besaran fisik seperti frekuensi f , kuat medan listrik E atau kuat medan magnet H , posisi r , waktu t , temperatur T maupun tekanan P .

2.2 Persamaan Telegraf, Persamaan Gelombang, dan Persamaan Difusi

Dari persamaan-persamaan (2.1) hingga (2.7), dapat diturunkan persamaan diferensial untuk vektor kuat medan. Untuk masing-masing kuat medan listrik \mathbf{E} dan kuat medan magnet \mathbf{H} berlaku:

$$\Delta \mathbf{E} - \sigma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.8)$$

$$\Delta \mathbf{H} - \sigma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.9)$$

di mana Δ adalah operator Laplace dan $\Delta = \nabla^2$.

Persamaan (2.8) dan (2.9), yang menggambarkan medan-medan listrik dan magnetik dalam medium homogen, disebut *persamaan Telegraf* sebab persamaan tersebut memainkan peran besar pada telegrafi.

Dalam kasus di mana gelombang merambat dalam batuan yang bersifat isolator ($\sigma \approx 0$) atau disebut juga batuan resistif, persamaan-persamaan (2.8) dan (2.9) dapat ditulis menjadi sebagai berikut:

$$\Delta \mathbf{E} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.10)$$

$$\Delta \mathbf{H} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.11)$$

Persamaan-persamaan di atas disebut *persamaan-persamaan gelombang*. Persamaan-persamaan ini menggambarkan perambatan gelombang elektromagnetik dalam batuan non-konduktif.

Dalam banyak aplikasinya, medan elektromagnetik yang digunakan berubah relatif pelan terhadap waktu. Dalam kasus semacam itu suku-suku dalam persamaan Telegraf yang melibatkan turunan kedua medan-medan elektromagnetik terhadap waktunya dapat diabaikan sehingga persamaan-persamaan (2.8) dan (2.9) menjadi:

$$\Delta \mathbf{E} - \sigma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (2.12)$$

$$\Delta \mathbf{H} - \sigma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (2.13)$$

Persamaan ini sering disebut sebagai persamaan difusi sebab mempunyai bentuk yang sama seperti persamaan Fick yang menggambarkan difusi dari zat kimia. Persamaan-persamaan ini menggambarkan kelakuan difusi atau quasi-stasioner dari gelombang elektromagnetik dalam perambatannya dalam medium konduktif.

2.3 Solusi Persamaan Medan Elektromagnetik

Berikut diturunkan solusi untuk persamaan medan elektromagnetik, di mana untuk memudahkan, hanya penyelesaian persamaan untuk kuat medan listrik \mathbf{E} saja yang ditinjau. Penyelesaian persamaan diferensial (2.8) menghasilkan fungsi solusi kompleks:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-j(\omega t - \bar{k} \cdot \mathbf{r})} \quad (2.14)$$

Karena bilangan gelombang $\bar{k} = \beta + j\alpha$ itu sendiri kompleks, maka faktor redaman muncul dalam persamaan (2.14) selain faktor periodik temporal dan spatial, sehingga diperoleh:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-\alpha r} e^{-j\omega(t - \frac{\beta}{\omega} r)} \quad (2.15)$$

Dengan cara yang sama, diperoleh solusi untuk kuat medan magnetik:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{-\alpha r} e^{-j\omega(t - \frac{\beta}{\omega} r)} \quad (2.16)$$

Persamaan (2.15) dan (2.16) di atas menggambarkan gelombang bidang yang teredam yang menjalar ke arah \mathbf{r} yang positif.

2.3.1 Sifat Penjalaran Gelombang Elektromagnetik

Dari persamaan-persamaan (2.15) dan (2.16) di atas akan diperoleh 2 besaran yang menggambarkan penjalaran gelombang elektromagnetik di dalam batuan, yaitu kecepatan fasa v dan koefisien atenuasi α atau kedalaman penetrasi / *skin depth*-nya τ , di mana $\tau = \frac{1}{\alpha}$.

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\omega \sqrt{\frac{\mu_r \epsilon_r}{2} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r} \right)^2} + 1 \right\}}} \quad (2.17)$$

$$\tau = \frac{1}{\alpha} = \frac{c}{\omega \sqrt{\frac{\mu_r \epsilon_r}{2} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r} \right)^2} - 1 \right\}}} \quad (2.18)$$

Skin depth τ didefinisikan sebagai kedalaman pada mana amplitudo gelombang elektromagnetik menjadi 37% nya.

2.3.2 Sifat Elektromagnetik Batuan

Sifat elektromagnet meliputi sifat kelistrikan dan sifat kemagnetan. Yang termasuk sifat kelistrikan adalah permitivitas ϵ ($\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$) dan konduktivitas σ , sedangkan sifat kemagnetan diungkapkan oleh besaran permabilitas magnetik magnet μ ($\mu = \mu_0 \mu_r$). Konduktivitas untuk batuan yang bersifat homogen isotropis adalah kebalikan dari resistivitas ρ ($\sigma = 1/\rho$).

Gambar 2.2 menggambarkan besar nilai v dan τ sebagai fungsi dari frekuensi pada media batubara dan batu lana yang termasuk pada batuan lunak (*loose rock*). Data tersebut diperoleh melalui pengukuran laboratorium atas contoh dua batuan tersebut. Terlihat bahwa suatu batuan mempunyai kelakuan tertentu sebagai respons atas gelombang elektromagnetik yang menjalar padanya. Dengan bertambahnya derajat kejenuhan S_w , kelakuan batuan akan semakin menyimpang dari kelakuan ideal batuan berdasarkan persamaan Maxwell dengan asumsi bahwa sifat elektromagnetik batuan konstan terhadap frekuensi.

2.4 Kasus Batas

Perbandingan $\frac{\sigma}{\epsilon_r \epsilon_0 \omega}$ yang merupakan perbandingan antara arus konduksi

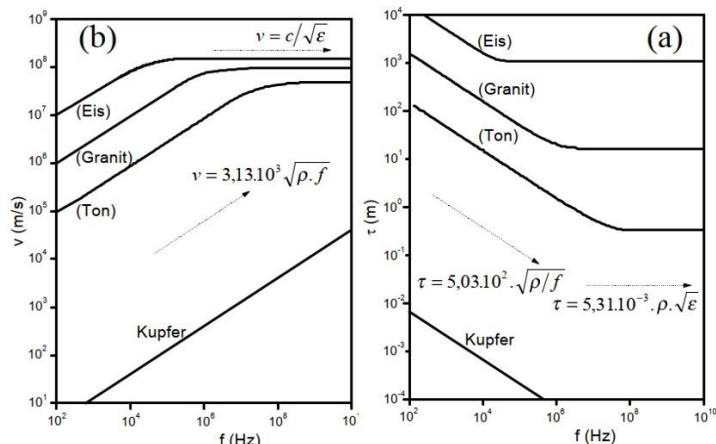
dan arus perpindahan, mempunyai pengaruh menentukan dalam persamaan (2.18) dan (2.19). Dalam kawasan frekuensi rendah (di bawah *frekuensi kritis*

($f_k = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}$)), v dan τ menunjukkan ketergantungan frekuensi yang sangat

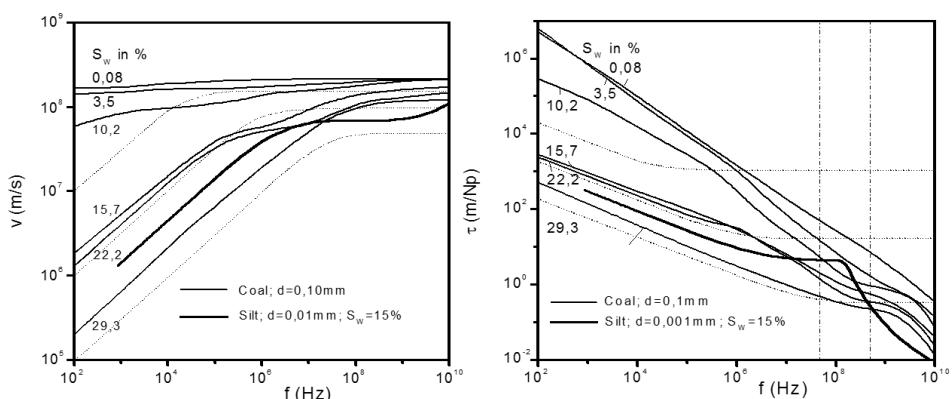
kuat. Dalam kawasan frekuensi tinggi (di atas frekuensi kritis ($f_k = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}$))

ketergantungan v dan τ terhadap frekuensi dapat diabaikan. Nilai Ketergantungan besaran fisik pada frekuensi ini secara umum dinamakan

dispersi. Gambar (2.1) menunjukkan dispersi dari kecepatan fasa ν dan kedalaman penetrasi τ untuk beberapa media geologi. Berdasarkan persamaan Maxwell yang pada awalnya memandang σ , ϵ dan μ sebagai besaran konstan, kurva dispersi dapat dilihat pada gambar (2.1) tersebut. Dalam media gelogi yang riil, anggapan ini tentu saja tidak terpenuhi sebab secara umum besaran-besaran tersebut juga tergantung pada frekuensi. Karena itu dalam Gambar 2.1 tersebut, perhitungan berdasarkan Maxwell dengan menggunakan sifat-sifat material yang konstan diletakkan dalam tanda kurung.



Gambar 2.2 Kecepatan fasa (gambar kiri) dan kedalaman penetrasi τ (gambar kanan) sebagai fungsi frekuensi untuk beberapa media dengan asumsi sifat elektromagnetik yang konstan (Forkmann & Petzold, 1989; Parnadi, 2001)



Gambar 2.3 Efek dispersi dari kecepatan rambat gelombang elektromagnetik ν (gambar kiri) dan kedalaman penetrasi τ (gambar kanan) dari batuan lunak (batubara dan lanau). Garis putus-putus adalah kurva dispersi dari ν dan τ dengan asumsi sifat elektromagnetik yang konstan (Forkmann & Petzold, 1989; Parnadi, 2001)

Hasil $\frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r}$ yang sebanding dengan rasio kontribusi arus garis dan arus perpindahan, mempunyai pengaruh yang menentukan dalam Persamaan (2.12) dan (2.13).

2.5 Refleksi dan Transmisi pada Bidang Batas

Jika suatu gelombang bidang terpolarisasikan secara linier pada suatu bidang batas antara dua media yang isotrop (gambar 2.4), maka sebagian energi gelombang akan direfleksikan dan sebagian sisanya akan ditransmisikan. Refleksi dan transmisi tersebut memenuhi persamaan-persamaan Snellius dan Fresnel (lihat Ward & Hohmann, 1987).

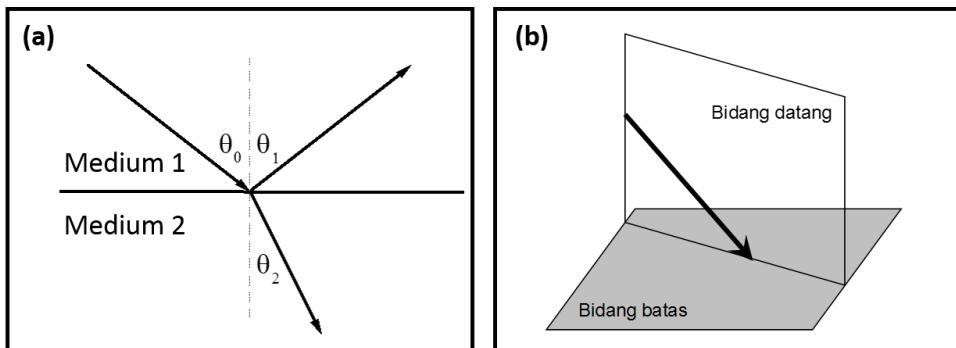
Dari hukum Snellius diturunkan hubungan sudut:

$$\sin \theta_1 = \sin \theta_0 \quad (2.19)$$

Dengan cara yang sama, diperoleh solusi untuk kuat medan magnetik:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.20)$$

Persamaan Fresnel menghubungkan amplitudo kedua vektor kuat medan. Dari sini vektor-vektor medan dapat diturunkan.



Gambar 2.4 Refleksi dan transmisi gelombang yang datang pada bidang batas (a) bidang datang yang dibentuk oleh vektor gelombang datang yang tegak lurus bidang batas (b)

Untuk kasus bahwa kuat medan listrik tegak lurus pada bidang datang (lihat gambar 2.4) berlaku:

$$E_{1,\perp} = \frac{\mu_2 n_1 \cos \theta_0 - \mu_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_0}}{\mu_2 n_1 \cos \theta_0 + \mu_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_0}} E_{0,\perp} \quad (2.21)$$

$$E_{2,\perp} = \frac{2\mu_2 n_1 \cos \theta_0}{\mu_2 n_1 \cos \theta_0 + \mu_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_0}} E_{0,\perp} \quad (2.22)$$

Koefisien Refleksi R didefinisikan sebagai perbandingan antara besar kuat medan listrik yang direfleksikan dan besar kuat medan listrik datang:

$$R_{\perp} = \frac{E_{1,\perp}}{E_{0,\perp}} = \frac{\mu_2 n_1 \cos \theta_0 - \mu_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_0}}{\mu_2 n_1 \cos \theta_0 + \mu_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_0}} \quad (2.23)$$

dan koefisien transmisi T sebagai perbandingan antara besar kuat medan listrik yang ditransmisikan dan besar kuat medan listrik datang:

$$T_{\perp} = \frac{E_{2,\perp}}{E_{0,\perp}} = \frac{2\mu_2 n_1 \cos \theta_0}{\mu_2 n_1 \cos \theta_0 + \mu_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_0}} \quad (2.24)$$

Untuk kasus di mana kuat medan listrik sejajar dengan bidang datang berlaku:

$$R_{\parallel} = \frac{\mu_2 n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_0} - \mu_1 n_2^2 \cos \theta_0}{\mu_2 n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_0} + \mu_1 n_2^2 \cos \theta_0} \quad (2.25)$$

$$T_{\parallel} = \frac{2\mu_1 n_2^2 \cos \theta_0}{\mu_2 n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_0} + \mu_1 n_2^2 \cos \theta_0} \quad (2.26)$$

Untuk dielektrik murni di mana $\sigma_1 = \sigma_2 \approx 0 \text{ S/m}$ dan diambil $\mu_{r1} = \mu_{r2} = 1$ berlaku:

$$R_{\parallel} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} \sqrt{\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1} \sin^2 \theta_0} - \epsilon_{r2} \cos \theta_0}{\sqrt{\epsilon_{r1}} \sqrt{\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1} \sin^2 \theta_0} + \epsilon_{r2} \cos \theta_0} \quad (2.27)$$

$$T_{\parallel} = \frac{2\epsilon_{r2} \cos \theta_0}{\sqrt{\epsilon_{r1}} \sqrt{\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1} \sin^2 \theta_0} + \epsilon_{r2} \cos \theta_0} \quad (2.28)$$

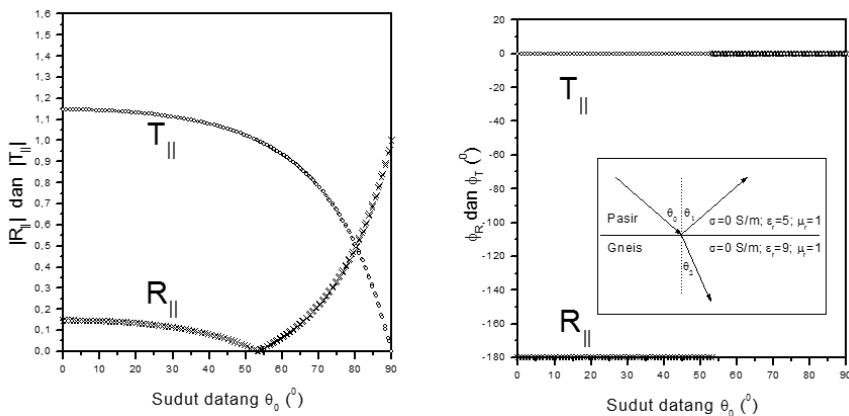
Jika gelombang refleksi tegak lurus pada gelombang transmisi, amplitudonya akan menjadi nol ($R_{\parallel} = 0$). Ini terpenuhi dengan syarat:

$$\theta_2 = 90^0 - \theta_0 \quad (2.29)$$

Sudut datang yang memenuhi persyaratan Persamaan (2.29) di atas disebut *sudut Brewster* dan dihitung melalui:

$$\tan \theta_B = \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}} \quad (2.30)$$

Gambar 2.5 memperlihatkan satu contoh koefisien refleksi R_{\parallel} dan juga koefisien transmisi T_{\parallel} pada suatu bidang batas antara pasir dan gneis dengan anggapan bahwa kedua media tersebut dielektrik murni, yang digambarkan dalam amplitudo dan fasanya.



Gambar 2.5 Amplitudo (a) dan fasa (b) dari koefisien refleksi R_{\parallel} dan koefisien transmisi T_{\parallel} pada suatu bidang batas antara pasir dan gneis

2.6 Resolusi

Pada frekuensi tinggi di mana pada umumnya sifat radiasi lebih dominan, pengetahuan tentang resolusi vertikal dan lateral sangat penting. Resolusi adalah kemampuan suatu sistem untuk membedakan dua objek yang terletak berdekatan. Untuk interval kedalaman yang minimal dapat dideteksi Δz berlaku:

$$\Delta z = \frac{v}{4\tilde{\Delta}f} \quad (2.31)$$

di mana v adalah kecepatan fasa dan $\tilde{\Delta}f$ adalah lebar pita frekuensi efektif (*effective bandwidth*).

Penentuan lebar pita frekuensi efektif dapat ditemukan pada buku-buku standard tentang pemrosesan signal.

Karena kecepatan fasa v sebagai parameter objek media geologi tertentu telah bernilai tertentu pula, maka resolusi vertikal yang lebih tinggi hanya dapat dicapai melalui peninggian nilai lebar pita frekuensi efektif. Semakin tinggi frekuensi kerja yang digunakan semakin besar lebar frekuensi absolut dan dengan demikian semakin kecil nilai Δz . Ini berarti bahwa untuk frekuensi yang lebih tinggi terdapat resolusi vertikal yang lebih tinggi.

Untuk dimensi objek arah lateral yang minimal dapat dibedakan Δx berlaku:

$$\Delta x = d_F = \sqrt{2h\lambda + \frac{\lambda^2}{4}} \quad (2.32)$$

di mana d_F , h dan λ masing-masing adalah diameter zona Fresnel pertama, kedalaman reflektor dan panjang gelombang rata-rata.

Batas resolusi lateral membesar menurut Persamaan (2.32) dengan membesarnya panjang gelombang λ dan membesarnya kedalaman reflektor.

3 METODE GEOELEKTROMAGNETIK SEBAGAI SOLUSI PERMASALAHAN GEOTEKNIK DAN LINGKUNGAN

Dalam bagian ini dibahas beberapa metode geoelektrik yang bisa dijadikan solusi dalam mengatasi permasalahan eksplorasi, geoteknik dan lingkungan.

3.1 Metode *Ground-Penetrating Radar (GPR)*

Metode *Ground-Penetrating* merupakan metode EM yang memanfaatkan gelombang refleksi yang terlihat pada data pengukuran dalam bentuk *offset* versus waktu kedatangan dan pantul gelombang EM. Pada metode GPR terdapat 4 cara pengambilan data, yaitu teknik CRP (*Continuous Refelction Profiling*), teknik CMP (*Common Mid-Point*), teknik Tomografi GPR, dan teknik GPR refraksi. Teknik CRP merupakan teknik umum digunakan dalam akuisis data di mana *transmitter* dan *receiver* digerakkan bersamaan pada arah lintasan dengan jarak T-R yang tetap. Teknik ini umum untuk mendapatkan radargram yang memperlihatkan bidang batas antar lapisan. Teknik CMP adalah teknik, di mana *transmitter* dan *receiver* masing-masing digerakkan ke arah yang berlawanan, pada titik referensi yang sama, untuk mendapatkan data distribusi kecepatan gelombang EM dari permukaan bumi hingga kebawah permukaan. Teknik Tomografi GPR digunakan menggunakan prinsip tomografi, di mana *transmitter* pada posisi tertentu memberikan gelombang EM dan *receiver* digerakkan sepanjang bidang luar objek. Kegiatan tersebut diulang dengan posisi *transmitter* yang dipindah. Teknik ini menghasilkan dugaan zona lemah atau rekah pada suatu objek yang kita tinjau. Terakhir, teknik GPR Refraksi dilakukan dengan menggerakkan *receiver* dari posisi dekat *transmitter* berangsur-angsur digerakkan menjauh dari *transmitter* yang berada pada posisi tetap. Teknik ini menghasilkan bidang tas perlapisan yang mirip dengan teknik seismik refraksi.

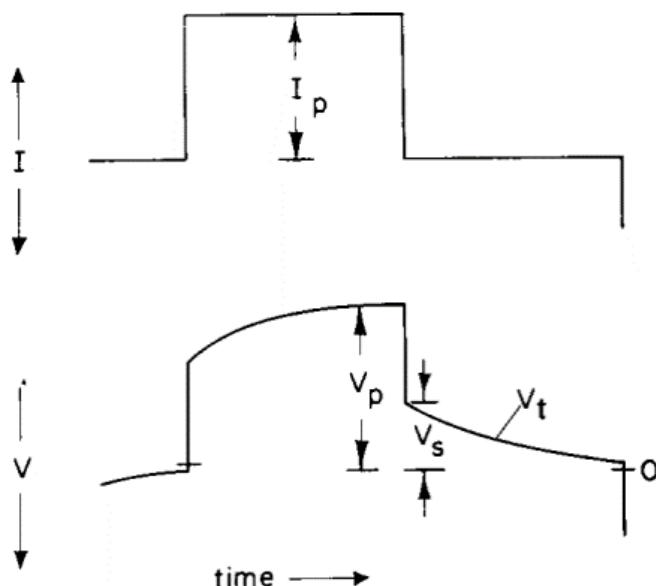
3.2 Metode *Electromagnetic Induction (EMI)*

Metode *Electromagnetic Induction (EMI)* ini merupakan metode EM berbasis induksi, yang pada kedalaman dangkal memiliki nilai Bilangan Induksi $B < 1$. Dalam praktik sehari-hari, kami menggunakan peralatan sistem EMI yang disebut EM38-MK2 yang tersedia di laboratorium Geofisika Rekayasa dan

Lingkungan FTTM ITB. Secara umum metode ini termasuk kedalam teknik Slingram menggunakan 2 coil yang terletak sejajar.

3.3 Metode *Induced Polarization* (IP)

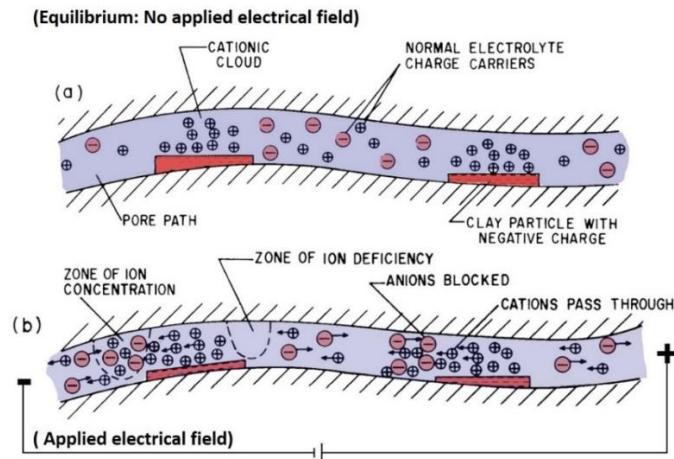
Metode *induced polarization*, disingkat metode IP, merupakan metode EM di mana arus listrik searah yang diinjeksikan di bumi akan mengalami penyimpanan energi sebagian ketika arus dimatikan. Berangsur-angsur, energi dilepas, potensialnya meluruh dengan berjalannya waktu (Gambar 3.1). Dengan keadaan tersebut, tergantung pada tingkat penyimpanan energi listrik yang dilakukan oleh tanah dan batuan, maka jenis tanah atau batuan tersebut dapat ditentukan dari data pengukuran potensialnya.



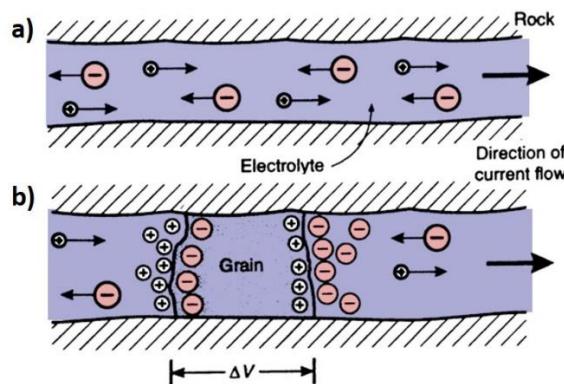
Gambar 3.1 Kurva arus yang diberikan (atas) dan kurva potensial (bawah) sebagai fungsi waktu pada metode IP. Ketika arus I_p dimatikan masih terdapat potensial V_s . yang berangsur-angsur meluruh dengan waktu.

Gambar 3.2 dan 3.3 mengilustrasikan efek IP yang terjadi pada tanah dan batuan. Gambar 3.2 (a) menggambarkan sebaran awan ion + dan ion - pada ruang pori yang mengandung partikel lempung yang bergerak bebas pada saat medan listrik diterapkan. Ketika medan listrik diterapkan, awan ion akan bergerak, di mana masing-masing ion akan bergerak berlawanan. Pada keadaan di mana terdapat butir mineral yang menghambat pori-pori, ketika arus listrik diterapkan, terjadi pengkutuban muatan sedemikina rupa

sehingga terjadi beda potensial pada permukaan mineral tersebut (Gambar 3.2b).



Gambar 3.2 Membrane polarization: (a) ketika medan listrik belum diterapkan, dan ketika medan listrik diterapkan (b)



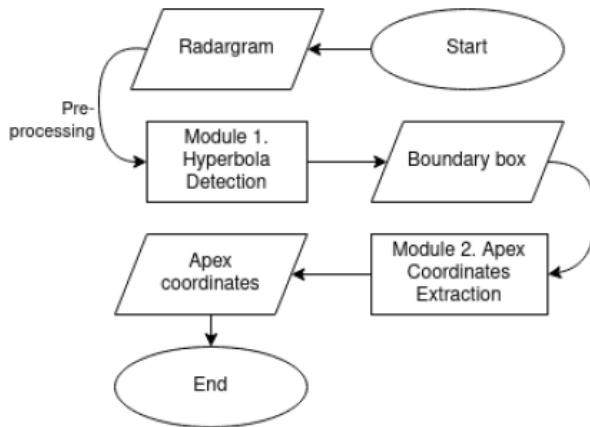
Gambar 3.3 Kondisi pada konduksi elektrolitik di mana efek polarisasi terimbas IP tidak terjadi (a), dan kondisi ketika arus listrik diterapkan (b)

4 SOLUSI PERMASALAHAN GEOTEKNIK

Metode geoelektronik telah banyak diterapkan dan dikembangkan lebih lanjut untuk mengatasi permasalahan geoteknik antara lain kebocoran dinding bendungan air yang menggunakan beton tidak bertulang, potensi longsor lereng dipinggir jalan tol, penentuan lokasi dan kedalaman kerusakan tanggul laut, hingga penentuan lokasi dan kedalaman pipa jaringan gas dan air pada area kompleks pabrik. Berikut penulis uraikan beberapa permasalahan dan solusinya pada beberapa kasus yang penulis lakukan.

4.1 Deteksi Otomatis Lokasi dan Kedalaman Pipa Terpendam Menggunakan Teknik Convolutional Neural Network

Benda-benda berbentuk silinder yang terpendam di dalam tanah akan memperlihatkan pola refleksi berbentuk hiperbola pada *radargram*. Radargram adalah tampilan hasil pengukuran GPR yang memperlihatkan jarak horizontal dan waktu tempuh gelombang refleksi atau kedalaman dalam arah vertikal. Bentuk dari refleksi hiperbolik bergantung pada kedalaman, material dari objek yang terkubur, dan material di sekitarnya. Dalam banyak kasus, mendeteksi objek silinder yang terkubur adalah tugas yang cukup memakan banyak waktu, sehingga dapat membatasi prosedur interpretasi lanjutan. Penulis dan tim telah mengembangkan teknik interpretasi GPR dengan menggabungkan metode *convolutional neural network* (CNN) dan teknik pemrosesan gambar (Daffa & Parnadi, 2022). Teknik yang kami kembangkan ini terdiri dari tiga langkah. Langkah pertama adalah *pre-processing*, yang kemudian diikuti dengan konversi data ke format raster. Pada langkah kedua, kami menggunakan jaringan *Faster-RCNN* untuk mengekstraksi segmen refleksi hiperbolik sebagai satu set potongan gambar dengan batas persegi panjang. Jaringan saraf (*Neural Network*) dilatih menggunakan data sintetik yang disimulasikan oleh perangkat lunak *open source* gprMax. Langkah ketiga adalah melokalisasi koordinat puncak refleksi hiperbolik dari segmen yang diekstraksi menggunakan algoritma pencarian koordinat pada gambar. Dengan menggunakan tiga langkah ini, pendekripsi objek silinder yang terpendam dalam tanah dari data GPR dapat diotomatisasi dengan waktu yang minimal. Teknik ini kemudian diaplikasikan pada data riil. Gambar 4.1 memperlihatkan kerangka kerja dalam penyelesaian masalah tersebut.



Gambar 4.1 Bagan alir kerangka kerja dalam kerangka kerja penentuan deteksi hiperbola dan ekstraksi koordinat puncak dari pipa yang terpendam menggunakan teknik CNN

Kerangka ini mengambil radargram sebagai masukan berupa gambar raster. Kerangka kerja ini terdiri dari modul deteksi hiperbola dan modul ekstraksi puncak. Penulis menggunakan jaringan saraf konvolusional untuk deteksi objek pada modul deteksi hiperbola. Jaringan yang digunakan adalah *Faster Regional Convolutional Neural Network* (Faster R-CNN) terlatih dari *Tensorflow Object Detection API*. Setelah kotak batas yang berisi hiperbola diperoleh oleh modul deteksi hiperbola, maka koordinat puncak hiperbola ditentukan dengan menganalisis gambar di dalam kotak batas melalui algoritma yang dikembangkan oleh penelitian Ristic dkk. (2017). Kerangka kerja ini diimplementasikan dalam bahasa pemrograman Python.

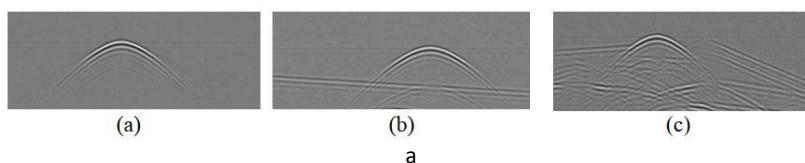
Data sintetik dibagi menjadi tiga kelompok berdasarkan kompleksitas model. Semua dataset (kumpulan data) dihasilkan secara acak. Dataset 1 merupakan data radargram dengan kompleksitas rendah dan tanah homogen. Dataset 2 merupakan data radargram dengan kompleksitas sedang, dapat bersifat homogen atau memiliki dua lapisan tanah. Dataset 3 merupakan data radargram dengan kompleksitas tinggi, dua lapisan tanah, dan banyak *noise*. Jumlah total radargram sintetis untuk pelatihan Faster R-CNN adalah 72, dan 6 untuk pengujian. Spesifikasi masing-masing dataset dijelaskan pada Tabel 4.1.

Data sintetik diperoleh melalui simulasi radargram menggunakan *software gprMax* (Warren, dkk., 2016). Simulasi dilakukan dengan menggunakan skenario model bawah permukaan yang berbeda. Sasaran simulasi adalah benda-benda berbentuk silinder dengan radius, kondisi bawah permukaan,

dan sifat dielektrik yang berbeda-beda. Kami menambahkan beberapa *noise* sebagai objek berbentuk kotak untuk membedakan noise dari objek silinder. Kami menggunakan frekuensi antena 200 MHz. Sumber wavelet yang digunakan adalah Berlage Wavelet (Aldridge, 1990). Model didiskritisasi menggunakan nilai 0,024. Sebanyak 72 radargram sintetik disimulasikan sebagai kumpulan data pelatihan dan pengujian. Gambar 4.2 menunjukkan contoh data sintetis dalam 3 dataset yang berbeda.

Tabel 4.1 Spesifikasi dataset untuk simulasi

Unsur	Dataset 1	Dataset 2	Dataset 3
panjang	16 meter	16 meter	16 meter
tinggi	6 meter	6 meter	6 meter
N silinder	1 - 4	1 - 4	1 - 4
noise	rendah	sedang	tinggi
N lapisan tanah	1	1 - 2	2
N radargram test	2	2	2
N radargram train	24	24	24



Gambar 4.2 Radargram yang disimulasikan menggunakan simulated by software gprMax:(a) Dataset 1, (b) Dataset 2, (c) Dataset 3 (Dewantara & Parnadi, 2022)

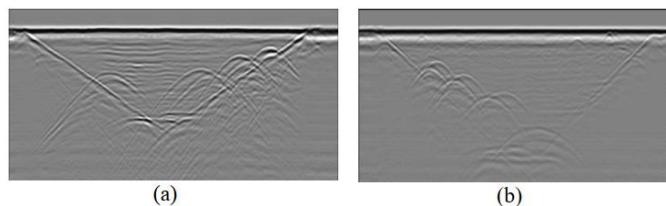
Satu simulasi radargram dengan luas area pengamatan 16x6 meter memerlukan 666 iterasi dengan 1713 langkah. Komputer yang digunakan dalam penelitian ini dapat menjalankan simulasi dengan kecepatan 4100-4200 langkah/detik. Jadi dibutuhkan waktu sekitar 12 menit untuk menyimulasikan satu radargram dengan lebar 16x6 meter. Spesifikasi komputer yang digunakan adalah sebagai berikut (Tabel 4.2).

Data lapangan yang digunakan berasal dari dataset lokasi uji geofisika IFSTTAR (Derobert, dkk., 2018). Dari data ini, 2 radargram (radargram lapangan 1 dan radargram lapangan 2) dengan frekuensi 200MHz digunakan untuk menguji dan mengevaluasi kerangka kerja yang diusulkan. Bentuk hiperbolik pada radargram lapangan direkam dari objek silinder yang terkubur dengan material yang berbeda. Sebagian besar berbentuk baik, tetapi beberapa berbentuk buruk karena ketidakhomogenan tanah dan

gangguan kebisingan di bawah permukaan. Gambar 4.3 menunjukkan radargram riil yang digunakan.

Tabel 4.2 Spesifikasi komputer yang digunakan untuk simulasi

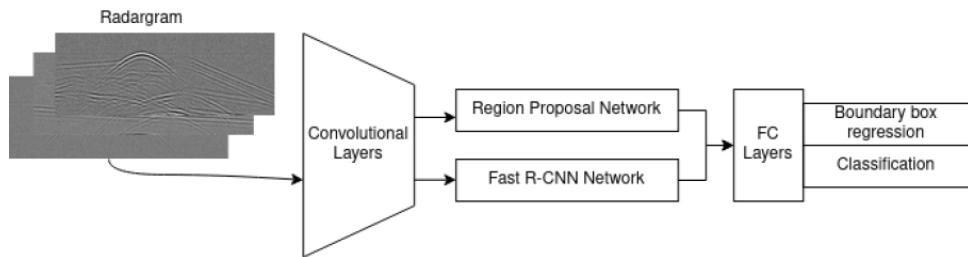
Unsur	Spesifikasi
Operating system	Ubuntu server 21.04 LTS
Processor	Intel (R) Core™ i7-9700F CPU @3.00GHz
Graphic card	GeForce RTX 2060 SUPER 8 GHz
Memory	2x8 GB DDR – 2667 MHz



Gambar 4.3 Radargram lapangan dari lokasi uji IFSTTAR: (a) radargram lapangan 1. (b) radargram lapangan 2

Tensorflow Object Detection API digunakan untuk mengimplementasikan CNN dalam modul deteksi hiperbola. Pustaka ini terdiri dari berbagai modul untuk membangun arsitektur deteksi objek, melatih jaringan saraf, dan menyediakan berbagai model pembelajaran mesin; di antaranya adalah Faster R-CNN, yang digunakan dalam studi ini.

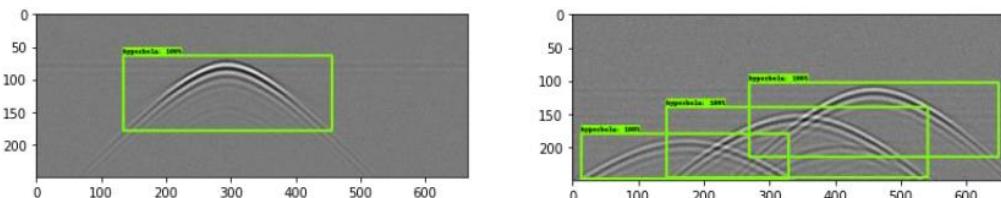
Model Faster R-CNN telah melalui tahap prapelatihan sebagai bobot awal dalam model. Model yang telah melalui tahap pra-pelatihan dapat mengadaptasi data baru dengan lebih cepat karena model telah belajar mengekstraksi fitur-fitur penting dalam input gambar sebelumnya pada pelatihan sebelumnya.



Gambar 4.4 Algoritma Faster R-CNN

Convolutional Neural Network (CNN) merupakan salah satu model *deep learning* yang sering digunakan untuk klasifikasi citra. Dalam penelitian ini, CNN digunakan untuk mengklasifikasi apakah *boundary box* (sebagai citra) merupakan hiperbola atau bukan. Untuk pendekatan objek, ada beberapa pendekatan yang digunakan. Salah satunya adalah dengan menggunakan *search window* melalui citra dan mengklasifikasi *window* tersebut menggunakan CNN. Metode ini sangat lambat jika dibandingkan dengan Faster R-CNN. Faster R-CNN merupakan versi pengembangan CNN untuk pendekatan objek. Faster R-CNN menggunakan jaringannya sendiri yang disebut *Region Proposal Network* (RPN). RPN mengambil fitur konvolusional sebagai input dan mengekstraksi region yang diusulkan untuk *Fully Connected Network*. Dalam metode ini, pencarian region yang diusulkan dan proses konvolusional dapat dilakukan secara bersamaan. Untuk lebih jelasnya mengenai *framework* Faster-RCNN, pembaca dapat merujuk ke [11]. Untuk mengatasi keterbatasan data, maka dibuatlah citra radargram baru berdasarkan radargram hasil simulasi. Kami menggunakan teknik pemrosesan citra seperti mirroring, shrink on horizontal, dan kombinasi keduanya. Setiap citra radargram dikalikan 4. Terakhir, pelatihan R-CNN yang lebih cepat dilakukan dengan 288 input citra pelatihan. Iterasi dilakukan sebanyak 15000 langkah.

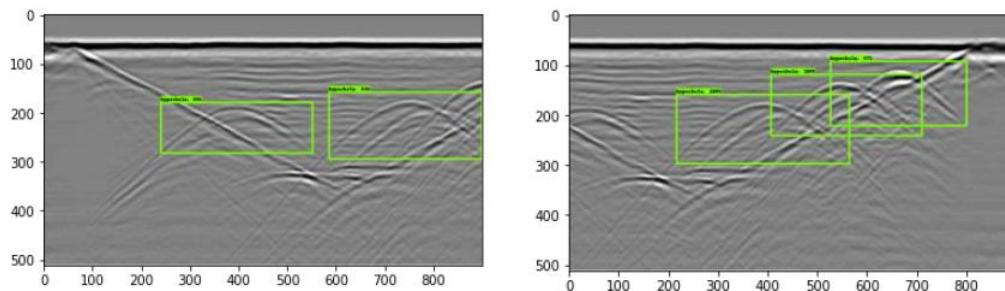
Kerangka kerja deteksi objek yang diusulkan oleh penulis diuji pada 6 radargram simulasi yang mewakili 3 set data berbeda dan 2 radargram lapangan.



Gambar 4.5 Hasil deteksi objek hiperbola pada dataset 1 sintetik.

Data field radargram memiliki resolusi yang lebih tinggi daripada *input* model deteksi objek kami. Jadi kami membagi satu gambar radargram menjadi 2 subgambar. Hasil dari *field* radargram 1 memuaskan. Hampir semua hiperbola dikenali sebagai satu set kotak batas. Tetapi untuk *field* radargram 2, modul hanya mengenali 1 hiperbola dari total 4 hiperbola. Seperti yang terlihat dari gambar, ada perbedaan antara *field* radargram 1 dan

field radargram 2. Untuk *field* radargram 1, hiperbola memiliki amplitudo sinyal yang lebih tinggi daripada hiperbola di *field* radargram 2. Modul deteksi objek tidak mengatasi hiperbola dengan amplitudo sinyal rendah atau intensitas rendah. Kinerja pada modul deteksi objek hiperbola sangat bergantung pada set data pelatihan. Semua set data pelatihan berasal dari radargram yang disimulasikan. Jadi, kami tidak mengharapkan modul ini memiliki akurasi tinggi pada data lapangan untuk pengujian. Tetapi, untuk *field* radargram 1, hiperbola dikenali dengan baik, bahkan semua set pelatihan adalah radargram yang disimulasikan. Hal ini mungkin terjadi karena radargram simulasi kami dapat mewakili radargram lapangan 1.



Gambar 4.6 Hasil deteksi objek hiperbola pada data lapangan 1. Terlihat bahwa sebagian besar objek hiperbola dapat dideteksi lokasi dan kedalaman puncaknya.

Kerangka kerja kami diuji secara kualitatif pada radargram simulasi dan radargram lapangan nyata. Kerangka kerja menunjukkan hasil yang baik untuk mendekripsi hiperbola dalam radargram simulasi dengan skor klasifikasi yang tinggi. Untuk radargram lapangan 1, kerangka kerja telah mendekripsi dengan benar semua 4 hiperbola dan memperkirakan dengan benar 3 koordinat puncak dari total 4 hiperbola. Untuk radargram lapangan 2, kerangka kerja mendekripsi dengan benar 1 dari 4 hiperbola. Namun kerangka kerja tidak mampu memperkirakan semua 4 koordinat puncak. Kerangka kerja kami, terutama pada modul deteksi objek hiperbola, sangat bergantung pada set data pelatihan. Pekerjaan ini dilakukan dengan hanya menggunakan pelatihan kerangka kerja pada data radargram simulasi. Jadi kami tidak berharap kerangka kerja memiliki akurasi tinggi pada data radargram lapangan. Untuk pengembangan kerangka kerja lebih lanjut, perlu disertakan data radargram lapangan untuk melatih kerangka kerja sehingga hasil bisa lebih akurat.

5 SOLUSI PERMASALAHAN LINGKUNGAN

Banyak permasalahan lingkungan dapat dipecahkan oleh metode geofisika, khususnya dalam monitoring perubahan parameter tanah/batuan dalam waktu tertentu. Dalam bagian ini akan diuraikan tentang 2 solusi geofisika terhadap permasalahan lingkungan. Masalah pertama adalah penentuan kualitas tanah pertanian dari eks TPA (Tempat Pembuangan Akhir Sampah) di Leuwi Gajah. Masalah ke dua adalah proses stabilisasi tanah yang ramah lingkungan dengan menggunakan *bioagent*.

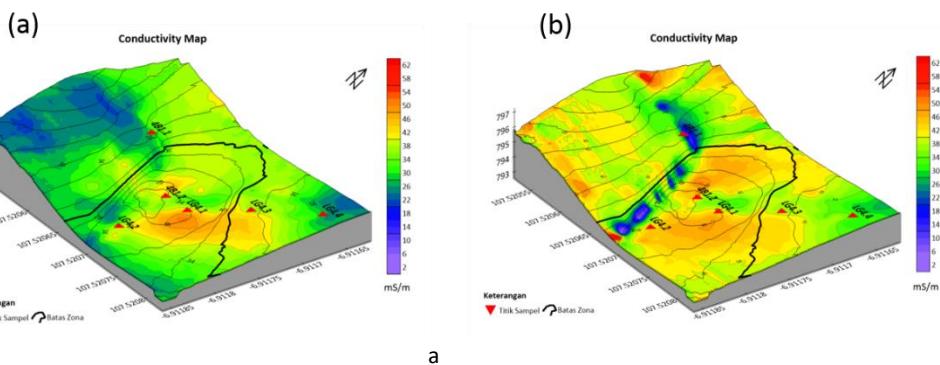
5.1 Penentuan Kesuburan Tanah Pertanian

Kesuburan tanah adalah kemampuan tanah untuk menyediakan unsur hara bagi tanaman dalam jumlah yang cukup dan berimbang untuk pertumbuhan dan hasil tanaman dengan memperhitungkan komponen fisik, kimia, dan biologi tanah (Taisa, dkk., 2021). Tanaman membutuhkan banyak nutrisi dari unsur hara sehingga proporsinya harus seimbang. Jika suatu jenis unsur hara mendominasi dalam tanah, jenis unsur hara lain akan kurang tersedia (Purba, dkk., 2021). Kondisi tanah dapat memengaruhi produktivitas tanaman karena beberapa tanaman tidak tumbuh secara merata di lahan yang sama yang menyebabkan ketidakseimbangan dalam hasil pertanian. Tanah subur merupakan faktor penting dalam pertanian. Identifikasi kandungan tanah sangat membantu dalam menentukan metode pengolahan tanah dan pengolahan yang tepat akan meningkatkan hasil pertanian.

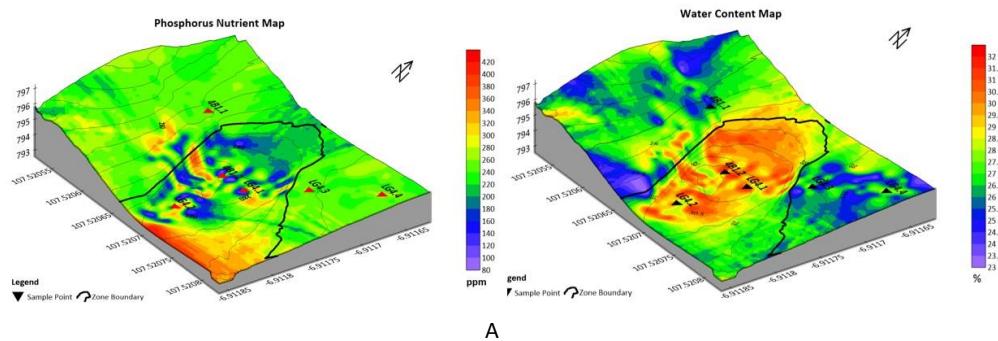
Analisis menyeluruh diperlukan untuk menentukan kesuburan tanah di lahan bekas Tempat Pembuangan Akhir (TPA) karena limbah dan polutan sering mengurangi kesuburan tanah. Namun, penelitian parameter tanah secara konvensional cenderung lama dan berpotensi merusak lahan pertanian. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk melihat hubungan antara data resistivitas *soil resistivity box* dengan sifat kimia fisik tanah di bekas TPA Leuwigajah. Integrasi data geofisika dengan sifat kimia fisik tanah diharapkan memberikan gambaran tentang kondisi kesuburan tanah.

Terdapat berbagai metode geofisika yang dapat digunakan untuk identifikasi bawah permukaan lahan pertanian. Penelitian ini dilakukan pengukuran resistivitas tanah pada lahan pertanian bekas TPA Leuwi Gajah dengan metode *DC Resistivity* dan induksi elektromagnetik (*Electromagnetic*

Induction). Metode ini memanfaatkan sifat kelistrikan bahan, dalam hal ini batuan atau tanah serta dilakukan pengujian sifat kesuburan tanah dan pengujian resistivitas dengan *soil resistivity box*. Selanjutnya dilihat nilai korelasi antara resistivitas tanah dan sifat kimia fisik tanah. Diharapkan pengukuran dengan metode geofisika dapat digunakan sebagai langkah awal untuk mengidentifikasi lahan, baik sebelum maupun setelah pengolahan. Gambar 5.1 di bawah memperlihatkan peta distribusi konduktivitas pada daerah uji di eks TPA Leuwi Gajah yang pada tahun 2005 mengalami geohazard di mana gunungan sampah runtuh karena terjadinya ledakan akibat akumulasi gas methan. Geohazard tersebut menyebabkan terjadinya korban, baik harta maupun jiwa.



Gambar 5.1 Distribusi konduktivitas pada lapangan uji di Eks TPA Leuwi Gajah menggunakan teknik EMI, geolistrik, dan pengukuran parameter sampel di lapangan.



Gambar 5.2 Peta kandungan fosfor (kiri) dan kadar air (kanan) dari lokasi uji pada lokasi eks Tempat Pembuangan Akhir.

Gambar-gambar berikut memperlihatkan peta yang dihasilkan dari korelasi positif antara konduktivitas yang diukur dengan alat EM induction dengan kadar air, dan kandungan fosfor pada beberapa titik sampel. Terlihat bahwa distribusi kadar air dan kandungan fosfor yang dihasilkan hanya

tergantung pada dua zona didaerah studi, yaitu zona yang datardengan sudut kemiringan lahan relatif horizontal dan zona miring dengan sudut kemiringan sama atau lebih besar dari 7°.

5.2 Monitoring Proses *Microbial-Induced Calcite Precipitation* (MICP) pada Proses Stabilisasi Tanah

Biosementasi adalah cabang baru rekayasa geoteknik yang berkaitan dengan penerapan aktivitas metabolisme mikrobiologi untuk meningkatkan sifat rekayasa tanah. Salah satu metode yang umum digunakan adalah *microbiologically induced calcite precipitation* (MICP). Menurut Saneiyan (2019) metode ini merupakan metode stabilisasi tanah dengan merangsang mikroba tanah dan terjadi secara alami dalam sistem tanah, dan metode ini juga memanfaatkan sistem metabolisme bakteri untuk membentuk kalsit (presipitasi CaCO_3) yang mengikat partikel tanah yang akhirnya menyebabkan peningkatan kekuatan dan kekakuan pada tanah.

Bakteri yang dapat digunakan merupakan bakteri ureolitik yang memiliki karakteristik *aerobic*, yaitu membutuhkan oksigen untuk proses respirasi, dan tumbuh. Metode ini memiliki prinsip metabolisme bakteri menurut reaksi biokimia sebagai berikut:



Larutan urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) akan terhidrolisis dengan bantuan katalisator enzim urease yang dihasilkan oleh bakteri ureolitik dan menghasilkan ion ammonium serta karbonat. Jika ion karbonat (CO_3^{2-}) bertemu ion Ca^{2+} yang berasal dari CaCl_2 maka presipitasi kalsit akan terjadi dan membentuk CaCO_3 . Untuk mempertahankan bakteri agar terus aktif dan tumbuh, diperlukan nutrisi berupa karbon. Sumber karbon yang dapat digunakan adalah larutan sugar molase.



a

Gambar 5.3 Proses persiapan sampel yang ditreatment dengan bioagent

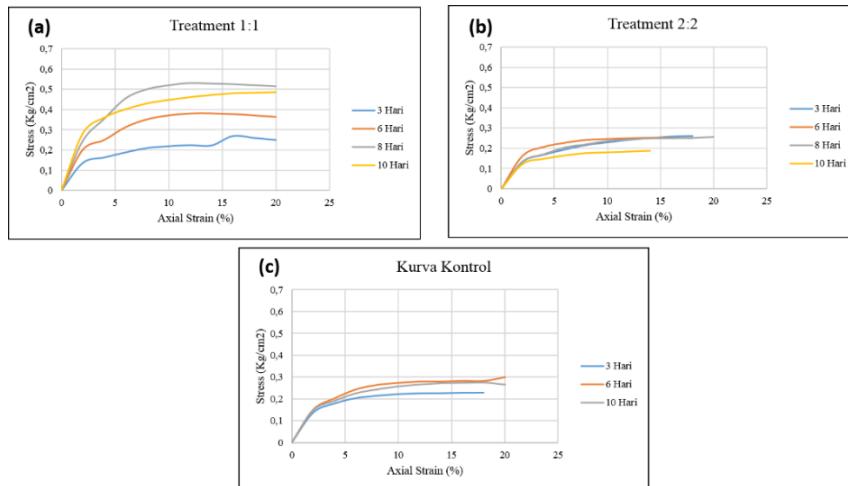
Tabel 5.1 Kebutuhan bahan untuk uji di laboratorium dan di lapangan uji

Bahan	Kebutuhan uji laboratorium			Kebutuhan uji lapangan		
	Perlakuan 1 : 1	Perlakuan 2 : 2	Kontrol	Perlakuan 1 : 1	Perlakuan 2 : 2	Kontrol
CaCl ₂	8 g	16 g	0 g	400 g		-
Urea	8 g	16 g	0 g	400 g		-
Tanah	800 g	800 g	800 g	Tersedia sesuai kebutuhan		
Aquadest	236,5 ml	236,5 ml	236,5 ml	11,825 l		-
Bakteri	4 ml	4 ml	0 ml	200 ml		-
Sugar molase	4	4	0 g	200 g		-

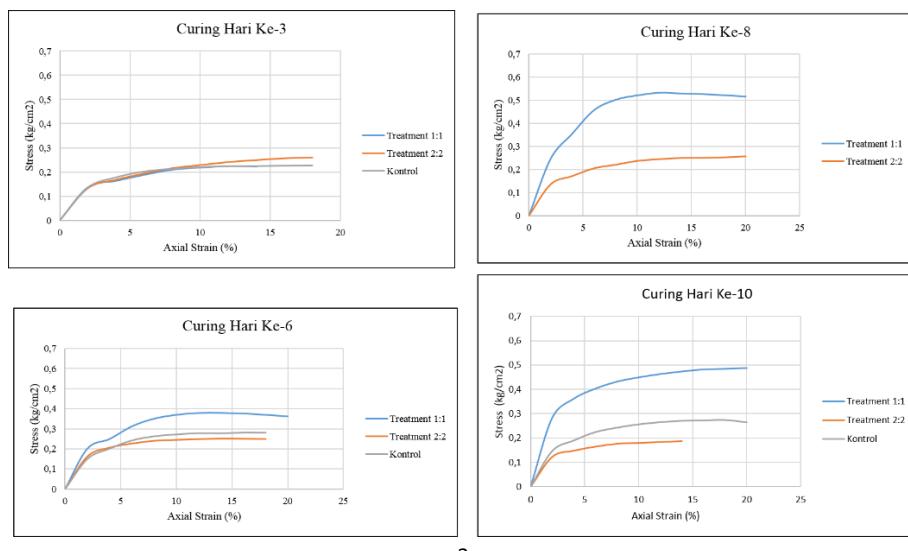
Tabel 5.1 Treatment untuk skala laboratorium

Treatment	3 hari hingga 10 hari
kontrol	170 g tanah + 50,26 ml aquadest
Treatment 1:1 urea + CaCl ₂	170 g tanah + 50,26 ml aquadest + 1,7 g CaCl ₂ + 1,7 g urea
Treatment 2:2 urea + CaCl ₂	170 g tanah + 50,26 ml aquadest + 3,4 g CaCl ₂ + 3,4 g urea

Gambar-gambar di bawah memperlihatkan kekuatan tanah yang di *treatment* menggunakan *bioagent*, di mana semakin lama semakin kuat tanah tersebut dan mencapai maksimum setelah bakteri tidak bekerja lagi.

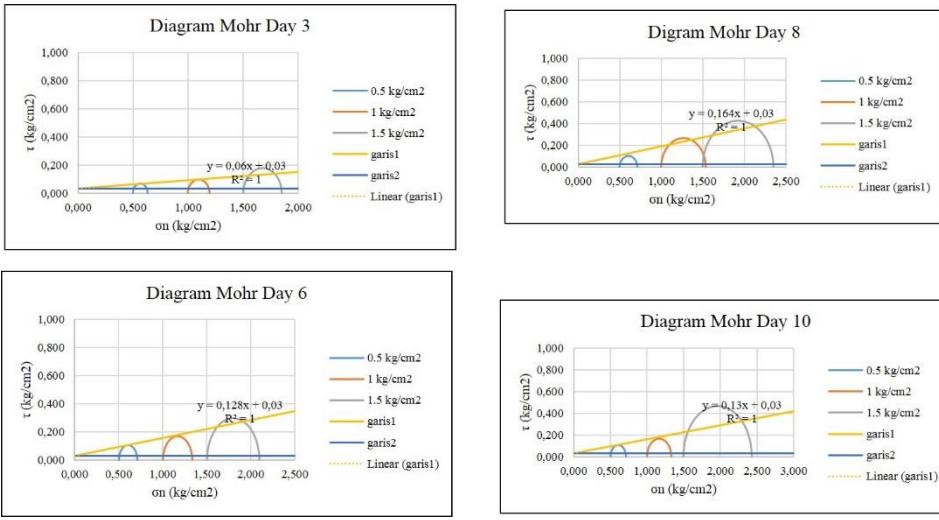


Gambar 5.4 Perubahan kekuatan tanah yang diberi perlakuan *bioagent*, dalam bentuk tegangan vs. regangan pada 2 jenis perlakuan yang berbeda.

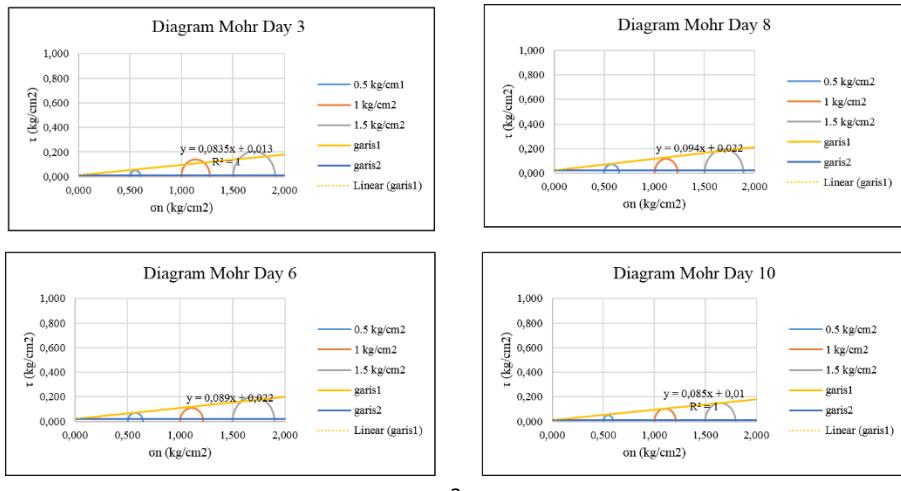


Gambar 5.5 Kurva tegangan regangan tanah yang diberi perlakuan *bioagent* dibandingkan dengan tanah yang tidak diberi perlakuan sebagai kontrol.

Gambar 5.6. menunjukkan diagram Mohr kekuatan tanah sebagai fungsi waktu.

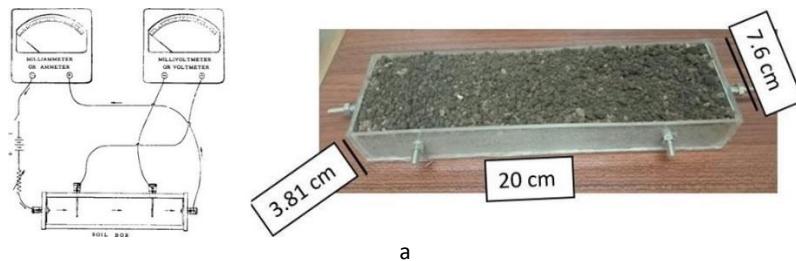


Gambar 5.6 Diagram Mohr kekuatan tanah sebagai fungsi waktu pada tanah dengan *treatment* 1:1



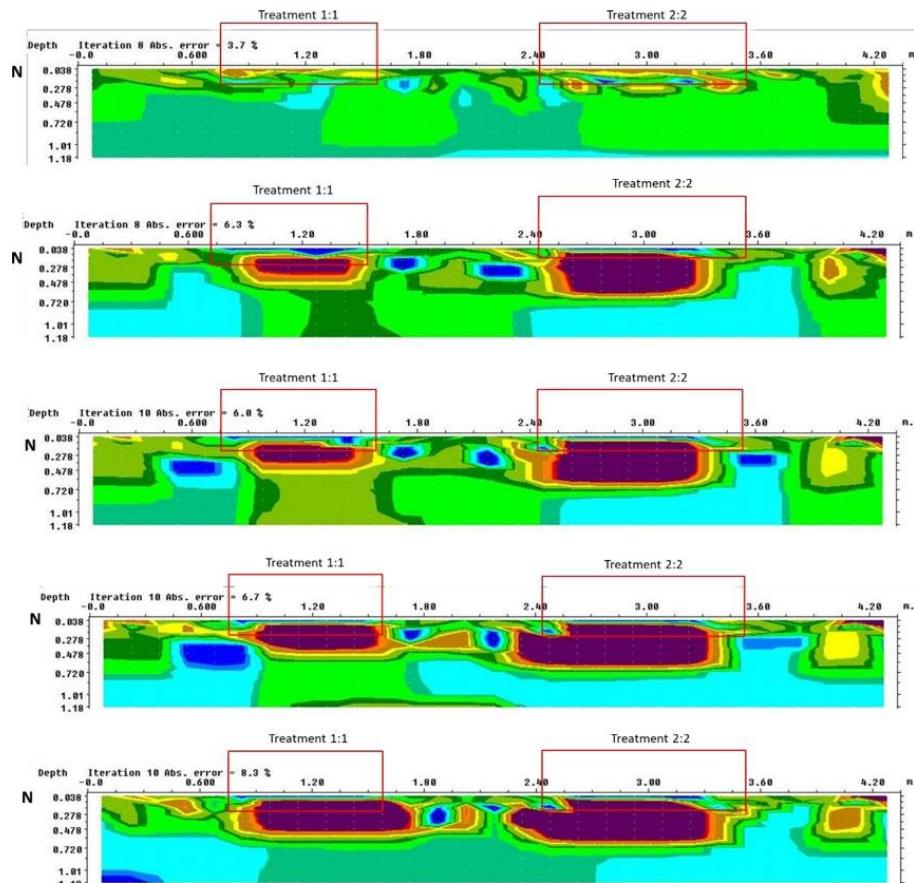
Gambar 5.7 Diagram Mohr kekuatan batuan sebagai fungsi waktu pada tanah dengan *treatment* 2:2

Gambar 5.8 memperlihatkan peralatan yang digunakan untuk pengukuran nilai resistivitas tanah. Pengukuran nilai resistivitas dilakukan berdasarkan standard pengukuran ASTM. Ukuran alat pemegang sampel tanah seperti pada Gambar 5.9 sesuai dengan alat yang tersedia di pasaran yang dijual secara komersial.



Gambar 5.8 Sistem peralatan untuk mengukur nilai resistivitas tanah pada *sample box*

Gambar 5.9 menunjukkan perubahan kekuatan tanah yang dimonitor menggunakan teknik IP. Dari pengamatan di lapangan uji di depan gedung BSC B dapat disimpulkan bahwa perubahan kekuatan tanah meningkat seiring dengan lamanya waktu perlakuan, di mana bakteri yang digunakan masih bisa berfungsi dengan tersedianya CaCl_2 yang mencukupi.



Gambar 5.9 Penampang resistivitas dari pengukuran IP yang memperlihatkan perubahan nilai yang semakin tinggi dengan berjalannya waktu

6 TANTANGAN DAN PELUANG MASA DEPAN METODE GEOELEKTROMAGNETIK SEBAGAI SOLUSI PERMASALAHAN GEOTEKNIK DAN LINGKUNGAN

Metode geoelektrik punya peluang yang bagus, terutama dalam mengidentifikasi maupun memonitor proses dalam permasalahan eksplorasi, geoteknik dan lingkungan yang terjadi.

Dengan keberhasilan penelitian yang penulis lakukan menggunakan metode geoelektrik, berikut beberapa kegiatan yang akan penulis jalani dengan prioritas mulai tahun 2025 mendatang:

1. Melakukan pencarian jenis bakteri yang paling unggul dalam membantu memperkuat kekuatan tanah yang *di-treatment* dengan *bioagent* dan mencari tumbuhan yang secara komposit akan meningkatkan kekuatan tanah lebih cepat. Metode geoelektrik akan digunakan dalam memonitor perubahan peningkatan kekuatan tanah. Ini merupakan pengembangan geoelektrik ke arah *ecological engineering*.
2. Mengembangkan program komputer dalam perhitungan kestabilan lereng tanah menggunakan salah satu metode komputasi dengan skema *Finite Difference Method* (*orthogonal* atau *non-orthogonal fitted*) yang digabungkan dengan perhitungan geolistrik IP menggunakan skema yang sama sekaligus.
3. Mengaplikasikan dan mengembangkan salah satu jenis metode elektromagnetik (GPR atau geolistrik arus searah) untuk pemetaan sifat fisik/biologi/kimia lainnya selain pH, kadar air maupun kandungan fosfor untuk kegiatan pertanian.

7 Penutup

Buku orasi ilmiah *Solusi Berkelanjutan terhadap Permasalahan Eksplorasi, Geoteknik, dan Lingkungan Menggunakan Metode Geoeletromagnetik* menawarkan refleksi mendalam tentang pentingnya inovasi teknologi eksplorasi geofisika khususnya teknologi eksplorasi Geomagnetik dalam menghadapi tantangan aplikasi dan pengembangannya untuk mengatasi permasalahan eksplorasi, geoteknik, dan lingkungan yang semakin kompleks.

Metode Geoeletromagnetik berbasis pada persamaan Maxwell yang menjelaskan hubungan antara kuat medan listrik dan kuat medan magnet dan persamaan konstitutif yang menjelaskan tentang interaksi kuat medan listrik dan kuat medan magnet dengan material tanah dan batuan di bumi. Metode ini memanfaatkan sifat penjalaran gelombangnya dalam bentuk kecepatan dan tingkat peredaman gelombangnya serta sifat fisik medium dalam memberikan respons terhadap gelombang yang melaluinya.

Aplikasinya yang sangat luas dalam memecahkan permasalahan eksplorasi, geoteknik, dan lingkungan yang semakin kompleks membuat metode geoeletromagnetik ini mempunyai potensi yang cerah untuk diaplikasikan dan dikembangkan lebih lanjut dalam membantu tercapainya masyarakat yang sejahtera.

Inovasi seperti stabilisasi tanah yang menggunakan *bioagent* yang mengintegrasikan prinsip-prinsip biologi, kimia, dan fisika, memperlihatkan bagaimana pendekatan secara multidisipliner menciptakan proses dan produk yang efisien, non-invasif dan berkelanjutan yang ramah terhadap lingkungan. Metode geoeletromagnetik berperan besar dalam monitoring proses stabilisasi tanah tersebut.

Inovasi lain sebagai contoh adalah pemetaan kadar air, pH, dan kandungan fosfor pada daerah uji eks tempat pembuangan air sampah (TPA) secara cepat menggunakan sesedikit mungkin sampel untuk diukur berdasarkan korelasi yang kuat antara resistivitas tanah dengan ke tiga parameter tersebut. Melalui inovasi ini biaya survey dan lama waktu survey dapat diperkecil.

Melalui penerapan dan perkembangan metode geoelektrik yang semakin efektif dan efisien, banyak permasalahan dalam eksplorasi, geoteknik, dan lingkungan akan dapat dipecahkan dengan baik.

8 UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih tidak terhingga penulis sampaikan kepada:

1. Rektor ITB beserta jajarannya yang membantu pengusulan hingga saya memperoleh amanah menjadi guru besar dalam bidang Elektromagnetik Dekat Permukaan.
2. Segenap keluarga besar Kelompok Keahlian Geofisika Terapan dan Ekplorasi FTTM ITB: Prof. Djoko Santoso, Prof. Wawan Gunawan A. Kadir, Dr. Daharta Dahrin, Dr. Agus Laesanpura, Dr. Santi Alawiyah, Dr. Setianingsih, Dr. Warsa, Dr. Eko Januari Wahyudi, Dr. Indra Gunawan, Dr. Dadi Abdurrahman, dan Dr. Widodo atas kerja samanya selama ini dalam tugas-tugas akademik: pendidikan, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat, serta pengembangan institusi.
3. Prof. Djoko Santoso yang menjadi panutan saya dalam pengembangan kelimuan dan pengembangan diri, yang menerima saya dengan tangan terbuka untuk menjadi pendidik yang baik di program geofisika di ITB.
4. Segenap Guru Besar yang telah memberikan rekomendasi untuk pengusulan jabatan Guru Besar sebagai berikut: Prof. Ridho Kresna Wattimena; Prof. Djoko Santoso; Prof. M. Nur Heriawan; Prof. Masyhur Irsyam dari FSTL ITB; Prof. Supriadi Rustad dari Universitas Dian Nuswantoro; Prof. Andreas Weller dari TU Clausthal, Jerman; Prof. Katsumi Hattori dari Chiba University, Jepang; dan Prof. David C. Nobes dari East China University of Technology, Tiongkok.
5. Segenap Dekanat FTTM ITB: Prof. Ridho Kresna Wattimena (Dekan); Prof. Syafrizal (Wakil Dekan Akademik); Dr. Susanti Alawiyah (Wakil Dekan Sumber Daya); Ketua dan Sekretaris Senat FTTM Prof. Asep Kurnia Permadi dan Prof. Satria Bijaksana; Anggota Senat FTTM; serta seluruh Tenaga Kependidikan FTTM ITB, yang telah membantu dan mendukung proses pengusulan Guru Besar maupun pengembangan karier saya sebagai dosen hingga saat ini.
6. Segenap guru dan dosen mulai dari SD, SMP, SMA, Program Studi Sarjana, Magister, Doktor, dan Program Profesi Insinyur, khususnya para dosen pembimbing tugas akhir sebagai berikut: Pembimbing Tugas Akhir S-1 Ir. Rosyid dari Departemen Teknik Sipil FTSP ITB; Pembimbing Tesis S-2 Prof. Djoko Santoso; dan Pembimbing Disertasi S-3 Prof. Bernard Forkmann dari TU Bergakademie Freiberg, Jerman.

7. Segenap kolaborator penelitian dan publikasi ilmiah dari Luar Negeri sebagai berikut: Ass. Prof. Hisafumi Asaue dari Kumamoto University, Jepang; Prof. Buelent Tezkan dari Cologne University, Jerman; Prof. Jens Troenicke dari Potsdam University Jerman; Prof. Andreas Weller dari TU Clausthal, Jerman; Ass. Prof. Sina Saneiyan dari Oklahoma University, USA; dan Prof. Katsumi Hattori dari Chiba University, Jepang.
8. Segenap kolaborator penelitian dan publikasi ilmiah dari Indonesia sebagai berikut: Prof. M. Nur Heriawan dari KK Eksplorasi Sumber Daya Bumi, FTTM, ITB; Dr. Dedi Kuniadi dari Prodi Teknik Sipil FTSL ITB; Prof. Ketut WIrantika dari FITB; Prof. Eddy Ibrahim dari Universitas Sriwijaya; Dr. Hilman Suwargana dari PPSDMBP Badan Geologi Kementerian ESDM; dan Dr. Ayi Syaiful Bahri dari Institut Teknologi Surabaya ITS.
9. Segenap rekan di Departemen Teknik Sipil angkatan 1980; Program Magister Geofisika Terapan angkatan 1987; dan Program Doktor di Institut fuer Geophysik, TU Bergakademie Freiberg, Jerman.
10. Segenap mantan mahasiswa Sarjana, Magister dan Doktor bimbingan, yang telah bekerja sama, membantu penelitian dan publikasi hasil penelitian.
11. Segenap keluarga besar Kelompok Keahlian Seismik Eksplorasi dan Rekayasa FTTM dan Kelompok Keahlian Geofisika Global dan Tenaga Kependidikan di Lingkungan Prodi Teknik Geofisika atas perhatian dan kerja samanya selama ini dalam tugas akademik, pengembangan institusi, penelitian dan pengabdian kepada masyarakat, maupun interaksi keseharian di Gedung Basic Science Center B dan Gedung Energi.

Ucapan terima kasih yang sangat khusus penulis sampaikan kepada keluarga tercinta, yaitu:

1. Prof. Pujawati Suryatmana, istri yang penuh pengertian dan selalu setia mendukung perjuangan dalam suka dan duka, serta kedua anak kami, yaitu Arga Riztama, S.Mn. dan Rizandi Gemal Parnadi, S.Si. yang selalu menginspirasi, memberi semangat dan warna dalam kegiatan keseharian, serta memberikan doa terbaik untuk kedua orang tuanya.
2. Bpk. Parnadi Niladiningrat (alm.) dan Ibu Soepinah, kedua orang tua tercinta yang telah merawat, membesarkan dan mendidik serta selalu mendoakan putranya, kakak-kakak penulis, yaitu Dyah Indrati, S.H.; Ir. Dwi Harjanti (almh.); Windriati, B.Sc., dan adik-adik penulis: Handoko Kristiyoso, S.H.; Ir. Gatot Saharso, M.M.; Ir. Sadewo Sasmoko Hadi; Irma

Shinta Dewi, S.S., M.Pd.; dan Woro Mumpuni, S.E. yang selalu mendukung dan mendoakan.

3. Bpk. Atmo Suryatmana (Alm.) dan Ibu Retno (almh.), kedua mertua tercinta yang selalu mendoakan dan mendukung perjuangan dari sejak awal berumah tangga dan kakak-kakak ipar penulis: Ir. Udaya Suryatmana; Ir. Giri Suryatmana; Ir. Ratna Andaya; Dra. Nani Suryatmana; Dra. Eti Nurhayati, Apt.; dr. Ono Suryatmana, SpOG (alm.); Ir. Emo Suryatmana (alm.); Prof. Giat Suryatmana (alm.); Ida Suryatmana (alm.); dan Ceu Atin Suryatmana.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, M. Z., Saad, R., Ahmad, F., Wijeyesekera, D. C., dan Yahya , A. S. (2013). Soil Moisture Content and Density Prediction Using Laboratory Resistivity Experiment . *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 5, No. 6, 731-735. DOI: 10.7763/IJET.2013.V5.652 .
- Aderoju, A., Olanrewaju.O., O., Timothy.O, A., dan John.I, O. (2018). The Porosity Effect on the Electrical Resistivity Properties of Geologic Formations: A Table Top Basket Test Approach. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, Volume 3, 717-721.
- Aldridge, D. F. 1990. The Berlage wavelet. *GEOPHYSICS*, 55(11), 1508–1511. <https://doi.org/10.1190/1.1442799>
- Allred, B. J., Groom, D., Ehsani, M. R., dan Daniels, J. J. (2008). Resistivity Methods. In B. J. Allred, J. J. Daniels, dan M. R. Ehsani, *Handbook of Agricultural Geophysics* (pp. 85-86). Boca Raton: CRC Press.
- Archie, G. (1942). The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining some Reservoir Characteristics. *Petroleum Transactions of AIME* 146, 54–62. doi:10.2118/942054-g.
- Atmanto , M. D. (2017). Hubungan Bulk Density Dan Permeabilitas Tanah Di Wilayah Kerja Migas Blok East Jabung. *Lembaran Publikasi Minyak dan Gas Bumi* Vol. 51 No. 1, 23 - 29.
- Bayraklı, B., dan Gülser, C. (2023). Changes in some physical properties of the soils tread with wheat straw and rice husk under the rotation of white-head cabbage, tomato and wheat. *Soil Studies*, 12(1), 30-39. <http://doi.org/10.21657/soilst.1328706>.
- Brevik , E., Fenton, T., dan Lazari, A. (2006). Soil electrical conductivity as a function of soil watercontent and implications for soil mapping. *Precision Agric**Precision Agric*, 7:393–404.
- Borgioli, G., Capineri, L., Falorni, P., Matucci, S., Windsor, C., 2008. The detection of buried pipes from time-of-flight radar data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 46 (8), 2254–2266.
- Daniels, J. J., Vendl, M., Ehsani, M. R., dan Allred, B. J. (2008). Electromagnetic Induction Methods. In B. J. Allred, J. J. Daniels, dan M. R. Ehsani, *Handbook of Agricultural Geophysics* (pp. 109-112). Boca Raton: CRC Press.

- Darma, S., Ramayana, S., Sadaruddin, dan Suprianto, B. (2021). Investigation of C-Organic Content, Nitrogen, Phosphorus, Potassium Nutrients, pH Soil and C/N Ratio of Tidal Rice Fields in Sidomulyo Village, Anggana District, Kutai Kertanegara Regency, East Kalimantan. *Advances in Biological Sciences Research, volume 17*, 34-39.
- Dentith, M., dan Mudge, S. T. (2014). *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dérobert, Xavier, & Pajewski, Lara. 2018. Supplementary Files: TU1208 Open Database of Radargrams: The Dataset of the IFSTTAR Geophysical Test Site. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1211173>.
- Doilom, M., Guo, J. W., Phookamsak, R., Mortimer, P. E., Karunaratna, S. C., Dong, W., et al. (2020). Screening of Phosphate-Solubilizing Fungi From Air and Soil in Yunnan, China: Four Novel Species in Aspergillus, Gongronella, Penicillium, and Talaromyces. *frontiers in Microbiology*, 1-24.
- Domsch, H., Kaiser , T., Witzke, K., Bornim, P., Sachse, H., dan Linda. (2003). Soil Electrical Conductivity and Soil Nutrient Sampling. *Potsdam-Bornim, and Heinz Sachse, Linda*, 140-141.
- Foth, H.D. (1994). *Fundamentals of Soil Science*. New York: John Wiley and Sons, Inc. .
- Havlin, J., Tisdale, S., Nelson, W., dan Beaton, J. (2017). *Soil Fertility And Fertilizers An Introduction To Nutrient Management Eighth Edition*. Delhi: Pearson India Education Services Pvt. Ltd.
- Hindersah, R., Suryatmana, P., Mulyani, O. 2023. Bioremediasi lahan pertanian terkontaminasi logam berat. Unpad Press, 120pp.
- Kazmi, D., Qasim, S., Siddiqui, F. I., dan Azhar, S. B. (2016). Exploring the Relationship between Moisture Content and Electrical Resistivity for Sandy and Silty Soils. *International Journal of Engineering Science Invention, Volume 5*, 42-47.
- Kao, M.-S., Chang, C.F. (2020). Understanding electromagnetic waves: Springer. 444pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-45708-2>.
- Kuo, C. (2021). Ground-penetrating radar to investigate mud pumping distribution along a railway line: Construction and Building Materials, 290, 123104.
- Kurnia, U., Agus, F., Adimiharja, A., dan Dariah, A. (2006). *Sifat Tanah Dan Metode Analisisnya*. Bogor: Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian.

- Lei, W., Luo, J., Hou, F., Xu, L., Wang, R., & Jiang, X. 2020. Underground Cylindrical Objects Detection and Diameter Identification in GPR B-Scans via the CNN-LSTM Framework. *Electronics*, 9(11), 1804. <https://doi.org/10.3390/electronics9111804>
- Li, Wentao & Cui, Xihong & Guo, Li & Chen, Jin & Chen, Xuehong & Cao, Xin. 2016. Tree Root Automatic Recognition in Ground Penetrating Radar Profiles Based on Randomized Hough Transform. *Remote Sensing*. 8. 10.3390/rs8050430.
- Maas, Christian & Schmalzl, J.. 2013. Using pattern recognition to automatically localize reflection hyperbolas in data from ground penetrating radar. *Computers & Geosciences*. 58. 116-125. 10.1016/j.cageo.2013.04.012.
- McNeill, J. (1980). *Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers*. Mississauga, Ontario, Canada: Geonics Ltd.
- Mengel, K. (2007). Potassium. In A. V. Barker, dan D. J. Pilbeam, *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 105-106). Boca Raton: CRC Press.
- Minarto, E., Christy, N. N., dan Ruchimat, A. (2021). Identification of Groundwater Potential Using Wenner Configuration 2D Resistivity Method (Kupang,Nusa TenggaraTimur). *Journal of Physics: Conference Series*.
- Mukhlas, M., dan Yushardi. (2012). Uji Kualitas Pupuk Organik Berdasarkan Daya Hantar Listrik Pada Campuran Kompos Dan Jerami Padi. *Jurnal Pembelajaran Fisika*, Vol. 1 No. 1, 131-137.
- Murad, O. (2012). Obtaining chemical properties through soil electrical resistivity. *Journal of Civil Engineering Research* 2(6), 120 – 128.
- Nandi. (2005). Kajian Keberadaan Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Leuwigajah dalam Konteks Tata-Ruang. *Jurnal "GEA" Jurusan Pendidikan Geografi*, Vol.5 No.9.
- Parnadi, W. W. 2001. Kennwert-Schaetzung aus Georadar-Transmissionsdaten. PhD thesis. Bergakademie Freiberg.
- Persetidi , P. A., dan G. K. (2023). Assessment and Mapping of Soil Salinity Using the EM38 and EM38MK2 Sensors: A Focus on the Modeling Approaches. *Land*, 5.
- Punuindoong , S., Sinolungan , M., dan Rondonuwu, J. (2021). Kajian Nitrogen, Fosfor, Kalium Dan C-Organik Pada Tanah Berpasir Pertanaman Kelapa Desa Ranoketang Atas. *Soil Environment*, 6-11.

- Purba, T., Ningsih, H., Purwaningsih, Junaedi, A. S., Gunawan, B., Junairiah, et al. (2021). *Tanah dan Nutrisi Tanaman*. Yayasan Kita Menulis.
- Pusat Penelitian Tanah. (1983). *Kriteria Penilaian Data Sifat Analisis Kimia Tanah*. Bogor: Balai Penelitian dan Pengembangan Pertanian Departemen Pertanian.
- Putri, P. R., Purwadia, dan Priyadarshinia, R. (2023). Karakteristik Sifat Fisik Tanah Wilayah Hulu Daerah Aliran Sungai (DAS) Rejoso Kabupaten Pasuruan. *J. Solum Vol. XX No. 1, 39-45.* <https://doi.org/10.25077/jsolum.20.1.39-45.2023>.
- Rawat, P., Shankhdhar, D., dan Shankhdhar, S. C. (2020). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: A Booster for Ameliorating Soil Health and Agriculture Production. In B. Giri, dan A. Varma, *Soil Biology Volume 59* (pp. 47-68). Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG.
- Ren, Shaoqing & He, Kaiming & Girshick, Ross & Sun, Jian. 2016. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. 1-10.
- Reynold, J. (2011). *An Introduction to Applied And Environmental Geophysics 2nd Edition*. New York: John Wiley and Sons Ltd.
- Ristic, Aleksandar & Petrovacki, D. & Govedarica, Miro. 2009. A new method to simultaneously estimate the radius of a cylindrical object and the wave propagation velocity from GPR data. *Computers & Geosciences*. 35. 1620-1630. 10.1016/j.cageo.2009.01.003.
- Ristić, A., Bugarinović, Ž., Vrtunski, M., & Govedarica, M. 2017. Point coordinates extraction from localized hyperbolic reflections in GPR data. *Journal of Applied Geophysics*, 144, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.06.003>
- Sagala, W. A., Elfiati, D., dan Delvian . (2015). Keberadaan Fungi Pelarut Fosfat Pada Tanah Bekas Kebakaran Hutan Di Kabupaten Samosir. *Peronema Forestry Science Journal*.
- Salam, A. K. (2020). *Ilmu Tanah*. Bandar Lampung: Global Madani Press.
- Sampurno, J. (2015). Aplikasi Metode Elektromagnetik Untuk Identifikasi Akuifer Di Taman Universitas Tanjungpura. *Prosiding Semirata2015 bidang MIPA BKS-PTN Barat* (pp. 272-278). Pontianak: Prosiding Semirata2015 bidang MIPA BKS-PTN Barat.
- Sanchez, C. A. (2007). Phosphorus. In A. V. Barker, dan D. J. Pilbeam, *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 52-53). Boca Raton: CRC Presss.

- Sari, M. A., Ivansyah, O., dan Nurhasanaha. (2019). Hubungan Konduktivitas Listrik Tanah dengan Unsur Hara NPK dan pH Pada Lahan Pertanian Gambut. *PRISMA FISIKA*, Vol. 7, No. 2, 55 - 62.
- Singh, S., Chaudhary, D., dan Kum, S. (2023). Soil Microorganism and their Role. *The Agriculture Magazine*, 179-182.
- Soepardi, G. (1983). *Sifat dan Ciri Tanah*. Bogor: IPB Press.
- Strack, K.-M. (1992). Exploration with deep transient electromagnetics, Elsevier, 373pp.
- Sudaryono. (2009). Tingkat Kesuburan Tanah Ultisol Pada Lahan Pertambangan Batubara Sangatta, Kalimantan Timur. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 10(3) 33-346 hal.
- Taisa, R., Purba, T., Sakiah, dan Herawat, J. (2021). *Ilmu Kesuburan Tanah Dan Pemupukan*. Medan: Penerbit Yayasan Kita Menulis.
- Tian, J., Ge , F., Zhang , D., Deng, S., dan Liu, X. (2021). Roles of Phosphate Solubilizing Microorganisms from Managing Soil Phosphorus Deficiency to Mediating Biogeochemical P Cycle. *biology*, 1-19.
- Abidin, M. Z., Saad, R., Ahmad, F., Wijeyesekera, D. C., dan Yahya , A. S. (2013). Soil Moisture Content and Density Prediction Using Laboratory Resistivity Experiment . *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 5, No. 6, 731-735. DOI: 10.7763/IJET.2013.V5.652 .
- Aderoju, A., Olanrewaju.O., O., Timothy.O, A., dan John.I, O. (2018). The Porosity Effect on the Electrical Resistivity Properties of Geologic Formations: A Table Top Basket Test Approach. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, Volume 3, 717-721.
- Allred, B. J., Groom, D., Ehsani, M. R., dan Daniels, J. J. (2008). Resistivity Methods. In B. J. Allred, J. J. Daniels, dan M. R. Ehsani, *Handbook of Agricultural Geophysics* (pp. 85-86). Boca Raton: CRC Press.
- Archie, G. (1942). The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining some Reservoir Characteristics. *Petroleum Transactions of AIME* 146, 54–62. doi:10.2118/942054-g.
- Atmanto , M. D. (2017). Hubungan Bulk Density Dan Permeabilitas Tanah Di Wilayah Kerja Migas Blok East Jabung. *Lembaran Publikasi Minyak dan Gas Bumi* Vol. 51 No. 1, 23 - 29.
- Bayraklı, B., dan Gülser, C. (2023). Changes in some physical properties of the soils tread with wheat straw and rice husk under the rotation of white-head cabbage, tomato and wheat. *Soil Studies*, 12(1), 30-39. <http://doi.org/10.21657/soilst.1328706>.

- Brevik , E., Fenton, T., dan Lazari, A. (2006). Soil electrical conductivity as a function of soil watercontent and implications for soil mapping. *Precision Agric**Precision Agric*, 7:393–404.
- Daniels, J. J., Vendl, M., Ehsani, M. R., dan Allred, B. J. (2008). Electromagnetic Induction Methods. In B. J. Allred, J. J. Daniels, dan M. R. Ehsani, *Handbook of Agricultural Geophysics* (pp. 109-112). Boca Raton: CRC Press.
- Darma, S., Ramayana, S., Sadaruddin, dan Suprianto, B. (2021). Investigation of C-Organic Content, Nitrogen, Phosphorus, Potassium Nutrients, pH Soil and C/N Ratio of Tidal Rice Fields in Sidomulyo Village,Anggana District, Kutai Kertanegara Regency, East Kalimantan. *Advances in Biological Sciences Research*, volume 17, 34-39.
- Dentith, M., dan Mudge, S. T. (2014). *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Doilom, M., Guo, J. W., Phookamsak, R., Mortimer, P. E., Karunaratna, S. C., Dong, W., et al. (2020). Screening of Phosphate-Solubilizing Fungi From Air and Soil in Yunnan, China: Four Novel Species in Aspergillus, Gongronella, Penicillium, and Talaromyces. *frontiers in Microbiology*, 1-24.
- Domsch, H., Kaiser , T., Witzke, K., Bornim, P., Sachse, H., dan Linda. (2003). Soil Electrical Conductivity and Soil Nutrient Sampling. *Potsdam-Bornim, and Heinz Sachse, Linda*, 140-141.
- Foth, H. D. (1990). *Fundamentals Of Soil Science Eighth Edition*. New York: JOHN WILEY dan SONS.
- Foth, H.D. (1994). *Fundamentals of Soil Science*. New York: John Wiley and Sons, Inc. .
- G57-06, A. (2012). *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method*.
- Hardjowigeno, S. (2007). *Ilmu Tanah*. Jakarta: Akademika Pressindo.
- Havlin, J., Tisdale, S., Nelson, W., dan Beaton, J. (2017). *Soil Fertility And Fertilizers An Introduction To Nutrient Management Eighth Edition*. Delhi: Pearson India Education Services Pvt. Ltd.
- Kazmi, D., Qasim, S., Siddiqui, F. I., dan Azhar, S. B. (2016). Exploring the Relationship between Moisture Content and Electrical Resistivity for Sandy and Silty Soils. *International Journal of Engineering Science Invention*, Volume 5, 42-47.

- Kurnia, U., Agus, F., Adimiharja, A., dan Dariah, A. (2006). *Sifat Tanah Dan Metode Analisisnya*. Bogor: Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian.
- McNeill, J. (1980). *Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers*. Mississauga, Ontario, Canada: Geonics Ltd.
- Mengel, K. (2007). Potassium. In A. V. Barker, dan D. J. Pilbeam, *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 105-106). Boca Raton: CRC Press.
- Minarto, E., Christy, N. N., dan Ruchimat, A. (2021). Identification of Groundwater Potential Using Wenner Configuration 2D Resistivity Method (Kupang,Nusa TenggaraTimur). *Journal of Physics: Conference Series*.
- Mukhlas, M., dan Yushardi. (2012). Uji Kualitas Pupuk Organik Berdasarkan Daya Hantar Listrik Pada Campuran Kompos Dan Jerami Padi. *Jurnal Pembelajaran Fisika*, Vol. 1 No. 1, 131-137.
- Murad, O. (2012). Obtaining chemical properties through soil electrical resistivity. *Journal of Civil Engineering Research* 2(6), 120 – 128.
- Nandi. (2005). Kajian Keberadaan Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Leuwigajah dalam Konteks Tata-Ruang. *Jurnal "GEA" Jurusan Pendidikan Geografi*, Vol.5 No.9.
- Petsetidi , P. A., dan G. K. (2023). Assessment and Mapping of Soil Salinity Using the EM38 and EM38MK2 Sensors: A Focus on the Modeling Approaches. *Land*, 5.
- Punuindoong , S., Sinolungan , M., dan Rondonuwu, J. (2021). Kajian Nitrogen, Fosfor, Kalium Dan C-Organik Pada Tanah Berpasir Pertanaman Kelapa Desa Ranoketang Atas. *Soil Environtment*, 6-11.
- Purba, T., Ningsih, H., Purwaningsih, Junaedi, A. S., Gunawan, B., Junairiah, et al. (2021). *Tanah dan Nutrisi Tanaman*. Yayasan Kita Menulis.
- Pusat Penelitian Tanah. (1983). *Kriteria Penilaian Data Sifat Analisis Kimia Tanah*. Bogor: Balai Penelitian dan Pengembangan Pertanian Departemen Pertanian.
- Putri, P. R., Purwadia, dan Priyadarshinia, R. (2023). Karakteristik Sifat Fisik Tanah Wilayah Hulu Daerah Aliran Sungai (DAS) Rejoso Kabupaten Pasuruan. *J. Solum* Vol. XX No. 1, 39-45. <https://doi.org/10.25077/jsolum.20.1.39-45.2023>.
- Rawat, P., Shankhdhar, D., dan Shankhdhar, S. C. (2020). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: A Booster for Ameliorating Soil Health and

- Agriculture Production. In B. Giri , dan A. Varma, *Soil Biology Volume 59* (pp. 47-68). Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG.
- Reynold, J. (2011). *An Introduction to Applied And Environmental Geophysics 2nd Edition*. New York: John Willey and Sons Ltd.
- Sagala, W. A., Elfiati, D., dan Delvian . (2015). Keberadaan Fungi Pelarut Fosfat Pada Tanah Bekas Kebakaran Hutan Di Kabupaten Samosir. *Peronema Forestry Science Journal*.
- Salam, A. K. (2020). *Ilmu Tanah*. Bandar Lampung: Global Madani Press.
- Sampurno, J. (2015). Aplikasi Metode Elektromagnetik Untuk Identifikasi Akuifer Di Taman Universitas Tanjungpura. *Prosiding Semirata2015 bidang MIPA BKS-PTN Barat* (pp. 272-278). Pontianak: Prosiding Semirata2015 bidang MIPA BKS-PTN Barat.
- Sanchez, C. A. (2007). Phosphorus. In A. V. Barker, dan D. J. Pilbeam, *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 52-53). Boca Raton: CRC Presss.
- Sari, M. A., Ivansyah, O., dan Nurhasanaha. (2019). Hubungan Konduktivitas Listrik Tanah dengan Unsur Hara NPK dan pH Pada Lahan Pertanian Gambut. *PRISMA FISIKA*, Vol. 7, No. 2, 55 - 62.
- Singh, S., Chaudhary, D., dan Kum, S. (2023). Soil Microorganism and their Role. *The Agriculture Magazine*, 179-182.
- Soepardi, G. (1983). *Sifat dan Ciri Tanah*. Bogor: IPB Press.
- Sudaryono. (2009). Tingkat Kesuburan Tanah Ultisol Pada Lahan Pertambangan Batubara Sangatta, Kalimantan Timur. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 10(3) 33-346 hal.
- Taisa, R., Purba, T., Sakiah, dan Herawat, J. (2021). *Ilmu Kesuburan Tanah Dan Pemupukan*. Medan: Penerbit Yayasan Kita Menulis.
- Tezkan, B. (1988). A review of environmental applications of quasi-stationary electromagnetic techniques: Survey in Geophysics, 20, 279–308.
- Tian, J., Ge , F., Zhang , D., Deng, S., dan Liu, X. (2021). Roles of Phosphate Solubilizing Microorganisms from Managing Soil Phosphorus Deficiency to Mediating Biogeochemical P Cycle. *biology*, 1-19.
- Ward, S. H., dan Hohmann, G. W. (1987). Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. In M. N. Nabighian, *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics – Theory* (pp. 131-135). Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists.

- Warren, C., Giannopoulos, A., Giannakis, I. 2016. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. Computer Physics Communications. 209. 10.1016/j.cpc.2016.08.020.
- Windsor, C., Capineri, L., Falorni, P. 2014. A Data Pair-Labeled Generalized Hough Transform for Radar Location of Buried Objects. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE. 11. 124-127. 10.1109/LGRS.2013.2248119.
- Zhdanov, M. S., Keller, G. V., 1994. The Geoelectrical methods in geophysical exploration, Elsevier, 874pp.

CURRICULUM VITAE



Nama	: Prof. Dr.rer.nat. Ir. Wahyudi Widyatmoko Parnadi, M.S.
Tempat/tgl lahir	: Salatiga, 14 Oktober 1959
Kel. Keahlian	: Geofisika Terapan dan Eksplorasi
Alamat Kantor	: Prodi Teknik Geofisika FTTM-ITB Jl. Ganesha 10 Bandung 40132
Nama Istri	: Prof. Dr. Pujawati Suryatmana, M.P.
Nama Anak	: Arga Riztama, S.Mn. Rizandi Gemal Parnadi, S.Si.

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Ir. (Insinyur) Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung, Indonesia (1980-1986)
- M.S. (Magister Sains) Program Geofisika Terapan, Institut Teknologi Bandung, Indonesia (1987-1990)
- Dr.rer.nat. (Doctor rerum naturalium) Department of Geophysics, TU Bergakademie Freiberg, Jerman (1996-2001)
- Ir. (Insinyur) Program Studi Program Profesi Insinyur, Institut Teknologi Bandung, Indonesia (2022)

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

- 1990-1998 : Pengajar Departemen Teknik Geologi FTM ITB
- 1998-2007 : Pengajar Program Studi Teknik Geofisika FIKTM ITB
- 1 Januari 2006 – 31 Desember 2007: Sekprodi Magister dan Doktor Teknik Geofisika FIKTM ITB
- 2005-Sekarang: Kepala Laboratorium Geofisika Rekayasa dan Lingkungan FTTM ITB
- 2007 - Sekarang: Pengajar Program Studi Teknik Geofisika FTTM ITB

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- Tanggal 1 September 1990 – 30 September 1999: IIIa
- Tanggal 1 Oktober 1999 – 31 Maret 2003: IIIb
- Tanggal 1 April 2003 – 31 Maret 2012: IIIc

- Tanggal 1 April 2012 – 31 Maret 2016: IIId
- Tanggal 1 April 2014 – 31 Maret 2016: IVa
- Tanggal 1 April 2016 – 31 Maret 2014: IVb
- Tanggal 1 April 2024 – sekarang: IVc

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Tanggal 1 Juli 1993 – 30 April 1999 : Asisten Ahli Madya FTM - ITB
- Tanggal 1 Maret 1999 – 31 Agustus 2002 : Asisten Ahli FIKTM - ITB
- Tanggal 1 September 2002- 30 November 2011: Lektor FIKTM - ITB
- Tanggal 1 Desember 2011 – 31 Oktober 2023: Lektor Kepala FTTM
- 1 November 2023 – sekarang: Guru Besar - FTTM - ITB

V. KEGIATAN PENELITIAN

- 2024: Delineasi akuifer konduktif menggunakan Metode Mise-a-la-Masse (MaLM): Penelitian mandiri
- 2024: Pemantauan geofisika pada stabilisasi tanah lunak berbasis bakteri ureolitik: PPMI 2024
- 2023: Aplikasi Metode Geofisika dalam penentuan kesuburan tanah bekas tempat pembuangan akhir sampah (TPA): PPMI 2023
- 2022: Pengembangan Metode Geofisika dalam bidang Keteknikan & Lingkungan: PPMI 2022
- 2021: Pengembangan metode geofisika untuk mendeteksi rekahan: P3MI 2021
- 2020: Pengembangan Arsitektur *Deep Learning* untuk Pencitraan struktur dan infrastruktur bawah permukaan: P3MI 2020
- 2018: Analisis Longsoran yang Dipicu oleh Gempa dalam Tanah Kohesif: Riset Internasional ITB 2018
- 2017: Identifikasi Identifikasi sisa panasbumi menggunakan metode elektroseismik melalui pendekatan pemodelan SHTE dan PSVTM: Studi kasus Lapangan Panasbumi Kamojang. Penelitian Hibah Bersaing.

VI. PUBLIKASI

- [1] Bahri, S., Tualepe, D., Batlolona, Y.T., Ramadhan, A., **Parnadi, W.W.**, (2024), Vertical electrical sounding method and Dar Zarrouk analysis to identify the distribution of seawater intrusion in Pelauw Village, Maluku, Jurnal of Degraded and Mining Lands Management, 11(4), pp.6089-6097

- [2] **Parnadi, W.W.**, Salam, R., Achmad, R., Santosa, L.W., (2024), Groundwater conservation of small volcanic Island and the dynamics of its freshwater and saltwater interfaces revealed from electrical resistivity data: A case study from ternate island, AIP Conference Proceedings, 2710(1), 080008
- [3] Mariyanto, M., **Parnadi, W.W.**, Ramadhan, R.F., Rochman, J.P.G.N., Zulaikah, S., (2023), Detection of subsurface water pipeline under SZJT Track Using Ground Penetrating Radar Method, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1288(1), 012008
- [4] Salam, A., **Parnadi, W.W.**, (2023), Revealing subsurface structure at the former municipal solid waste disposal site Leuwi Gajah of Cimahi Town by using geophysical data: a preliminary result, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1288(1), 012023
- [5] Rizka, R., Santoso, D., Warsa, W., Waruwu, P., **Parnadi, W.W.**, (2023), Application of Vertical Electrical Sounding Method Using Damped Least-Square Inversion for Leachate Identification at Bakung Landfill, Lampung, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1288(1), 012033
- [6] Jubaedah, N.E., **Parnadi, W.W.**, (2023), On the application of Transient Electromagnetics (TEM) and DC- resistivity methods for groundwater level detection in the Cipatat karst area, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1288(1), 012022
- [7] Antosia, R.M., Yolandika, R., **Parnadi, W.W.**, (2023), Manganese prospecting using time domain induced polarisation (TDIP), case study: Karangnunggal district, Tasikmalaya regency, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1233(1), 012064
- [8] Pambudi, R.A., Chrisnawan, T.S., Warsa, W., Laesanpura, A., **Parnadi, W.W.**, (2023), Implementation of Frequency Characteristics Technique in Ground Penetrating Radar to Identify Steam Vent, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1227(1), 012017
- [9] **Parnadi, W.W.**, (2022), Determination of Q-factor of Transmission Ground-Penetrating Radar Waves in Attenuating Media, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1031(1), 012029
- [10] Hanif, M., **Parnadi, W.W.**, (2022), Groundwater play in extensional regime: A case study in Cibunar Region, Garut, Indonesia, 1031(1), 012004

- [11] Phanjaya, H., **Parnadi, W.W.**, Santoso, D., (2022), Electrical resistivity survey for groundwater investigation in Padalarang, West Java, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1031(1), 012006
- [12] Widodo, Raflesia, F., Alawiyah, S., **Parnadi, W.W.**, Fatkhan, (2022), Flower Pollination and Elitism Algorithms for Inversion of TDEM Data, Journal of Mathematical and Fundamental Sciences, 54(1), 121-137
- [13] Dewantara, D., **Parnadi, W.W.**, (2022), Automatic Hyperbola Detection and Apex Extraction Using Convolutional Neural Network on GPR Data, Journal of Physics: Conference Series, 2243(1), 012027
- [14] Atmaodi, B., **Parnadi, W.W.**, (2022), Development of azimuthal resistivity survey data processing program with graphical user interface for anisotropic coefficient quantification, Journal of Physics: Conference Series, 2243(1), 012028
- [15] Hardyani, P.V., Bahri, A.S., Hariyanto, T., **Parnadi, W.W.**, Rosandi, Y., Sunardi, E., Alita, E.W., Widodo, A., Purwanto, M.S. (2021), Groundwater Recharge Assessment using Geographic Information System APLIS Method in Donorojo Karst Area, Pacitan, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 936(1), 012027
- [16] **Parnadi, W.W.**, Warsa, W., Laesanpura, A., Santoso, D., (2021), Multi frequency Ground-Penetrating Radar method for mapping underground pipes and man-made objects, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 873(1), 012090
- [17] Antonio, T., **Parnadi, W.W.**, Heriawan, M.N., (2021), Integrating Ground Penetrating Radar, Induced Polarization and Aerial Photograph to Analyze Land Subsidence in Borehole Mining Operation Area: A Case Study from South Bangka Island, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 873(1), 012081
- [18] Jubaedah, N.E., **Parnadi, W.W.**, (2021), Study of Fluid Flow Movement by Using Self Potential Data, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 873(1), 012082
- [19] Salam, R., **Parnadi, W.W.**, (2021), Laboratory-scaled Azimuthal Resistivity Survey for Fracture Detection, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 873(1), 012079
- [20] Laesanpura, A., Wahyudi, E.J., **Parnadi, W.W.**, Gunawan, W., (2021), The Geophysics evidence for fault in Tertiary, Pre-Tertiary deposits rock of Lok Ulo central Java, revealed by Gravity data, Journal of Physics: Conference Series, 1949(1), 012008

- [21] Wicaksono, M.A., Mordekhai, **Parnadi, W.W.**, M.Chandra, R.M., (2021) Ground Penetrating Radar for Nickel Laterite Exploration: A Case Study in Pakal Island, Indonesia, Proc. Joint Convention Bandung, 23rd – 25th November 2021.
- [22] **Parnadi, W.W.**, Heriawan, M.N., Prasetyo, S.H., Lubis, I.A., (2019), Monitoring of Borehole Stability after Borehole Mining Operation by Using Ground-Penetrating Radar and Induced Polarization, Proc. CINEST 2019, Fukuoka, 575-578
- [23] **Parnadi, W.W.**, Warsa, Santoso, D., (2019), Water Content Delineation using Ground-Penetrating Radar Q Tomography, Proc. CINEST 2019, Fukuoka, 358-361
- [24] Warsa, W., Munandar, J., Yogi, I.B.S., **Parnadi, W.W.**, (2019), Subsurface Void Investigation using Ground-Penetrating Radar in the Garuda Wisnu Kencana (GWK) Bali, Proc. CINEST 2019, Fukuoka, pp?
- [25] Warsa, W., Prabawa, R.S., **Parnadi, W.W.**, (2019), Non-Linear Inversion Study for Long-grounded Wire TDEM Data, Proc. CINEST 2019, Fukuoka, pp?
- [26] **Parnadi, W.W.**, Amin, S.S., Heriawan, M.N., Parnadi, R.G., (2019), Study on the Use of Ground-Penetrating Radar Technique to Recognize Tin deposits in Bangka Island, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 318(1), 012027
- [27] Priska, A., **Parnadi, W.W.**, Parnadi, R.G., (2019), On the Application of Multi-frequency Ground-Penetrating Radar Method for Mapping Underground Pipe, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 318(1), 012028
- [28] **Parnadi, W.W.**, Warsa, W., Laesanpura, A., Parnadi, R.G., Asaue, H., (2018), Correlating Ground-Penetrating Radar Data with Geotechnical Data, 2018 2nd International Conference on Applied Electromagnetic Technology, pp. 8-11, 8572326
- [29] Mardoli, O., Sofyan, I.A., **Parnadi, W.W.**, (2018), A GPR Case Study in the Lodian Dam Area, Rembang of Central Java, 2018 17th International Conference on Ground Penetrating Radar, 8441562
- [30] Prabawa, R.S., Widodo, Putri, N.R., Irfan, B.H., Muzakki, A., **Parnadi, W.W.** (2018), Detection of hazardous metal substances using magnetic susceptibility method based on laboratory analysis and geomagnetic

survey in Citarum River, Dayeuh Kolot, Bandung, AIP Conference Proceedings, 1987, 020016

- [31] Madyantara, N.R., Widodo, Janet, R.E., Agung, C.S., Agus, D.S., Gamal, A., **Parnadi, W.W.**, (2018), Identifying contaminated shallow aquifer distribution using resistivity and magnetic susceptibility methods at rice field alongside Cikijing river, AIP Conference Proceedings, 1987, 020018
- [32] Laesanpura, A., Dahrin, D., Warsa, W., **Parnadi, W.W.**, Abdurrahman, D., Yogi, I.B.S., Marthen, R., (2018), Comparison of transient electromagnetic and DC resistivity for aquifer layer in Cisarua, Bandung Barat Regency, EAGE-HAGI 1st Asia Pacific Meeting on Near Surface Geoscience and Engineering
- [33] Santoso, D., Wahyudi, E.J., Kadir, W.G.A., Alawiyah, S., Nugraha, A.D., Supendi, P., **Parnadi, W.W.**, (2018), Gravity structure around Mt. Pandan, Madiun, East Java, Indonesia and its relationship to 2016 seismic activity, Open Geosciences, pp.882-888
- [34] Priska, A., Dahrin, D., Widodo, W., **Parnadi, W.W.**, Wibowo, A.K.A., Hasanudin, (2016), Geothermal exploration using gravity method: Case study of Way Umpu Geothermal Prospective Area, Lampung Province, Indonesia, pp.510-518
- [35] Mariyanto, Priahadena, H., **Parnadi, W.W.**, (2016), Application of vertical electrical sounding method to identify distribution of hot groundwater around the hotsprings in geothermal prospect area: Proc. ASEG-PESA-AIG 2016, 25th Geophys. Conf.& Exhibit., 21-24th August 2016, Adelaide, Australia
- [36] Rakhman, A., **Parnadi, W.W.**, Srigutomo, W., (2015), Pembuatan Aplikasi Graphical User Interface (GUI) Pemodelan FDTD Ground-Penetrating Radar (GPR) 2-D dan Pemanfaatannya pada Karakterisasi Anomali Bawah Permukaan, Pros. Pertemuan Ilmiah XXIX HFI Jateng & DIY, Yogyakarta 25 April 2015. ISSN : 0853-0823
- [37] Warsa, W., Grandis, H., **Parnadi, W.W.**, (2015), Three-Dimensional Magnetic Resonance Sounding Tomography: Proc. 12th SEGJ International Symposium, Tokyo, 2015
- [38] Ibrahim, E., **Parnadi, W.W.**, (2015), Study of layered structure on contact boundary area of Formation Panasogan-Waturanda by applying Ground-Penetrating Radar method: Review of Advances in Physics Theories and Applications. DOI: 10.18488/journal.75/2015.2.2/75.2.10.19

- [39] **Parnadi, W.W.**, Widodo, Savitri, R.W., Zakarsyi, A., (2014), Magnetotelluric investigations in the Way Umpu geothermal prospect area, Lampung Province, Indonesia, International Journal of Technology, 5(3), pp. 227-241
- [40] **Parnadi, W.W.**, Adhiarta, P., Widodo, Rahadinata, T., (2014), Resistivity Structures in Mt. Batur Geothermal Prospect Area in Bali Province, Indonesia, Proc. 1st AEMT Lombok, 61-66
- [41] Warsa, Grandis, H., **Parnadi, W.W.**, Santoso, D., (2014), Multi-dimensional inversion modeling of surface nuclear magnetic resonance (SNMR) data for groundwater exploration, Journal of Engineering and Technological Sciences, 46 B(2), pp. 123-140
- [42] Warsa, W., Grandis, H., **Parnadi, W.W.**, Santoso, D., (2014), Three-dimensional inversion of Magnetic Resonance Sounding (MRS) for groundwater detection, International Journal of Technology, 5(3), pp.219-226
- [43] Warsa, W., Grandis, H., **Parnadi, W.W.**, Santoso, D., (2013), 3-D SNMR inversion of water content, Near Surface Geoscience 2013
- [44] **Parnadi, W.W.**, Nabeilah, A.M., Muis, A., Hutapea, R.P., Meidiana, T., (2012), Estimation of gas frequency characteristics to identify microfault at terra drilling site, Near Surface Geoscience 2012

VII. PENGHARGAAN

- **Mitsui Matsushima Award** for Best Presentation pada International Symposium on Earth Science and Technology CINEST 2019 dengan judul paper “Water content delineation using Ground-Penetrating Radar (GPR) Q Tomography”, Fukuoka Jepang, Desember 2019.
- Satya Lencana Karya Satya X Tahun dari Presiden RI: 2006
- Satya Lencana Karya Satya XX Tahun dari Presiden RI:
- Satya Lencana Karya Satya XXX Tahun dari Presiden RI: 11 April 2023

VIII. HAKI

1. **ARSImaPI**: Program komputer pengolah data Vertical Electrical Sounding (VES) dan Azimuthal Resistivity Survey (ARS). Pencipta: Wahyudi W. Parnadi, Berith Atmaodi, Djoko Santoso, Warsa, Widodo (Nomor pencatatan 000345819 Tahun 2022 pada Kemenkumham RI)

2. **GPRfusi:** Program komputer untuk meningkatkan resolusi data Ground-Penetrating Radar (GPR) melalui penggabungan dua radargram yang berbeda frekuensi kerja pada lintasan pengukuran yang sama. Pencipta: Darharta Dahrin, Wahyudi W. Parnadi, Apulina Priska (Nomor pencatatan 000404754 Tahun 2022 pada Kemenkumham RI)
3. **MTSFINV:** Program komputer untuk menentukan nilai saturasi dari inversi data Magnetotellurik (MT). Pencipta: Widodo, Wahyudi W. Parnadi, Warsa, Kurnia A. Ra'if, Muhammad I. Fiordi, Sudono (Nomor pencatatan 000157424 Tahun 2019 pada Kemenkumham RI))



✉ Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
📞 +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132

E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id

Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id 🌐 FgbItb 🌐 FGB_ITB
✉ @fgbitb_1920 📺 Forum Guru Besar ITB

ISBN 978-623-297-640-5

A standard linear barcode representing the ISBN number 978-623-297-640-5.

9 78623 976405