



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



PENERAPAN METODE-METODE ELEKTROMAGNETIK KEBUMIHAN DI INDONESIA, TANTANGAN DAN POTENSI PENGEMBANGANNYA

Profesor Wahyu Srigutomo

**Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB
20 Agustus 2022**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung
20 Agustus 2022

Profesor Wahyu Srigutomo

PENERAPAN
METODE-METODE ELEKTROMAGNETIK
KEBUMIHAN DI INDONESIA,
TANTANGAN DAN POTENSI
PENGEMBANGANNYA



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: PENERAPAN METODE-METODE ELEKTROMAGNETIK KEBUMIHAN
DI INDONESIA, TANTANGAN DAN POTENSI PENGEMBANGANNYA
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,
tanggal 20 Agustus 2022.

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama **7 (tujuh) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)**.
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama **5 (lima) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)**.

Hak Cipta ada pada penulis

Wahyu Srigutomo

PENERAPAN METODE-METODE ELEKTROMAGNETIK KEBUMIHAN
DI INDONESIA, TANTANGAN DAN POTENSI PENGEMBANGANNYA
Disunting oleh Wahyu Srigutomo

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2022

vi+90 h., 17,5 x 25 cm

ISBN 978-602-6624-60-4

1. Elektromagnetik 1. Wahyu Srigutomo

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil'aalamiin, segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadhirat Allah SWT, karena atas izinNya, penulis dapat menyelesaikan buku orasi ilmiah guru besar ini. Ucapan terima kasih dan penghargaan yang tinggi dihaturkan kepada segenap pimpinan dan anggota Forum Guru Besar (FGB) ITB yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk menyampaikan orasi ilmiah ini pada sidang terbuka FGB ITB diiringi semangat berbagi pengalaman, wawasan serta motivasi untuk mempertinggi kualitas, sinergi dan nilai manfaat Tri Dharma Perguruan Tinggi dari insan ITB untuk masyarakat dan bangsa Indonesia.

Kesempatan meraih jabatan guru besar bukanlah hasil pekerjaan individual semata, tetapi sangat dipengaruhi dan bergantung pada dukungan semua pihak: para dosen dan kolega peneliti di lingkungan keilmuan Fisika dan FMIPA ITB, para karyawan, para mahasiswa serta sistem dan atmosfer akademik serta sistem pengelolaan sumber daya di institusi tercinta ITB. Karenanya penulis dengan segala kerendahan hati menghaturkan rasa terima kasih kepada semua pihak di atas.

Penulis juga mengucapkan terima kasih serta doa tulus kepada kepada almarhum/almarhumah kedua orang tua yang selama hidupnya senantiasa mendukung dan memanjatkan doa bagi berkahnya kiprah penulis berkarir di ITB. Terima kasih juga untuk istri tercinta Eleonora,

serta anak-anak yang manis: Adiva, Zee, dan Samy yang telah mebersamai penulis dan menjadi lautan sumber semangat.

Bandung, 20 Agustus 2022

Professor Wahyu Srigutomo

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
1. PENDAHULUAN	1
2. KLASIFIKASI METODE-METODE ELEKTROMAGNETIK	8
3. REKAM JEJAK PENULIS DAN TIM PADA SUB-KK INDUKSI ELEKTROMAGNETIK KK FISIKA BUMI DAN SISTEM KOMPLEKS	14
3.1. Penelitian dan Fokus Bidang Kepakaran	14
3.2. Kerjasama dan Pengabdian kepada Masyarakat	19
4. STUDI KASUS APLIKASI METODE-METODE ELEKTROMAGNETIK KEBUMIHAN	21
4.1. Metode TDEM untuk studi kegunungapian	21
4.2. Metode TDEM untuk studi <i>carbon capture and storage</i> (CCS) di lapangan minyak Gundih, Jawa Tengah	28
4.3. Metode MT untuk studi kegunungapian dan panas bumi	32
4.4. Metode CSAMT untuk studi kegunungapian dan panas bumi	38
4.5. Metode <i>Very Low Frequency</i> (VLF) untuk Identifikasi Sesar	41
4.6. Metode <i>Ground Penetrating Radar</i> untuk Investigasi Polusi	46
5. TANTANGAN APLIKASI DAN PENGEMBANGAN METODE ELEKTROMAGNETIK	51
6. PENUTUP	53

DAFTAR PUSTAKA	54
UCAPAN TERIMA KASIH	74
CURRICULUM VITAE	77

PENERAPAN METODE-METODE ELEKTROMAGNETIK KEBUMIHAN DI INDONESIA, TANTANGAN DAN POTENSI PENGEMBANGANNYA

1. PENDAHULUAN

Fenomena elektromagnetisme di alam secara klasik dikaitkan dengan variasi medan listrik dan medan magnet yang saling terkopel dan interaksinya satu sama lain serta interaksinya dengan muatan listrik serta arus listrik. Variasi kedua medan di atas sedemikian merambat dalam vakum dan dalam material dalam bentuk gelombang elektromagnetik yang dikarakterisasi oleh intensitas gelombang serta frekuensi ν dari kedua medan yang bervariasi tersebut. Penjalaran gelombang elektromagnetik inilah yang sering kita sebut dengan radiasi elektromagnetik. Kecepatan penjalaran gelombang elektromagnetik dalam vakum adalah kecepatan cahaya c dan dalam material kecepatannya menurun dalam bentuk fraksi dari c . Representasi matematis untuk fenomena elektromagnetisme secara lengkap dapat dinyatakan oleh persamaan Maxwell yang terdiri dari empat buah persamaan differensial orde satu di mana medan listrik dan medan magnet yang bervariasi terhadap waktu saling terkopel (medan elektromagnetik). Representasi lainnya yang lebih intuitif dari sudut pandang fisika adalah representasi gelombang dalam bentuk persamaan

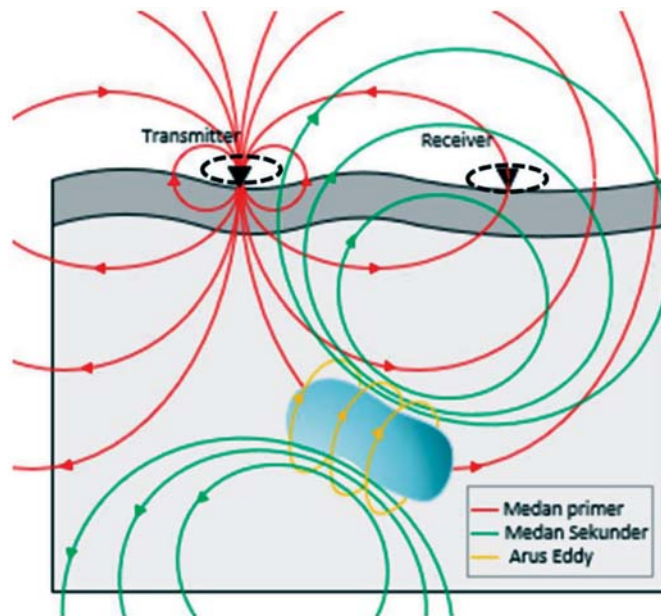
differensial parsial orde dua serta representasi potensial-potensial elektromagnetik. Secara kuantum, radiasi elektromagnetik dipandang sebagai aliran foton-foton yang dalam vakum berkecepatan cahaya c dan masing-masing individu foton membawa energi sebesar $h\nu$, di mana ν adalah nilai frekuensi yang sama dengan frekuensi gelombang elektromagnetik klasik dan h adalah konstanta Plank.

Fenomena interaksi medan elektromagnetik dengan material, yaitu dalam hal ini dengan material bumi atau batuan geologi serta jenis medan elektromagnetik primer yang digunakan, apakah alami atau dibangkitkan oleh suatu sistem generator buatan, merupakan kunci dari apa yang disebut dengan 'metode elektromagnetik' dalam khazanah kebumian atau geofisika. Prinsip utama metode elektromagnetik ini dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 1. Medan elektromagnetik primer yang dibangkitkan oleh suatu sistem pemancar (*transmitter* alami ataupun buatan) yang menjalar dalam material bumi bernilai konduktivitas listrik tertentu akan menginduksi sistem arus sekunder (arus *Eddy*) pada konduktor tersebut. Arus sekunder ini nilainya akan bergantung konduktivitas material bawah permukaan dan pada gilirannya membangkitkan medan elektromagnetik sekunder (misal: Hauck dan Kneisel, 2008; Florsch dkk., 2018). Superposisi medan elektromagnetik primer dan medan elektromagnetik sekunder yang disebut medan total direkam di permukaan melalui suatu sistem penerima (*receiver*). Informasi bawah permukaan dalam bentuk parameter kelistrikan dikandung oleh

medan elektromagnetik sekunder ini. Rekaman medan elektromagnetik total ini kemudian diolah melibatkan prinsip-prinsip fisika-matematika terkait melalui teknik komputasi numerik untuk mendapatkan informasi distribusi spasial parameter fisis terkait yaitu konduktivitas listrik (S/m) atau kebalikannya resistivitas listrik (ohm.m). Pengetahuan distribusi spasial konduktivitas listrik bawah permukaan bumi inilah yang bermanfaat bagi bidang fisika bumi khususnya atau sains kebumihan secara umum untuk diaplikasikan dalam studi tentang struktur bumi (Khoza dkk., 2013), tektonisme dan kegempaan (Aizawa dkk., 2021; Begum, 2017; Karaş dkk., 2017), kegunungapian (Srigutomo dkk., 2008; Tank dan Karaş, 2020; Ahmed dkk., 2018; Lezaeta dan Brasse, 2001), eksplorasi panas bumi (Nono dkk., 2020; Wu dkk., 2012), eksplorasi hidrokarbon (Zhang dkk., 2014; Marinenko dan Epov, 2017) eksplorasi sumber daya mineral (Chouteau dkk., 1997; Law dkk., 2019), hidrologi (Slater dkk., 2010), geoteknik (Liu dan Xie, 2013) dan lainnya.

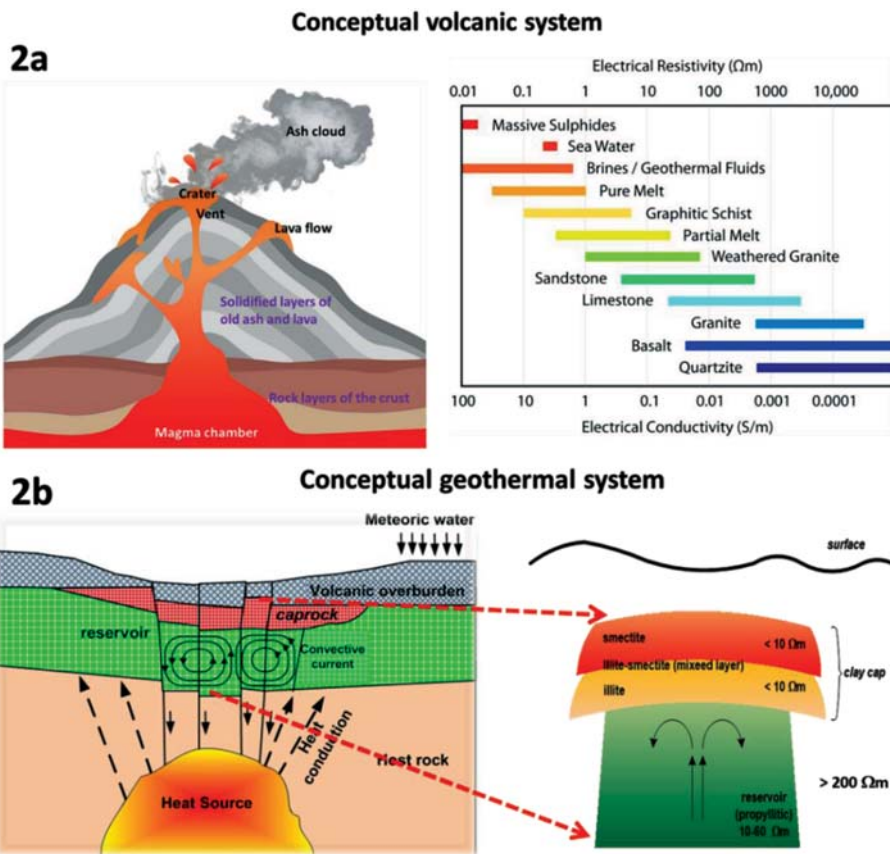
Efektivitas suatu metode pengukuran atau survey geofisika akan bergantung pada ada tidaknya atau seberapa besar variasi nilai parameter fisis dalam bentuk kontras parameter tersebut. Metode elektromagnetik akan sangat sensitif dan efektif apabila digunakan di atas suatu zona di mana kontras-kontras konduktivitas konduktivitas di bawah permukaan cukup signifikan. Konduktivitas listrik secara signifikan tergantung pada temperatur, porositas batuan, saturasi fluida, dan konduktivitas fluida pengisi pori (Hyndman dan Shearer, 1989; Llera dkk., 1990; Hermance,

1995). Suatu sistem gunung api (Gambar 2a) umumnya dikarakterisasi oleh adanya kontras konduktivitas yang disebabkan kombinasi kehadiran batuan induk yang sangat resistif dan bertemperatur rendah serta kering dengan kehadiran reservoir magma leleh bertemperatur tinggi berfasa lelehan, dan sistem hidrotermal terkait di atasnya (Wright dkk., 1985; Newman dkk., 1985, Srigutomo dkk., 2008).



Gambar 1. Ilustrasi prinsip induksi elektromagnetik dalam studi fisika kebumihan ataupun eksplorasi geofisika. *Transmitter* memancarkan gelombang elektromagnetik primer yang menginduksi medan elektromagnetik sekunder pada konduktor. *Receiver* mengukur medan elektromagnetik total yang merupakan superposisi medan primer dan medan sekunder.

Kontras konduktivitas yang cukup tinggi seperti di atas menyebabkan metode elektromagnetik sangat efektif diaplikasikan untuk studi



Gambar 2. (a) Sistem gunung api konseptual dengan material penyusunnya yang memiliki kontras konduktivitas tinggi, terutama antara magma dengan lapisan lava dan abu gunung api yang terpadatkan serta dengan lapisan kerak bumi atau batuan dasar. Nilai konduktivitas listrik material geologi diambil dari Comeau (2015). (b) Kontras konduktivitas tinggi yang terdapat pada suatu sistem panas bumi terutama antara lapisan penudung impermeabel yang merupakan batuan lempung hasil alterasi hidrotermal dengan batuan induk di sekitarnya.

kegunungapian. Demikian pula pada suatu sistem panas bumi yang dikarakterisasi oleh keberadaan sistem sesar dan rekahan terisi fluida panas dan produk alterasi hidrotermal (Pellerin dkk., 1996). Keberadaan

batuan lempung penudung impermeabel yang sangat konduktif di atas zona reservoir panas bumi yang sedikit lebih resistif di dalam batuan induk yang sangat resistif juga menyediakan kontras konduktivitas tinggi yang menjamin efektifnya metode-metode elektromagnetik untuk diterapkan (Gambar 2b).

Sebagian besar gunung api di Indonesia adalah bagian dari Busur Sunda, barisan gunung berapi sepanjang 3.000 km terbentang dari utara Sumatera sampai Laut Banda. Sebagian besar gunung berapi ini adalah hasil subduksi Lempeng India-Australia di bawah Lempeng Eurasia. Gunung-gunung api di Laut Banda hasil penunjaman Lempeng Pasifik di bawah Lempeng Eurasia. Di sebelah utara Busur Banda, kompleksitas tektonik meningkat, dengan konvergensi fragmen lempeng membentuk beberapa zona subduksi, terutama berorientasi utara-selatan, yang pada gilirannya menghasilkan gunung berapi Sulawesi-Sangihe di barat dan Halmahera di timur zona subduksi (Simkin dan Siebert, 1994).

Menurut laman resmi Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) yaitu magma.esdm.go.id, Indonesia memiliki 127 gunung api aktif yang dibagi dalam tiga tipe. Pertama, gunung api tipe A, gunung api dengan catatan sejarah letusan sejak tahun 1600, berjumlah 76 gunung api. Kedua, gunung api Tipe B yaitu gunung api yang tercatat pernah mengalami letusan sebelum 1600 yang berjumlah 30 gunung api. Terakhir, gunung api Tipe C yaitu yang tidak memiliki catatan sejarah letusan namun memperlihatkan jejak-jejak aktivitas vulkanik seperti adanya

solfatara atau fumarola. Sebagai negara dengan 127 gunung berapi aktif yang tersebar di seluruh kepulauan, Indonesia memiliki jumlah letusan gunung api tertinggi yang menyebabkan kematian, kerusakan pada lahan yang pertanian, terjadinya banjir bandang, tsunami, guguran kubah lava serta aliran piroklastik yang berpotensi membahayakan. Karena risiko-risiko vulkanik ini, metode pemantauan & prediksi yang efektif aktivitas dan dinamika gunung api untuk mengurangi dampak negatif letusan vulkanik yang mungkin terjadi. Penerapan metode-metode elektromagnetik untuk memahami distribusi spasial parameter fisis dan perilaku suatu gunung api menjadi sangat penting dan relevan dalam rangka mitigasi kebencanaan.

Tektonisme Indonesia dan hamparan busur gunung api yang sedemikian, ternyata juga membawa anugerah tersendiri berupa tersimpunya potensi energi yang dapat dimanfaatkan ke dalam bentuk energi listrik yaitu potensi energi panas bumi pada sistem-sistem panas bumi vulkanik yang dominan ditemukan di Indonesia. Sistem panas bumi vulkanik terkait dengan keberadaan 'sistem vulkanik' yang transfer panasnya dikaitkan dengan produksi aliran fluida magmatik, aliran piroklastik dan aliran lava dari pusat pelepasan yang berada di dekat mulut kawah letusan gunung api (Hochstein dan Sudarman, 2015). Setidaknya Tahun 2020 Kementrian ESDM telah mengidentifikasi 357 lokasi potensi panas bumi dengan total potensi panas bumi 23.765,5 MWe. Realisasi pemanfaatannya baru 2.175,7 MWe (sekitar 9%) melalui

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi atau PLTP (Siaran Pers ESDM, 2021). Pemerintah RI menargetkan bahwa pada tahun 2030 realisasi pemanfaatan mencapai 8.007,7 MW (Humas EBTKE - ESDM, 2020). Peneliti dan praktisi metode-metode elektromagnetik kebumian dapat memerankan peran penting dalam proses peningkatan kapasitas realisasi ini, yaitu dengan memberikan informasi konstrain geometris yang lebih akurat yang sangat bermanfaat dalam penentuan cadangan energi panas bumi, rekomendasi penempatan sumur injeksi maupun produksi serta rencana-rencana pengembangan PLTP lainnya.

2. KLASIFIKASI METODE-METODE ELEKTROMAGNETIK

Berdasarkan bagaimana medan elektromagnetik (EM) dibangkitkan maka metode-metode elektromagnetik pada sains dan teknologi kebumian dapat dibagi ke dalam dua kategori yaitu metode pasif dan metode aktif. Klasifikasi ini dapat disimpulkan dari beberapa sumber rujukan klasik maupun relatif baru (misal: Cagniard, 1953; Nabighian, 1987; Nabighian, 1991; Simpson dan Bahr, 2005; Kirsch, 2009). Metode pasif memanfaatkan medan EM primer yang secara alami datang dari angkasa menuju permukaan bumi dan sebagian diteruskan ke dalam bumi. Medan EM primer menginduksi medan sekunder di bawah permukaan dan medan total hasil superposisi medan primer dan medan sekunder diterima oleh *receiver* di permukaan. Medan EM primer yang bervariasi terhadap waktu ini dapat dianggap berbentuk sinusoidal dan

beroperasi dalam rentang frekuensi yang cukup lebar. Untuk frekuensi < 1 Hz, medan primer dibangkitkan oleh adanya interaksi antara angin matahari dengan medan magnet bumi di magnetosfer. Angin matahari adalah aliran plasma partikel bermuatan seperti proton dan elektron yang dikeluarkan oleh korona matahari. Aktivitas badai petir di ruang antara permukaan bumi dan lapisan ionosfer menjadi pembangkit medan EM berfrekuensi > 1 Hz. Di suatu titik di permukaan bumi medan EM yang datang dapat dianggap sebagai gelombang bidang mengingat jauhnya dari sumber eksitasi gelombang EM primer. Sesuai namanya, metode EM aktif memanfaatkan sistem instrumentasi *transmitter* buatan untuk membangkitkan sinyal. Transmitter dapat dibuat secara galvanik berupa kawat yang dialiri arus dan ujung-ujungnya ditanahkan. Panjang kawat dapat bervariasi dari beberapa meter hingga beberapa kilometer. *Transmitter* juga dapat dibuat secara induktif dengan meletakkan suatu kumparan (koil) yang dialiri arus baik berorientasi vertikal maupun horizontal.

Metode magnetotellurik (MT) dengan frekuensi pengukuran dalam rentang 10^{-4} hingga 10^4 Hz serta metode *audio-frequency magnetotelluric* (AMT) dengan frekuensi pengukuran dalam rentang sekitar 1 hingga 10^4 Hz termasuk tipe metode EM aktif, sedangkan metode *controlled-source audio-frequency magnetotelluric* (CSAMT) merupakan salah satu contoh metode EM aktif. Pada Metode MT, AMT dan CSAMT, data awal berupa variasi medan listrik dan medan magnet horizontal total di permukaan ditambah satu komponen medan magnet vertikal. Transformasi fourier

kemudian dilakukan pada data tersebut untuk mendapatkan data dalam bentuk resistivitas semu terhadap frekuensi dan fasa impedansi terhadap frekuensi. Ketiga metode yang disebutkan di atas digolongkan juga dalam metode EM domain frekuensi, dilihat dari bentuk gelombang primer sinusoidal yang dibangkitkan serta dari terukurnya medan total pada *receiver*. Jika yang dibangkitkan pada *transmitter* adalah gelombang kotak (misalnya gelombang kotak *half-duty cycle*) di mana arus bernilai tetap tiba-tiba dimatikan dan respons EM transien (terutama medan magnet) kemudian diukur pada *receiver* pada saat arus dalam keadaan mati tersebut. Berdasarkan hukum Faraday, perubahan medan magnet (yang tadinya bernilai tetap ketika arus menyala dan kemudian berubah) akan menyebabkan sistem arus sekunder pada material bumi dekat *transmitter*. Sistem arus sekunder ini menyebabkan munculnya medan magnet sekunder yang mengalami perubahan juga akibat disipasi arus sekunder dalam material bumi. Proses ini terus berulang hingga kita dapatkan kurva transien atau peluruhan nilai medan magnet sekunder seiring waktu. Fenomena inilah yang mendasari metode EM domain waktu yang dikenal dengan *time-domain electromagnetic* (TDEM) atau *transient electromagnetic* (TEM). Konfigurasi pengukuran metode TDEM dapat bervariasi semisal *concentric transmitter-receiver loops* (*transmitter* berbentuk kumparan besar dengan kumparan kecil *receiver* berada di tengah secara konsentris. Konfigurasi lain misalnya *horizontal electric dipole* (HED) di mana kawat berarus yang ujungnya ditanahkan difungsikan

sebagai *transmitter*. Panjang *transmitter* sekitar 1 - 2 km dan jarak *receiver* berkisar 2 - 8 km (Srigutomo dkk., 2008). Jika panjang *transmitter* lebih besar dari jarak titik tengah *transmitter* ke *receiver* maka konfigurasinya disebut *long grounded wire*. Data dalam metode TDEM biasanya berupa kurva transien atau peluruham medan magnet terhadap waktu ataupun kurva peluruhan turunan medan magnet terhadap waktu. Secara umum metode-metode EM aktif dapat mempertinggi rasio S/N karena sumbernya dapat dikendalikan dan umumnya pula metode-metode TDEM memiliki keuntungan dari sisi tak terukurnya medan EM primer pada data yang amplitudonya jauh lebih besar dari medan EM sekunder.

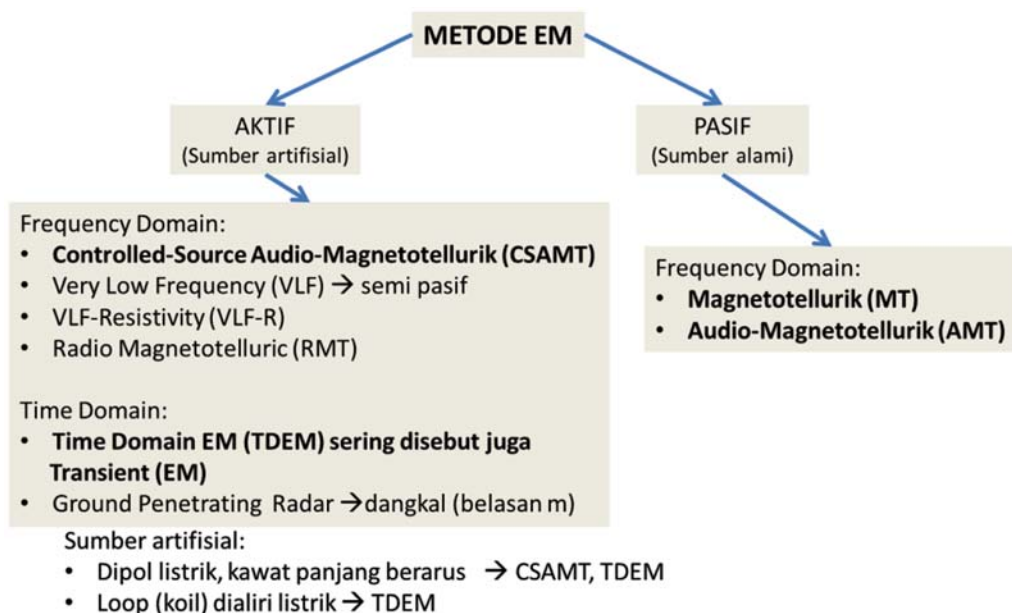
Tipe metode EM domain frekuensi lainnya adalah metode VLF (*Very Low Frequency*) menggunakan sinyal *transmitter* radio dengan panjang gelombang yang sangat panjang. *Transmitter* terdistribusi di berbagai tempat di dunia dan sinyalnya terutama digunakan untuk navigasi dan komunikasi laut militer maupun sipil. Frekuensi transmisi sinyal EM berkisar 15 - 25 kHz dengan daya pemancar berkisar antara 100 - 1000 kW. Metode VLF dikelompokkan menjadi dua tipe berdasarkan parameter yang diukur. Tipe pertama hanya mengukur komponen medan-medan magnet yang terpolarisasi elips, disebut sebagai metode VLF-EM atau VLF saja. Tipe kedua berkaitan dengan pengukuran komponen medan listrik horizontal dan komponen medan magnet horizontal yang orthogonal terhadap medan listrik sehingga memungkinkan untuk menghitung resistivitas semu dan fase impedansi di permukaan. Spasi

antar elektroda medan listrik sekitar 1 - 5 meter. Tipe ini disebut VLF-R atau terkadang disebut sebagai metode VLF-MT karena menerapkan formulasi seperti yang digunakan dalam metode magnetotellurik (MT). Jika digunakan rentang frekuensi radio yaitu 10 - 300 kHz, maka metodenya disebut dengan radio-magnetotellurik (RMT). Data pada metode EM domain frekuensi maupun domain waktu perlu ditransformasi secara numerik menjadi informasi spasial distribusi konduktivitas listrik permukaan melalui suatu proses yang disebut pemodelan inversi. Secara sederhana, rangkuman klasifikasi metode-metode EM untuk kajian sains dan eksplorasi kebumihan diperlihatkan pada Gambar 3.

Salah satu metode pengukuran EM lainnya yang penting untuk aplikasi sangat dangkal dalam orde beberapa centi hingga belasan meter adalah *ground penetrating radar* (GPR). GPR merupakan metode geofisika di mana unit *transmitter* memancarkan pulsa EM pendek dari spektrum radio yaitu pada frekuensi ultra-tinggi (UHF) pada puluhan MHz hingga frekuensi sangat tinggi (VHF) pada beberapa GHz. Unit *receiver* mendeteksi sinyal yang dipantulkan dari struktur bawah permukaan. Pulsa EM dengan periode beberapa puluh nanodetik merambat dalam bentuk kerucut. Efektifitas metode ini didasarkan pada prinsip perbedaan kecepatan cahaya dalam berbagai jenis material tanah yang berbeda. Prinsip-prinsip yang terlibat sangat identik seismologi refleksi, kecuali bahwa pada metode GPR digunakan energi elektromagnetik alih-alih

energi akustik, dan refleksi sinyal muncul pada bidang batas antara bahan dengan konstanta dielektrik yang berbeda alih-alih antara bahan dengan impedansi akustik yang berbeda.

Kategorisasi lainnya adalah berdasarkan letak sistem sistem pengukuran atau *receiver* berada. Semua yang dibahas sebelumnya adalah system pengukuran di darat (*land-based EM methods*). Survey EM dapat juga dilakukan di udara (*airborne EM*) dengan pesawat terbang penulisp tetap maupun helikopter pada ketinggian beberapa puluh meter dari permukaan. Sistem *transmitter-receiver* dibawa terbang bersamaan dan modus pengukuran dapat dilakukan dalam domain frekuensi maupun domain waktu.



Gambar 3. Klasifikasi sederhana metode-metode elektromagnetik ke dalam metode aktif dan pasif serta metode domain frekuensi dan domain waktu.

3. REKAM JEJAK PENULIS DAN TIM PADA SUB-KK INDUKSI ELEKTROMAGNETIK KK FISIKA BUMI DAN SISTEM KOMPLEKS

3.1. Penelitian dan Fokus Bidang Kepakaran

Fisika adalah salah satu bidang ilmu yang mempelajari atau memodelkan perilaku atau fenomena alam semesta termasuk di dalamnya Bumi sebagai suatu sistem fisis. Bidang yang penulis geluti sejak penulis berkarir menjadi staf akademik di ITB adalah Fisika Bumi yang sekarang terhimpun dalam KK Fisika Bumi dan Sistem Kompleks, FMIPA - ITB. Fisika Bumi terkait dengan penggunaan prinsip-prinsip kuantitatif fisika dalam memahami sistem Bumi. Terkait dengan ini, bidang khusus atau keahlian yang penulis tekuni adalah pemodelan dan inversi respons fisis bumi terutama respons elektromagnetik. Pemodelan atau tepatnya pemodelan *ke-depan* terkait dengan perhitungan teoretik-numerik dengan berbasis nilai-nilai parameter fisis dalam suatu domain (bawah permukaan) yang diketahui dan menghitung prediksi nilai respons atau data yang akan terukur dipermukaan. Sedangkan konsep inversi atau tepatnya *pemodelan inversi* terkait dengan upaya estimasi nilai-nilai parameter fisis di bawah permukaan berdasarkan data terukur di permukaan. Inversi merupakan tahap inti dari interpretasi data kebumian.

Metode-metode numerik yang penulis tekuni dalam konteks

pemodelan terutama metode-metode persamaan differensial (*finite-difference* [FD] dan *finite-element* [FE]) serta juga metode persamaan integral. Pemodelan numerik yang digeluti dapat dianggap sebagai *tool* untuk memahami berbagai fenomena maupun masalah-masalah fisis. Prinsip-prinsip fisika yang sering dilibatkan mencakup berbagai bidang di antaranya elektromagnetisme (metode *magnetotelluric* [MT] (Srigutomo & Sutarno, 1998; Martakusumah & Srigutomo, 2012), metode *controlled-source audio-magnetotelluric* [CSAMT] (Mohammad dkk., 2013; Qausar dkk., 2015), metode *time-domain electromagnetic* [TDEM] (Srigutomo dkk., 2005; Srigutomo dkk., 2008; Hapsoro dkk., 2018), metode *very low frequency* [VLF] (Srigutomo dkk., 2005; Harja dkk., 2016), metode *ground penetrating radar* [GPR] (Srigutomo dkk., 2016), resistivitas DC (Srigutomo dkk., 2015; Srigutomo dkk., 2019), magnetik (Huliselan dkk., 2010; Djamal dkk., 2015; Djamal dkk., 2016), gayaberat (*gravity*) (Putra, dkk., 2017; Srigutomo dkk., 2019; Darisma dkk., 2017), *self-potential* [SP] (Candra, dkk., 2014; Fajriani dkk., 2017; Srigutomo dkk., 2006; Srigutomo dkk., 2010), serta propagasi seismik (Srigutomo dkk., 2018). Adapun nilai manfaat dari bidang yang penulis tekuni, selain mempertajam khazanah pemahaman metode-metode numerik secara teoretik dan komputasional (Martakusumah dan Srigutomo, 2012; Srigutomo dkk., 2019; Heriyanto, & Srigutomo, 2017), juga sangat aplikatif untuk studi kegunungapian (Srigutomo dkk., 2008; Harja dkk., 2016; Srigutomo dkk., 2010), model aliran panas cekungan (Setya dkk., 2016), eksplorasi panasbumi (Qausar dkk., 2015; Srigutomo

dkk., 2008; Hapsoro dkk., 2018; Setya D.H. dkk., 2016), eksplorasi sumber daya alam (airtanah (Pratama & Srigutomo, 2015; Harja dkk., 2007), bahan tambang (Srigutomo & Pratomo, 2016), studi kuantitatif struktur geologi bawah permukaan, kajian lingkungan (Srigutomo dkk., 2016), *carbon storage and sequestration* [CCS] (Srigutomo dkk., 2015), serta fisika cuaca (Sulistiyowati dkk., 2016; Sulistiyowati dkk., 2015) dan fisika ionosfer (Abadi dkk., 2014). Baru-baru ini, Halawa (2022) bersama penulis dan kolega lainnya menerapkan analisis *support vector regression* (SVR) pada data konsentrasi karbon monoksida (CO) di salah satu zona di kota Bandung sebagai salah satu upaya memahami dan memprediksi kadar CO sebagai di kota Bandung yang dipengaruhi aktivitas manusia.

Jejak pertama karya ilmiah penulis dimulai dengan penggunaan metode integral untuk pemodelan respons EM Bumi 2D (Srigutomo dkk., 1997), kemudian berlanjut dengan metode differensial FE untuk kasus gelombang bidang (MT) (Srigutomo & Sutarno, 1998) dan kasus dengan sumber artifisial (Sutarno & Srigutomo, 1998) disertai kolaborasi dengan sejawat mendesain perangkat interpretasi MT melalui skema inversi (Mustopa dkk., 1997). Studi berikutnya dikembangkan untuk persoalan pemodelan TDEM 3D dengan skema *staggered-grid finite-difference time-domain* (FDTD) (Srigutomo & Kagiya, 2003) serta inversi 1D data TDEM serta aplikasinya dalam studi kegunugapian dan panasbumi (Srigutomo dkk., 2005; Srigutomo dkk., 2008). Secara parallel, transformasi dan inversi 2D data VLF berbasis metode FE juga dikembangkan untuk kajian

airtanah dan lingkungan. Selain itu, interpretasi numerik dengan inversi untuk data SP juga dilakukan untuk kasus geometri tetap (Candra dkk., 2014; Fajriani dkk., 2017; Srigutomo dkk., 2006).

Setelah menjabat Lektor Kepala, fokus bidang yang ditekuni diperdalam dan diperluas. Misalnya pemodelan terintegrasi metode resistivity DC, SP dan geokimia untuk interpretasi kondisi aliran hidrotermal dangkal gunungapi (Srigutomo dkk., 2010). Pengembangan lainnya adalah interpretasi struktur resistivitas bawah permukaan sistem panasbumi dengan menggunakan inversi 2D data CSAMT (Mustopa dkk., 2011). Berikutnya adalah pengembangan formulasi *full-solution* CSAMT dan skema inversinya (Mohammad dkk., 2013) sebagai upaya mengoptimalkan ekstraksi informasi data juga telah dilakukan.

Penguatan fisika kebumian di atas permukaan sebagai bagian dari sistem fisis Bumi juga dilakukan dengan mengkaji fenomena *plasma bubble* pada ionosfer di lintang rendah di Indonesia (Abadi dkk. 2014) yang merupakan kolaborasi dengan LAPAN dan Electronic Navigation Research Institute (ENRI), Chofu, Tokyo, Japan. Di lain pihak, kajian data kebumian juga terkait dengan kemampuan instrumentasi sebagai sarana pendukung akuisisi data.

Kolaborasi dengan subKK Instrumentasi Fisika telah berhasil mendesain sistem instrumentasi pengukuran percepatan gravitasi yang akurat (Khairurrijal dkk, 2012) serta fluxgate magnetometer yang cukup sensitif untuk mengukur medan magnet yang disebabkan benda-benda

termagnetisasi di bawah permukaan (Djamal dkk., 2015; Djamal dkk., 2016) serta sistem sensor CO₂ dengan *thermopile* (Febrina dkk., 2019). Pengembangan sistem instrumentasi terintegrasi yang memadukan aspek akuisisi dan aspek interpretasi numerik yang simultan sehingga lebih efektif dan efisien dari segi perangkat maupun waktu untuk metode geolistrik DC dan seismik refraksi juga telah dicoba untuk dilakukan sebagai hasil riset pembimbingan mahasiswa S3 (Imaduddin dkk., 2019).

Seiring dengan roadmap KK yang membuka ruang kajian kebumihan sebagai suatu sistem kompleks, analisis multifraktal untuk aplikasi lingkungan gambut telah dilakukan (Sampurno dkk. 2016). Analisis fraktal juga diterapkan untuk memahami karakteristik morfologi permukaan zona panasbumi dan non-panasbumi (Sampurno dkk., 2018).

Salah satu aspek kajian yang termaktub dalam roadmap KK adalah Fisika Bencana Alam. Realisasi yang penulis lakukan berbekal kemampuan pemodelan numerik dan visualisasi adalah pembuatan model longsor tanah untuk merekonstruksi kejadian longsor (Saepuzaman dkk., 2017) serta prediksi model jatuhnya bongkah batu besar untuk mitigasi (Nugraha dkk., 2017). Selain mengembangkan pemodelan numerik berbasis *grid* atau *mesh* (FD dan FE) pemodelan tak ber-*grid* namun berbasis partikel Lagrangian yaitu *smoothed particle hydrodynamics* (SPH) telah juga dicoba untuk memodelkan dinamika aliran fluida ketika tsunami maupun *dam-break* (Srigutomo dkk., 2017).

Studi skema inversi berbasis algoritma deterministik beresiko solusi

terjebak dalam minimum lokal, oleh karenanya mulai dikembangkan inversi dengan algoritma stokastik terkait solusi minimum global seperti *very fast simulated annealing* [VFSA] (Srigutomo dkk., 2019) dan *particle swarm optimization* [PSO] (Darisma dkk., 2017). Penerapan skema inversi PSO juga telah dapat diterapkan untuk kasus TDEM yang diukur di lingkungan gunung api (Hapsoro dkk., 2021) demikian juga skema inversi VFSA (Srigutomo dkk., 2021).

3.2. Kerjasama dan Pengabdian kepada Masyarakat

Pengembangan wawasan dan jejaring riset dan kolaborasi merupakan hal yang penting bagi perkembangan staf dosen maupun peneliti. Tahun 2005-2006 peneliti menjadi *visiting researcher* di Geothermal Research Institute, Graduate School of Science, Kyoto University di bawah supervisi Prof. Tsuneomi Kagiya. Kolaborasi riset dengan institut ini berlanjut hingga 2008 (Srigutomo dkk., 2008) dan kembali dihidupkan pada tahun 2020 hingga sekarang (Hapsoro dkk., 2021; Srigutomo dkk., 2021). Mulai tahun 2013 kolaborasi dengan Environmental Resources Engineering, Faculty of Science and Engineering, Waseda University untuk penelitian metode *Time-domain Electromagnetic* (TDEM) untuk *carbon storage and sequestration* (CCS) bersama FTTM-ITB dan JICA. Sejak tahun 2013 juga berkolaborasi dengan LAPAN (Dr. Prayitno Abadi) dengan topik fisika ionosfer. Tahun 2014 hingga sekarang penulis berkolaborasi dengan pihak Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (Dr. Hendra Gunawan) dengan tema pemodelan dan inversi data kegunungapian untuk

investigasi mekanisme erupsi. Penulis juga saat ini Ketua organisasi profesi Physical Society of Indonesia (PSI), anggota Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI), anggota Society of Exploration Geophysicists (SEG berpusat di USA) dan anggota International Geothermal Association (IGA berpusat di Jerman).

Pengabdian kepada masyarakat merupakan salah satu fungsi perguruan tinggi dan inherent juga dengan misi ITB yaitu menciptakan, berbagi dan menerapkan ilmu pengetahuan, teknologi, seni dan kemanusiaan serta menghasilkan sumber daya insani yang unggul untuk menjadikan Indonesia dan dunia lebih baik. Terkait dengan hal ini, bidang yang penulis geluti yaitu pemodelan dan inversi respons sistem fisis bumi sering bermanfaat bagi kalangan pemerintah, swasta dan industri. Salah satu bentuk kontribusinya berupa keterlibatan dalam proses pengolahan data dan interpretasi numerik bidang kebumihan, terutama yang terkait dengan eksplorasi sumberdaya alam seperti airtanah, potensi panas bumi maupun minyak bumi. Pada bidang kebudayaan, bidang yang penulis geluti bermanfaat pula dalam kajian kondisi benda/bangunan cagar budaya melalui teknik-teknik *non-destructive*.

4. STUDI KASUS APLIKASI METODE-METODE ELEKTROMAGNETIK KEBUMIHAN

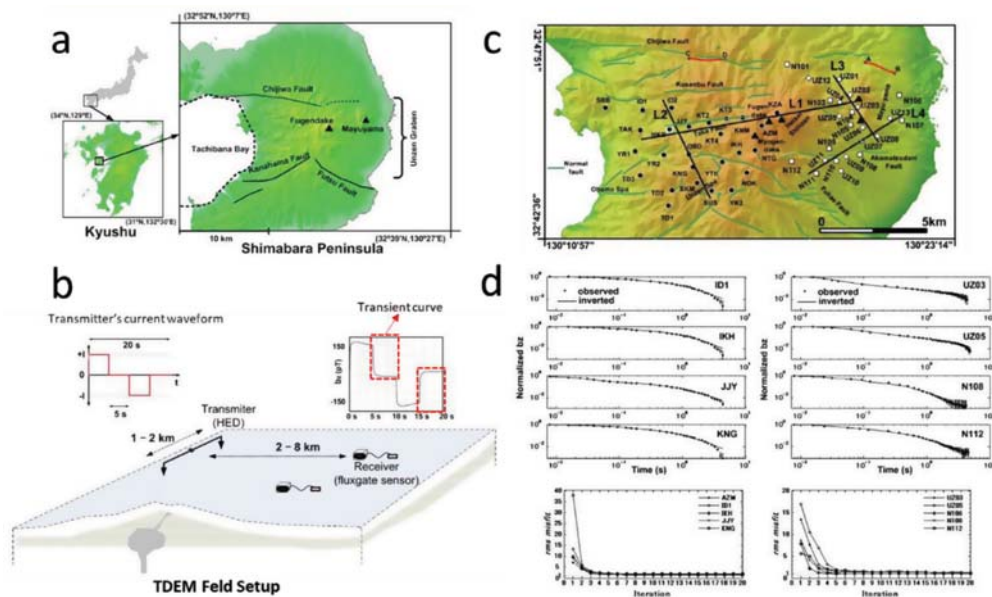
4.1. Metode TDEM untuk studi kegunungapian

Survei elektromagnetik domain waktu (TDEM) dilakukan di sekitar gunung api Unzen, Semenanjung Shimabara, Baratdaya Jepang pada tahun 2001 dan 2002 di bagian timur semenanjung. Survei ini merupakan rangkasan penuntasan dan pelengkap dari data TDEM yang telah diinterpretasi sebelumnya dari survei tahun 1995 di bagian barat semenanjung. Skema inversi Occam (Constable dkk., 1987) dari medan magnet transien yang direkam menghasilkan fitur umum struktur resistivitas bawah permukaan yang terdiri dari tiga lapisan utama: lapisan permukaan resistif, lapisan konduktif ($< 10 \text{ } \Omega\text{m}$) dari sekitar elevasi permukaan laut hingga 2,5 km di bawah permukaan, dan lapisan ketiga yang resistif (Srigutomo dkk., 2008). Lapisan konduktif di atas ditafsirkan sebagai kompleks lapisan tersaturasi air dan lapisan teralterasi hidrotermal yang terdistribusi secara luas di bawah Semenanjung Shimabara. Distribusi konduktansi spasial menunjukkan pola memanjang konduktansi tinggi berarah barat-timur dari Teluk Tachibana ke puncak Unzen (Fugen-Dake). Fitur konduktansi ini mengindikasikan bahwa gas vulkanik disuplai ke lapisan dangkal di bagian barat semenanjung, sesuai dengan jalur migrasi magma yang berasal dari studi seismik dan deformasi. Zona konduktansi tinggi lainnya juga ditemukan di dekat gunung Mayu-Yama di bagian timur Semenanjung Shimabara,

menunjukkan proses *degassing* magma karena kemungkinan adanya sistem magma di bawah gunung.

Gambar 4 menunjukkan lokasi Semenanjung Shimabara di Baratdaya Jepang, konfigurasi pengukuran survey TDEM menggunakan *horizontal electric dipole (HED) transmitter*, distribusi titik-titik pengukuran (*receiver*) dan lokasi *transmitter*. Arus yang dapat diinjeksikan pada survey ini berkisar dari 7 A hingga 17 A bergantung pada resistansi tanah pada ujung-ujung *transmitter* yang ditanahkan. Ditunjukkan pula kurva-kurva perbandingan data observasi dan data kalkulasi hasil inversi beserta *root mean square error* pada setiap iterasi inversi yang mengindikasikan derajat kepercayaan terhadap model resistivitas bawah permukaan yang dihasilkan.

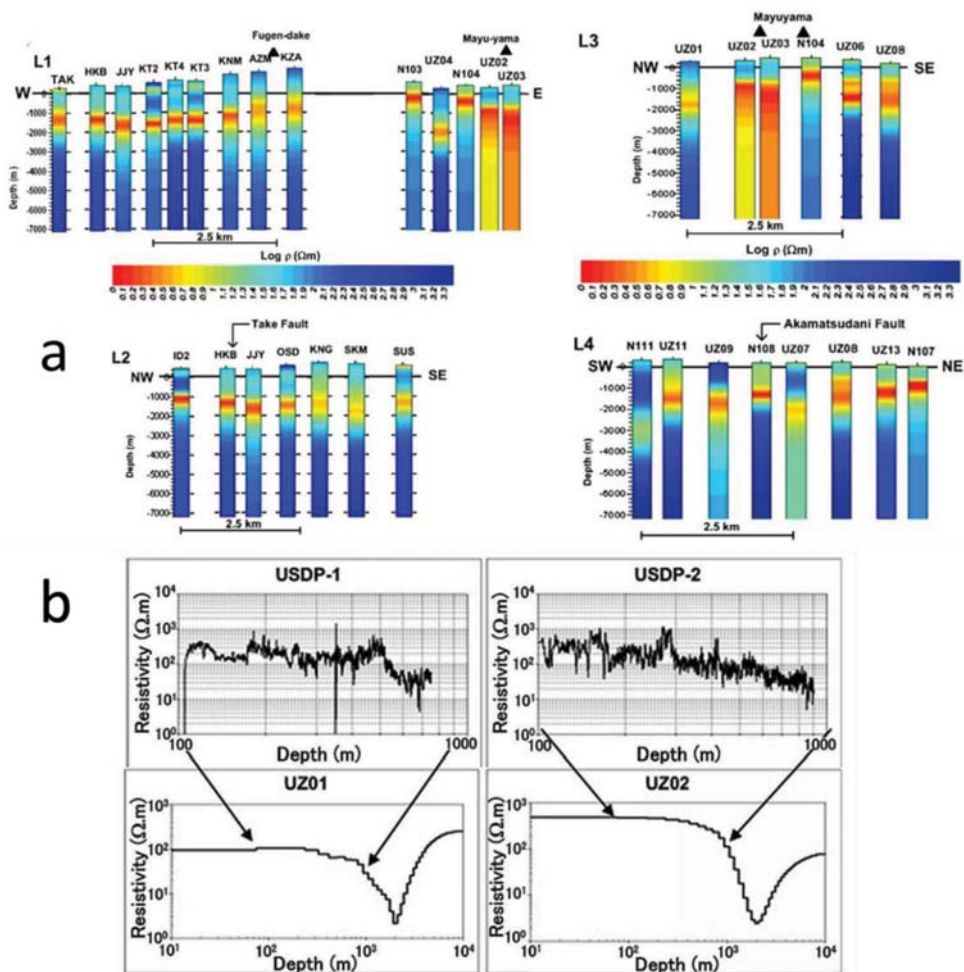
Profil nilai-nilai resistivitas listrik (kebalikan dari konduktivitas listrik) bawah permukaan diperlihatkan pada Gambar 5a. Perbandingan antara profil resistivitas hasil *sounding* TDEM pada dua titik pengukuran memiliki pola yang hampir sama dengan orde nilai yang konsisten ketika dibandingkan dengan nilai resistivitas dari pemboran (Gambar 5b).



Gambar 4. (a) Lokasi pengukuran di Kyusu, Baratdaya Jepang. (b) Ilustrasi konfigurasi pengukuran TDEM. (c) Distribusi lokasi *receiver* serta lokasi *transmitter* HED. (d) Perbandingan data observasi dan data kalkulasi hasil inversi serta nilai rms selama iterasi pada proses inversi (Srigutomo dkk., 2008).

Inversi optimasi global dari data elektromagnetik domain waktu (TDEM) diimplementasikan juga melalui penerapan algoritma *particle swarm optimization* (PSO). Pendekatan probabilistik ini merupakan alternatif dari pendekatan optimasi lokal deterministik yang banyak digunakan. Dalam algoritma PSO, setiap partikel yang membentuk swarm melambangkan kemungkinan model geofisika bawah permukaan yang terdiri dari nilai resistivitas bawah permukaan pada beberapa lapisan dan ketebalan lapisan. Perumusan ke depan TDEM untuk menghitung komponen vertikal medan magnet yang diinduksi pertama kali dinyatakan dalam domain Laplace. Transformasi medan magnet dari

domain Laplace ke domain waktu dilakukan dengan menerapkan metode numerik Gaver-Stehfest.

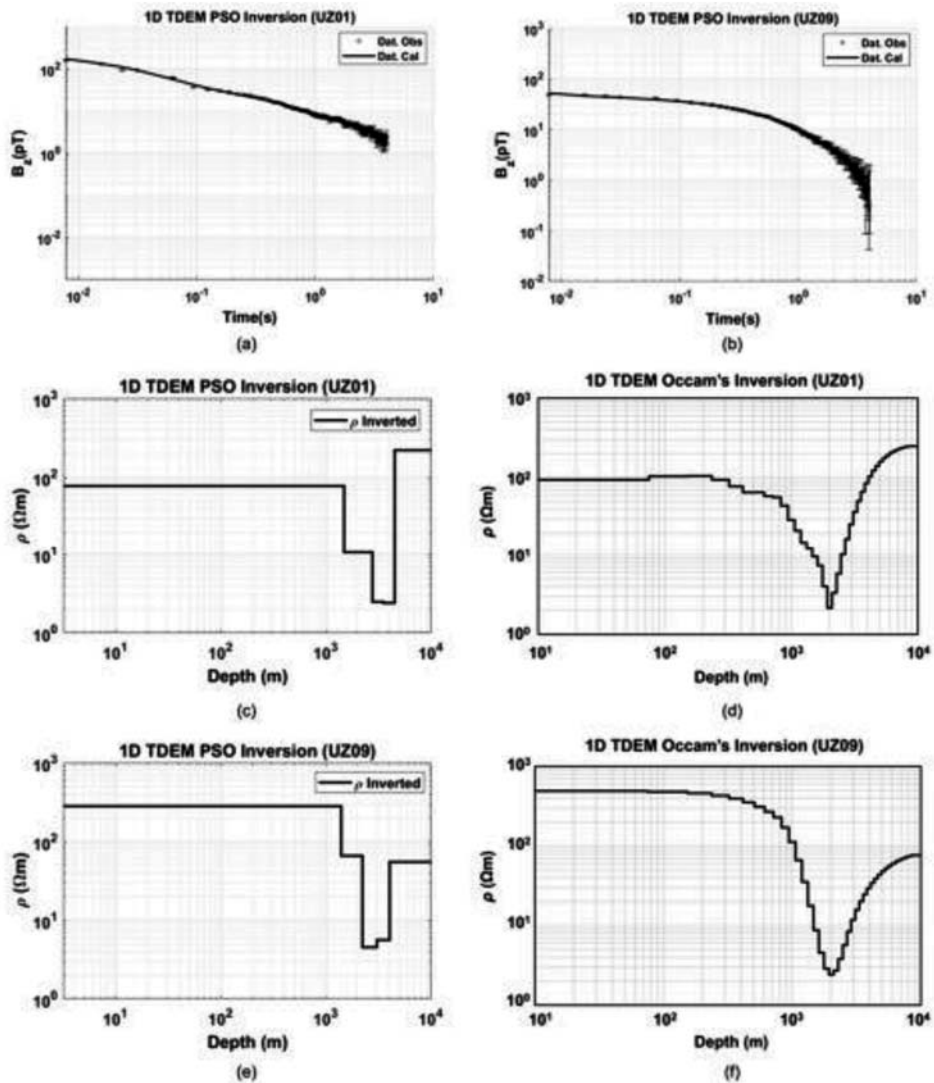


Gambar 5. (a) Profil resistivitas pada beberapa lintasan yang tersusun dari beberapa titik pengukuran TDEM (c) Distribusi lokasi *receiver* serta lokasi *transmitter* HED. (d) Perbandingan data observasi dan data kalkulasi hasil inversi serta nilai rms selama iterasi pada proses inversi

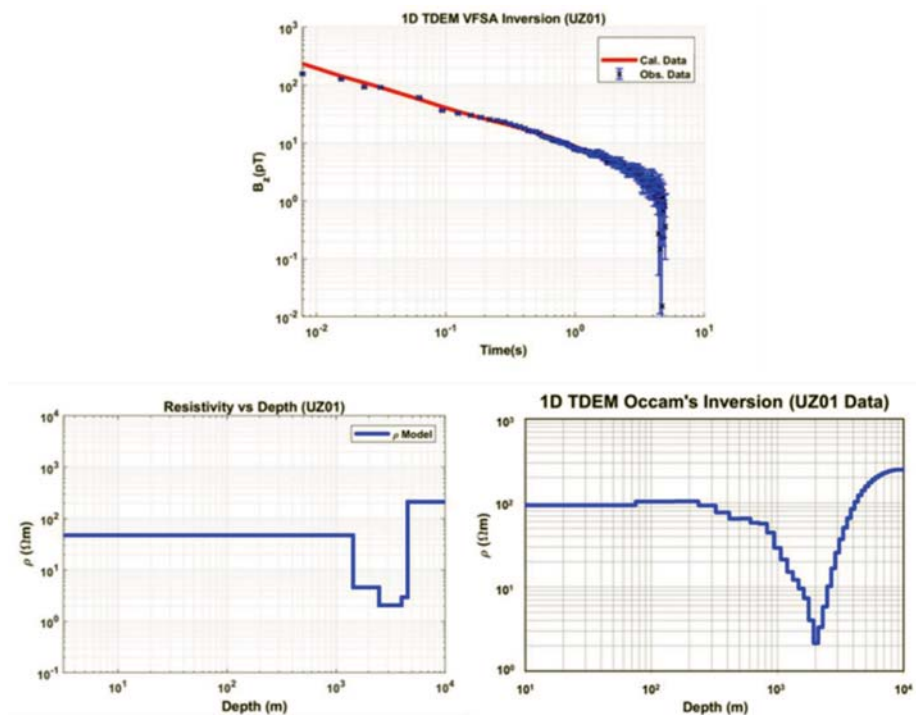
Implementasi inversi PSO ke dalam persoalan inversi TDEM cukup efisien, hanya membutuhkan penyesuaian beberapa parameter inversi

seperti inersia, koefisien percepatan dan jumlah iterasi dan jumlah partikel. Skema inversi PSO diuji pada data sintetik bebas *noise* dan data sintetik ber-*noise* serta pada data lapangan yang direkam di area vulkanik-geothermal. Hasilnya menunjukkan bahwa skema inversi PSO dapat secara efektif menyelesaikan masalah bumi berlapis TDEM 1-D (Hapsoro dkk., 2021). Contoh dari hasil inversi PSO ini diperlihatkan pada Gambar 6, termasuk perbandingan model resistivitas bawah permukaan dengan metode inversi Occam (Srigutomo dkk., 2008).

Skema inversi stokastik nonlinier, yang disebut *very fast simulated annealing* (VFSA), diterapkan juga pada data elektromagnetik domain waktu (TDEM) yang dihasilkan dalam suatu konfigurasi pengukuran *transmitter* HED (Srigutomo dkk., 2021). Formulasi ke depan medan magnet vertikal dinyatakan dalam domain Laplace dengan menerapkan transformasi integral Hankel. Transformasi ke dalam domain waktu dilakukan dengan menerapkan *inverse Laplace transform* menggunakan algoritma Gaver-Stehfest. Pada penelitian ini, untuk data sintetik bebas *noise*, skema VFSA menghasilkan misfit terkecil dan model resistivitas inversi yang menyerupai model uji. Penambahan 5% *noise* acak pada data sintetik menghasilkan tingkat *misfit* yang sama dan model yang masih menyerupai model uji. Namun, penambahan *noise* 10% pada data sintetik menghasilkan nilai *misfit* tiga kali lipat dari dua nilai pertama dan model resistivitas dengan perbedaan yang besar dengan model uji, terutama pada kedalaman yang besar.



Gambar 6. Perbandingan antara data observasi dan data kalkulasi pada inversi PSO untuk dua buah titik pengukuran TDEM di Unzen, Jepang (panel atas), perbandingan model resistivitas bawah permukaan dan ketebalannya dari hasil inversi PSO (Hapsoro dkk., 2021) dengan inversi Occam dengan kendala *smoothness* (Srigutomo dkk., 2008) pada panel tengah dan bawah.



Gambar 7. Perbandingan antara data observasi dan data kalkulasi pada inversi VFSA untuk sebuah titik pengukuran TDEM di Unzen, Jepang (panel atas), perbandingan model resistivitas bawah permukaan dan ketebalannya dari hasil inversi VFSA (Srigutomo dkk., 2021) dengan inversi Occam dengan kendala *smoothness* (Srigutomo dkk., 2008) pada panel bawah.

Hasil ini menunjukkan efektivitas skema inversi VFSA untuk menyimpulkan struktur resistivitas bawah permukaan untuk data TDEM. Skema inversi ini diterapkan pada data lapangan yang diukur di lingkungan vulkanik. Pola umum struktur resistivitas yang disimpulkan oleh inversi VFSA konsisten dengan struktur yang diperoleh sebelumnya dengan menggunakan skema inversi deterministik. Contoh perbandingan data observasi dengan data kalkulasi dari skema inversi

serta model resistivitas bawah permukaan skema inversi VFSA (Srigutomo dkk., 2021) dengan skema inversi Occam (Srigutomo dkk., 2008) ditunjukkan pada Gambar 7, menunjukkan pula kesesuaian pola dan orde nilai resistivitas.

4.2. Metode TDEM untuk studi *carbon capture and storage* (CCS) di lapangan minyak Gundih, Jawa Tengah

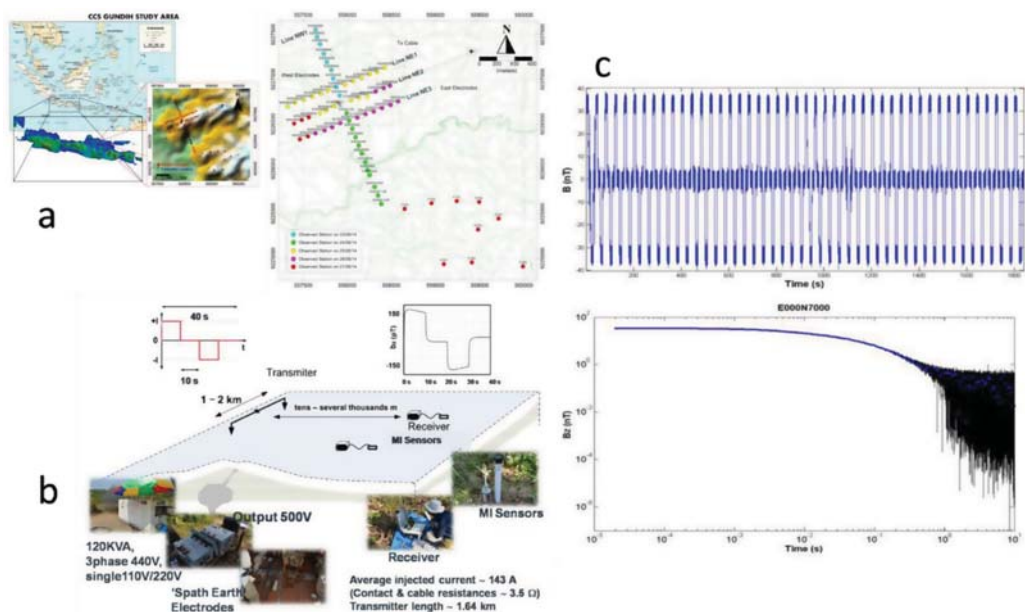
Lapangan Gundih merupakan lapangan gas bumi yang terletak di Jawa Tengah (Gambar 1) dan telah memulai berproduksi sejak akhir tahun 2013. Gas diproduksi oleh 3 struktur utama pada lapangan Gundih yaitu struktur Kedung Tuban, randu Blatung, dan Kedung Lusi. Kandungan CO₂ yang dihasilkan oleh lapangan ini mencapai 21% dari total produksi gas. Hal ini menjadi permasalahan tersendiri terkait dengan isu global tentang emisi CO₂ sehingga pemerintah melalui kementerian ESDM menerapkan kebijakan pengurangan emisi CO₂ melalui pengembangan teknologi CSS/CSU (Kementrian.ESDM, 2021). Salah satu penelitian percontohan tentang CCS yaitu pada lapangan Gundih-Cepu yang melibatkan ITB, Kyoto University (Japan), dan PT Pertamina (Persero) serta didukung oleh program SATREPS dari JICA dan JST dengan fokus penelitian penentuan lokasi penyimpanan CO₂ terbaik berdasarkan analisis data geologi dan data geofisika pada sumur target Jepon-1 dan sekitarnya (Gambar 8). Reservoir dangkal dari Formasi Ngrayong dipilih sebagai lokasi percontohan CSS dengan alasan teknik baru untuk

teknologi monitoring injeksi CO₂ lebih mudah diaplikasikan dan lebih murah pada reservoir dangkal.

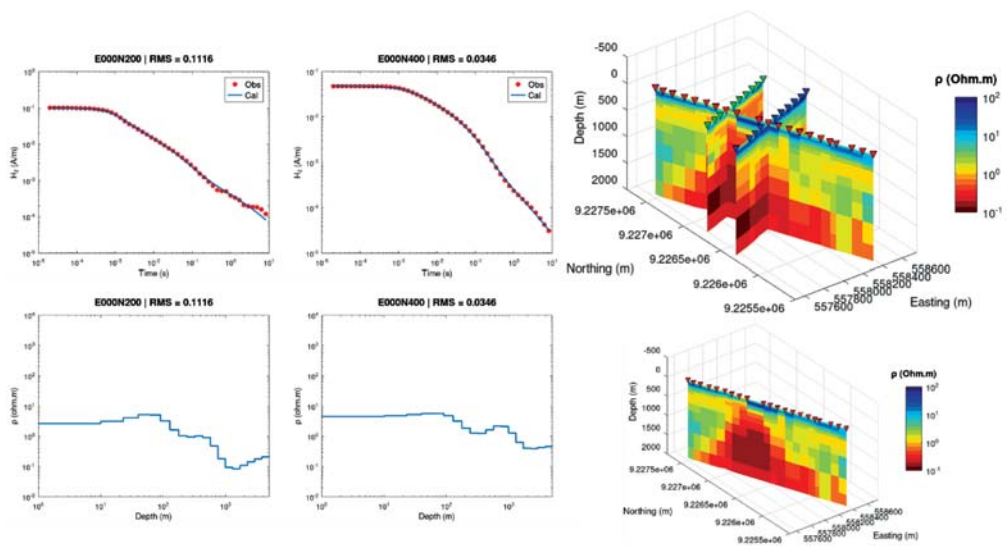
Monitoring efek injeksi CO₂ dapat dilakukan menggunakan survey resistivitas (Nakatsuka et al., 2010). Injeksi fluida resistif CO₂ pada suatu reservoir akan menggantikan fluida konduktif sehingga meningkatkan resistivitas bulk terukur. Variasi resistivitas setelah injeksi menunjukkan tingkat saturasi CO₂ dari reservoir dan distribusi spasial fluida injeksi (Kiessling et al., 2010). Perubahan resistivitas akibat injeksi CO₂ bervariasi mulai dari 0.2 sampai dengan 10 kali nilai awal (Newmark et al., 2001) sehingga membutuhkan sistem pengukuran yang sensitif dan sinyal dengan rasio S/N tinggi. Metode TDEM memenuhi persyaratan tersebut dan sangat sesuai untuk investigasi "*confined body*" seperti zona injeksi CSS. Berdasarkan Analisa data TDEM ini nantinya akan diperoleh informasi dasar distribusi resistivitas di sekitar lokasi rencana injeksi CO₂.

Pada metode TDEM, arus listrik diinjeksikan ke dalam tanah dalam interval waktu tertentu kemudian dimatikan secara tiba-tiba. Laju difusi medan magnet sekunder bergantung pada konduktivitas medium bumi. Peralatan survey TDEM yang digunakan di Cepu terdiri dari sistem *transmitter* dan *receiver* (Gambar 8). Sistem *transmitter* terdiri dari kabel transmiter dan transmiter TRM-402. Injeksi arus rata-rata selama penelitian ini adalah 143 A. Arus gelombang persegi bipolar diinjeksikan ke bumi dengan siklus hidup 50%, dimana satu siklus membutuhkan waktu 40s. Sistem *receiver* terdiri dari sensor magneto impedance (MI)

dan *receiver* TDREC-28A. Antara *transmitter* dan *receiver* tersinkronisasi melalui *GPS clock system* yang stabil (Srigutomo et al., 2015). Pengukuran TEDM sebelum injeksi CO₂ pada lapangan Gundih dilakukan pada tanggal 23-28 Agustus 2014 mencakup 66 stasiun receiver TDEM. Sekitar 40-50 siklus gelombang transien dikumpulkan pada masing-masing stasiun. Data observasi melalui proses *stacking* dan *resampling* sebelum digunakan dalam proses inversi. Lokasi survey, desain distribusi titik pengukuran di lapangan, konfigurasi sistem serta contoh data yang didapat diperlihatkan pada Gambar 8 dan model resistivitas hasil inversi diperlihatkan pada Gambar 9.



Gambar 8. Lokasi pengukuran dan desain distribusi titik-titik TDEM di Gundih, Jawa Tengah. (b) *Setup* lapangan pengukuran TDEM yang lebih mendekati konfigurasi *long grounded wire*. (c) Rangkaian siklus data dan data transient hasil *stacking* pada salah satu titik pengukuran (Srigutomo, 2015).



Gambar 9. Contoh perbandingan data observasi dengan data kalkulasi dan model resistivitas hasil inversi dengan dengan mengadopsi skema *spatially constrained inversion* [SCI] (Djaja dkk., 2022 dalam persiapan publikasi)

Sebagai bagian dari pengembangan metode-metode inversi, saat ini proses inversi dengan batasan *smoothness* secara lateral dilakukan untuk memperoleh sebaran nilai resistivitas di bawah permukaan area Gundih. Penambahan batasan lateral dilakukan dengan mengadopsi skema *spatially constrained inversion* (SCI) yang dikembangkan oleh Viezzoli et al (2008) dengan sedikit modifikasi pada aturan pembobotan pada titik stasiun terdekat. Proses inversi dengan skema SCI dilakukan secara simultan di semua titik pengukuran, sehingga model resistivitas yang dihasilkan akan lebih baik jika dibandingkan dengan melakukan *stitching* pada hasil inversi 1D yang dilakukan satu persatu. Selain hal tersebut, untuk mengoptimalkan waktu komputasi, perhitungan data kalkulasi

yang menjadi elemen penting dalam proses inversi dilakukan dengan memanfaatkan metode *adaptive born approximation* oleh Christensen (2002).

4.3. Metode MT untuk studi kegunungapian dan panas bumi

Magnetotelurik (MT) merupakan metode geofisika yang memberikan informasi mengenai distribusi konduktivitas listrik bawah permukaan bumi dengan mengukur medan listrik E dan medan magnet H alami yang bervariasi terhadap waktu di permukaan. (Cagniard, 1953; Wait, 1962; Jones, 1992). Pengolahan data MT melibatkan konsep teori medan EM, *time series analysis* serta teori sistem linier yang mereduksi variasi medan listrik dan medan magnet alami yang terekam di permukaan bumi untuk dapat mempelajari sifat kelistrikan bumi (Hermance, 1973). Pengolahan data MT pada dasarnya adalah analisis spektral untuk memperoleh fungsi transfer antara medan magnet dengan medan listrik dalam bentuk (tensor) impedansi. Dari impedansi inilah kemudian diekstrak informasi mengenai distribusi resistivitas bawah-permukaan. Selanjutnya data MT dapat diolah lebih lanjut dan diinterpretasi baik secara 1-D, 2-D, maupun 3-D. Data MT yang terekam di lapangan berupa data *time series* yang diperoleh dari dua komponen medan listrik (E_x , E_y) dan tiga komponen medan magnet (H_x , H_y , H_z). Pengukuran variasi medan magnet MT dilakukan dengan menggunakan sensor magnetik berupa sistem kumparan H_x , H_y , dan H_z , sedangkan medan listrik diukur dengan elektroda potensial (*porous-pot*) yang disusun saling tegak lurus (Gambar

10). Data *time series* tersebut ditransformasi ke dalam data domain frekuensi yaitu resistivitas dan fasa impedansi melalui transformasi Fourier.

Danau Limboto - Kawasan Pentadio terletak di Provinsi Gorontalo di lengan utara Pulau Sulawesi, Indonesia yang mengalami proses tektonik dari tumbukan Platform Sula pada pertengahan Miosen. Proses tektonik ini menyebabkan subduksi ke arah barat pada Miosen Awal dan *post-collision rifting* dan *uplifting* pada busur dan subduksi di sepanjang Palung Sulawesi Utara selama Miosen Akhir hingga Kuartar. Proses *rifting* busur Sulawesi Utara mengakibatkan terbentuknya zona graben Gorontalo yang berarah W-E. Terdapat manifestasi permukaan panas bumi di dekat Danau Limboto seperti kompleks sumber air panas dengan suhu berkisar antara 74,8° hingga 78,5°C. Untuk memahami struktur geologi dan potensi panas bumi di bawah area yang diselidiki, kami melakukan survei magnetotellurik. Model resistivitas 3D mengkonfirmasi keberadaan sistem patahan dan sistem graben yang diisi dengan tubuh konduktif (~ 1 - 15 m) yang sesuai dengan endapan aluvium. Model konseptual Danau Limboto - Pentadio dibuat berdasarkan informasi MT dan studi geologi. Model konseptual dari integrasi interpretasi geologi, geokimia dan geofisika menggambarkan sistem panas bumi di Danau Limboto - Pentadio yang dikendalikan oleh sistem sesar dan sistem graben Gorontalo (Susilawati dkk., 2022).

Gambar 11 menunjukkan lokasi Danau Pentadio - Limboto dan

distribusi titik-titik pengukuran MT. Diperlihatkan pula perbandingan kecocokan kurva data observasi dengan data kalkulasi serta struktur resistivitas 3D dan penampang lintang dalam beberapa arah.

Magnetotelluric

$$\mathbf{E} = \tilde{\mathbf{Z}}\mathbf{H} \quad \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}$$

E_x = Komponen E dalam arah x (mV/km)

E_y = Komponen medan E dalam arah y (mV/km)

H_x = Komponen medan H dalam arah x (nT)

H_y = Komponen H dalam arah y (nT)

Z_{ij} = Tensor Impedansi menghubungkan E_i ke H_j (Ohm.m)

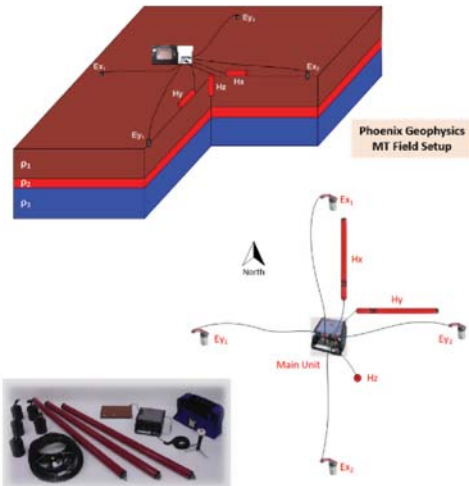
Resistivitas Semu

$$\rho_{ij} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{ij}|^2 ; i, j = x \text{ atau } y$$

$$\omega = 2\pi f$$

Fasa impedansi

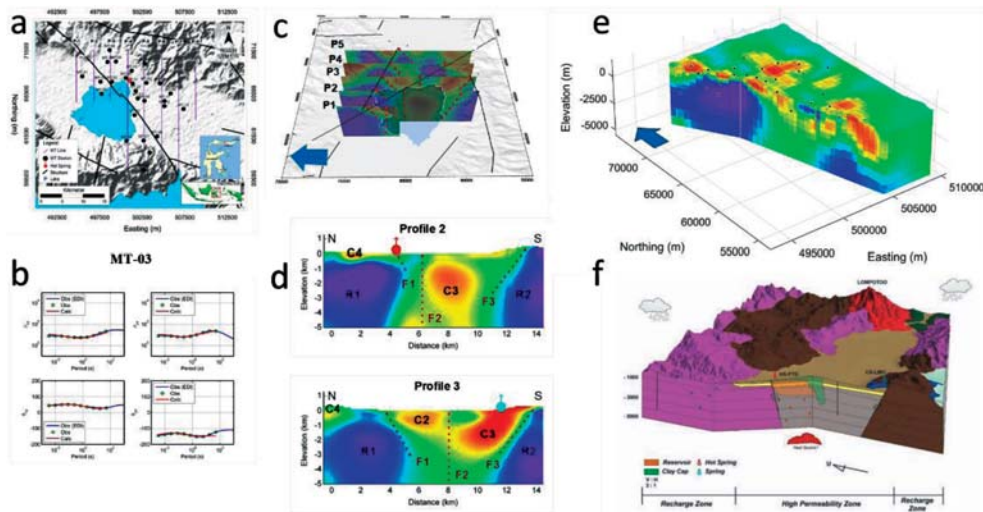
$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(Z)}{\text{Re}(Z)} \right)$$



Gambar 10. Ringkasan metode MT. Medan listrik dan medan magnet terhubung melalui suatu fungsi transfer EM yang ekuivalen dengan tensor impedansi. Ungkapan resistivitas semu dan fasa impedansi diperlihatkan juga. *Setup* pengukuran serta instrumen yang digunakan di lapangan diperlihatkan juga pada gambar ini.

Berdasarkan hasil survei metoda-metoda geofisika sebelumnya yaitu geomagnetik, gaya berat dan terutama geolistrik serta kondisi geologi daerah panas bumi di sekitar Baturraden - G. Slamet, maka didesain distribusi titik-titik pengukuran MT dan TDEM. Jumlah keseluruhan stasiun pengukuran MT dan TDEM masing-masing adalah 50 titik, membentuk grid-grid berarah barat-laut-tenggara (hampir utara-selatan) dengan jarak masing-masing titik berkisar antara 1 hingga 1.5 km. Grid-

grid ini berjajar di hampir baratdaya puncak G. Slamet (Gambar 12). Luas area yang dilingkupi distribusi titik MT ini adalah 86.42 km². Area bagian tenggara dari area MT berimpitan dengan bagian barat area yang dilingkupi oleh distribusi titik-titik geolistrik di sekitar Baturraden.

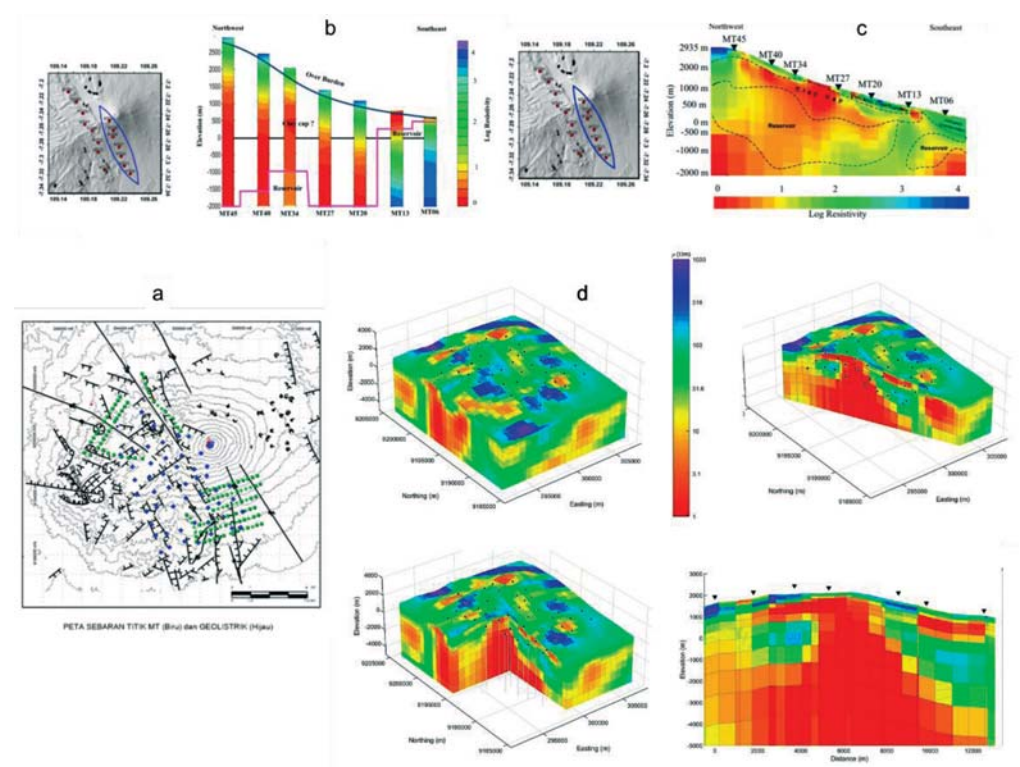


Gambar 11. (a) Peta lokasi Danau Limboto - Pentadio, Gorontalo dan distribusi titik-titik pengukuran MT. (b) Perbandingan antara data observasi dan data kalkulasi hasil inversi 3-D. (c) dan (d) Penampang lintang resistivitas pada arah-arah yang memotong jurus dari graben. (e) Blok inversi 3D dan penulisan dalam arah tertentu. (f) Model konseptual sistem panas bumi Pentadio.

Di area MT ini, titik MT13 letaknya berdekatan dengan manifestasi airpanas Pancuran 3, sedangkan titik MT12 adalah titik yang terdekat dengan airpanas Pancuran 7. Area pengukuran MT-TDEM ini juga mencakup zona sesar di bagian barat puncak G. Slamet, baik sesar yang berarah hampir baratlaut-tenggara maupun timurlaut-barat daya seperti Sesar Sigedong, Sesar Kali Gung, Sesar Gumawang, Sesar Cendana, Sesar

Slamet, Sesar Cipendong serta sesar-sesar lain yang berada di sekitar sesar-sesar tersebut.

Sistem panasbumi di daerah Baturraden - G. Slamet berada pada lingkungan vulkanik kuarter dari stratovolcano G. Slamet Tua (termasuk intrusi vulkanik dan batuan-batuan vulkanik di bawahnya), G. Slamet Muda dengan erupsi samping kerucut sinder, dan menyerupai model sistem hidrotermal vulkanik atau sistem dominasi air elevasi tinggi.



Gambar 12. (a) Profil resistivitas Gunung Slamet hasil inversi 1-D. (b) Penampang lintang resistivitas hasil inversi 2-D pada lintasan yang sama dengan lintasan 1-D (Eriani dan Srigutomo, 2016). (c). Model resistivitas 3-D bawah permukaan Gunung Slamet (Srigutomo dkk, 2022 untuk persiapan publikasi).

Struktur sesar yang berperan dalam kegiatan panas bumi daerah Baturraden - G. Slamet terdiri dari satu sesar normal dan tiga sesar mendatar normal mengontrol pemunculan G. Slamet, termasuk seluruh manifestasi airpanas Baturraden, Sigedong, Guci dan batuan terubah Sigedong - Guci. Kehadiran stuktur sesar tersebut di atas dan struktur sesar normal lainnya menjadi sangat penting sebagai pengontrol permeabilitas batuan reservoir panas bumi Baturraden - G. Slamet.

Batuan terubah Sigedong-Guci dicirikan oleh kehadiran kaolinite, hyalosite, gypsum, alunite, illite, dan paragonite. Mineral illite dan paragonite berasosiasi dengan fluida berkadar garam rendah (*relatively low salinity* $\leq 5\%$) dengan pH relatif normal, membentuk advance argillice-phyllitic type di kisaran temperatur 300 - 350°C. Pembentukan kaolinite, gypsum dan alunite (*argillic type of alteration*) dipengaruhi oleh fluida asam lemah-asam pada temperatur 80 - 180°C. Terjadi pergeseran keasaman fluida, dari pH normal ke fluida yang relatif asam.

Prospek panas bumi Baturraden - G. Slamet tergolong reservoir dominasi air panas (*hot water dominated reservoir*) dengan temperatur reservoir minimum 242°C (Geotermometer Na-K-Ca; Giggenbach, 1988). Temperatur reservoir bisa saja lebih tinggi mengingat temperatur sumber panas (*heat source*) mencapai 513°C (geotermometer gas H₂S; Giggenbach, 1988). Diagram segi tiga Cl-SO₄-HCO₃, untuk air panas Baturraden (Pancuran-7 dan Pancuran-3) mengindikasikan fluida reservoir yang didominasi air klorida, diikuti sulfat dan bikarbonat.

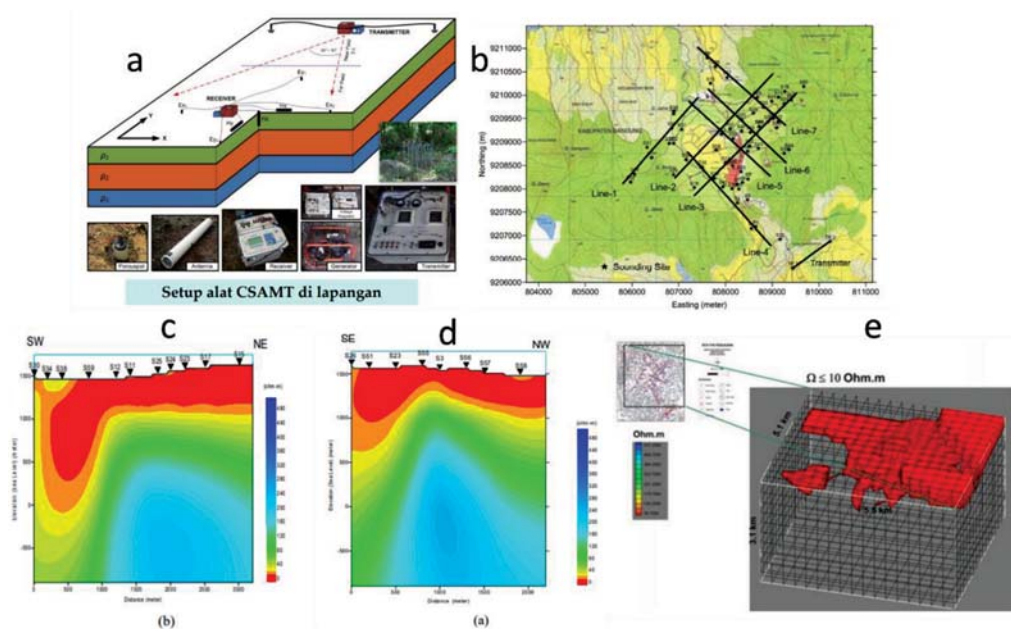
Penentuan potensi energi panas bumi Baturraden - G. Slamet dilakukan dengan “*stored heat calculation method*” yang memberikan kelas cadangan terduga (*possible reserve*) sebesar 175,24 MWe. Besaran potensi ini divalidasi melalui penghitungan dengan metoda simulasi statistik Monte Carlo yang memberikan hasil yang hampir sama, yakni cadangan terduga 193,74 MWe (*most likely*). Penegasan cadangan terduga sebesar 175 MWe adalah cukup realistis mewakili potensi panas bumi Baturraden - G. Slamet.

4.4. Metode CSAMT untuk studi kegunungapian dan panas bumi

Controlled-Source Audio Frequency Magnetotelluric (CSAMT) adalah salah satu metode elektromagnetik yang digunakan pada pencitraan distribusi konduktivitas listrik bawah permukaan bumi. Medan EM yang digunakan sebagai sumber memiliki rentang frekuensi 0,1 Hz - 10 kHz yang dibangkitkan melalui sebuah *transmitter* berupa dipol yang ditanahkan atau loop yang dibentangkan secara horizontal. Metode CSAMT telah dimanfaatkan dalam kajian eksplorasi minyak bumi (Younis dkk., 2015), kajian mineral dan logam (Garcia dkk., 2003; Sasaki dkk., 1992), penentuan struktur litologi bawah permukaan (Wang dkk., 2017), kajian air bawah permukaan (Pedrera dkk., 2016), dan penentuan potensi panas bumi (Savin dkk., 2001; Wannamaker, 1997).

Pengembangan metode CSAMT mulai dilakukan pada awal 1970-an. Hal yang menjadi latar belakang dari pengembangan metode CSAMT

adalah keterbatasan dari metode MT atau AMT yang berkaitan dengan sifat dari medan EM alami, kemampuan instrumentasi, serta biaya operasional dari akuisisi data. Medan alami yang dimanfaatkan oleh metode MT dan AMT memiliki arah dan besar medan yang bervariasi (Zonge dan Hughes, 1991) sehingga konsistensi kualitas data tidak terjamin. Selain itu, lemahnya medan alami menyebabkan sensor dan instrumen sulit untuk mendeteksi medan tersebut (Strangway dkk., 1973). Kondisi medan yang lemah juga berkaitan dengan waktu akuisisi data MT yang mencapai 5 sampai 10 jam sehingga biaya operasional cukup tinggi (Zonge dan Hughes, 1991).



Gambar 13. (a) *Setup* alat CSAMT di lapangan. (b) Peta lokasi titik-titik pengukuran CSAMT dan letak *transmitter*. (c) dan (d) Contoh penampang resistivitas bawah permukaan untuk dua buah lintasan yang berbeda. (e) Interpolasi 3-D struktur resistivitas dalam zona resistivitas rendah (<10 ohm.m)

Hal utama yang membedakan metode MT dan AMT dengan metode CSAMT adalah pada CSAMT diperlukan *transmitter* buatan. Jarak antara *receiver* dengan *transmitter* menjadi faktor penting pada metode ini. Pada metode CSAMT, berdasarkan jarak *receiver* dan *transmitter* terdapat tiga zona pengukuran yaitu zona dekat (*near-field*), zona transisi, dan zona jauh (*far-field*). Konfigurasi dan pembagian zona pengukuran pada metode CSAMT ditampilkan pada Gambar 13. Zona ideal untuk pengukuran CSAMT adalah pada zona jauh karena asumsi gelombang bidang sudah dapat digunakan. Sedangkan pada zona dekat dan transisi dibutuhkan koreksi dari efek sumber agar dapat memenuhi asumsi gelombang bidang.

Metode CSAMT diaplikasikan di Kawasan panas bumi Kamojang dan berhasil menunjukan lokasi adanya zona anomali resistivitas rendah yang mengidentifikasi sebuah potensial reservoir panas bumi (Mustopa dkk., 2011). Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur resistivitas bawah permukaan pada medan panas bumi Kamojang terdiri dari tiga jenis fitur resistivitas berkorelasi dengan reservoir panas bumi yang ada di daerah tersebut yaitu lapisan penutup (lapisan pertama) yang memiliki nilai resistivitas 30 - 150 ohm.m dan ketebalan 30 hingga 100 m yang melapisi lapisan antara (kedua) yang memiliki resistivitas yang sangat rendah yaitu 3 - 10 ohm.m dengan ketebalan 500 - 1200 m. Lapisan resistivitas rendah ini bisa dianggap sebagai zona perubahan hidrotermal yang terdiri dari lapisan kedap air atau batuan tutup penyegelan. lapisan ketiga relatif lebih

resistif daripada lapisan kedua dengan resistivitas 30 - 100 ohm-m. Dari pandangan 3D anomali resistivitas rendah (<10 ohm.m) yang dianggap sebagai zona perubahan hidrotermal, diperoleh bahwa zona yang diubah berada jauh di barat daya dan menjadi dangkal di timur laut daerah tersebut.

4.5. Metode *Very Low Frequency* (VLF) untuk Identifikasi Sesar

Metode VLF merupakan metode eksplorasi yang memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik (EM) (Srigutomo dkk., 2008). Metode ini berkaitan dengan pengukuran variasi komponen-komponen medan EM yang berhubungan dengan struktur resistivitas bawah permukaan. Metode ini memanfaatkan sumber signal EM yang dipancarkan oleh *transmitter* yaitu suatu antenna dipol listrik vertikal yang berjarak sangat jauh dari titik pengukuran dengan rentang frekuensi antara 15-30 kHz. *Transmitter* VLF secara radial memancarkan medan EM primer yang terdiri dari komponen medan magnetik horizontal $H\phi$ dan komponen medan listrik vertikal E_z yang tegak lurus terhadap arah penalaran. Pada jarak yang sangat jauh dari *transmitter* (orde kilometer), medan-medan EM primer dapat dianggap sebagai gelombang bidang. Karena interaksi medan-medan primer tersebut dengan konduktivitas bawah permukaan di suatu tempat, medan magnetik primer arah horizontal yang pada tempat yang jauh dianggap sebagai H_y (Gambar 14) membangkitkan medan listrik horizontal E_x pada arah penalaran gelombang EM. Semua variasi konduktivitas bawah permukaan yang arah jurusnya relatif searah

dengan arah penjalaran gelombang bidang akan membangkitkan medan magnet sekunder baik secara induktif maupun galvanik. Rasio medan magnetik sekunder arah vertikal terhadap medan magnetik total arah horizontal mencerminkan variasi struktur konduktivitas bawah permukaan. Hal ini mendorong penggunaan metode VLF secara luas untuk prospeksi material-material konduktif dan merupakan metode yang efektif serta cepat untuk kajian struktur geologi hingga kedalaman maksimum sekitar 100 m (Fischer dkk., 1983). Berbagai contoh aplikasi metode VLF untuk kajian geologi maupun hidrogeologi telah dikaji secara komprehensif oleh (Mcneill and Labson, 1991).

Berdasarkan parameter yang diukur metode VLF dikelompokkan kedalam dua tipe, yaitu VLF-EM dan VLF-R. VLF-EM merupakan metode VLF yang mengukur medan magnet terpolarisasi eliptik. VLF-EM mengukur medan kompleks total yang terdiri dari komponen real (*inphase*), imajiner (*quadrature*), medan total dan *tilt angle*. Sedangkan VLF-R merupakan metode VLF yang mengukur medan listrik horizontal dan medan magnet horizontal yang orthgonal terhadap medan listrik. VLF-R menggunakan persamaan matematis yang sama dengan metode MT yaitu formulasi Maxwell. Metode VLF mengukur dua komponen yaitu komponen dip angle atau tilt angle α dan elliptisitas ϵ . *Tilt angle* merupakan sudut utama polarisasi eliptik dari horizontal untuk memperkirakan struktur konduktif maupun kontak geologi, sedangkan elliptisitas merupakan rasio sumbu minor terhadap sumbu mayor ellip

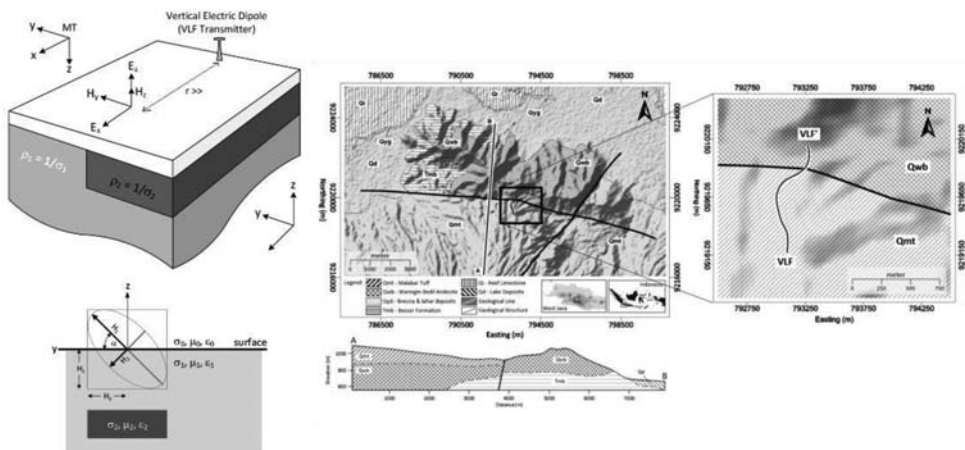
(Kaikkonen, 1979). Tangen *tilt angle* dan elliptisitas merupakan aproksimasi untuk komponen real dan imajiner dari tipper (Paterson N R, dan Ronka, V. 1971).

Interpretasi pengukuran VLF pada awalnya dilakukan secara kualitatif menggunakan kurva anomali dengan membuat plot nilai imajiner dan real dari medan magnet vertikal ternormalisasi pada profil-profil yang dijajarkan (atau dalam bentuk kontur) dan menganalisa bentuk kurva-kurva yang teramati seperti titik-titik *cross over* (titik yang melintasi nilai medan sama dengan nol). Fraser (1969) memperkenalkan suatu filter yang mentransformasi berbagai *cross over* menjadi puncak-puncak anomali dengan menerapkan suatu operator differensial dengan respons frekuensi *band-pass*. Kemudian Karous and Hjelt (1983) juga mengusulkan suatu filter untuk mendapatkan penampang lintang rapat arus ekuivalen dari data lapangan yang berupa komponen real (in phase) dari data yang teramati. Data ini dapat menentukan posisi sumber medan vertikal namun tidak dapat menghasilkan parameter fisis bawah permukaan (konduktivitas atau resistivitas) yang dapat dibandingkan dengan data dari metode geolistrik atau metode EM lainnya. (Pedersen dan Becken, 2005) memperkenalkan suatu teknik pencitraan untuk mendapatkan distribusi arus ekuivalen dengan menggunakan persamaan integral. Kontur yang dihasilkan tidak hanya sensitif terhadap perubahan lateral konduktivitas tetapi juga menggambarkan batas-batas kedalaman konduktor sehingga secara umum menyerupain strukur

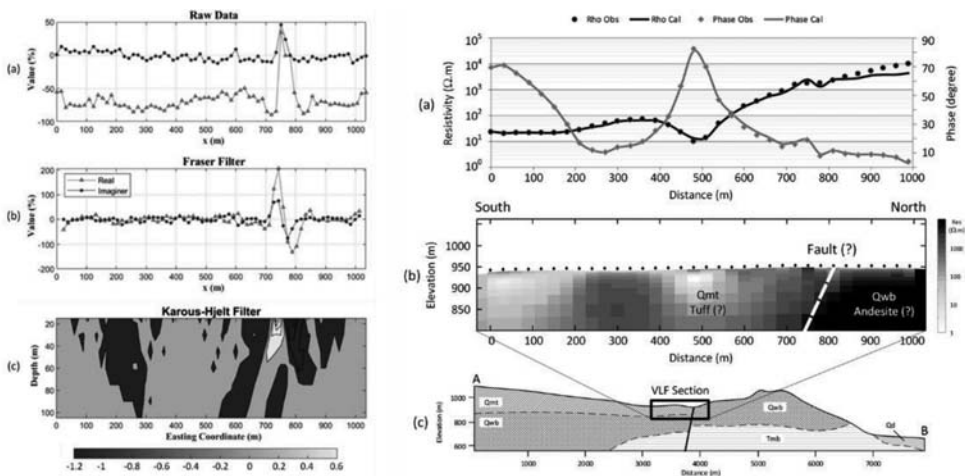
konduktivitas yang didapatkan dari inversi MT. Transformasi dengan memanfaatkan filter untuk mentransformasi besaran Hz/Hy terukur (tipper dalam kajian MT) ke dalam profil resistivitas semu diperkenalkan oleh Chouteau dkk. (1996) yang mentransformasi sinyal VLF-EM kedalam data resistivitas semu. Gharibi dan Pedersen (1999) menyempurnakan metode ini dengan memanfaatkan fakta bahwa medan-medan magnetik sekunder arah horizontal dan vertikal dibangkitkan secara internal dan membentuk pasangan Hilbert transform. Metode ini memungkinkan untuk mendapatkan tensor impedansi dari medan-medan magnet.

Pada penelitian ini telah digunakan metode VLF dengan frekuensi 22.3 kHz dalam penentuan lokasi sesar di daerah Desa Arjasari, Banjaran, Bandung, Jawa Barat, Indonesia. Pengukuran diambil dari titik awal pada koordinat longitude 107.65316 latitude -7.05745 pada ketinggian 943 m dengan panjang lintasan 1000 m dan spasi 15 m. Lintasan VLF berarah selatan utara (S-N) dimana tegak lurus dengan sesar yang berarah barat timur. Analisa kualitatif dari Filter Fraser memperlihatkan bahwa terdapat suatu puncak pada jarak 700 m sampai 800 m. Sedangkan hasil dari filter Karoust Hjelt menunjukkan bahwa terdapat rapat arus yang tinggi pada posisi yang sama. Analisa kuantitatif dari hasil inversi menunjukkan model resistivitas yang smooth dengan nilai rms-misfit yang kecil ($rms-misfit = 0.08$). Model resistivitas dari inversi data hasil transformasi kemudian dibandingkan dengan model resistivitas DC resistivity pada penelitian sebelumnya. Perbandingan kedua model

inversi memiliki *the shallow feature* yang serupa. Pada jarak 700 m sampai 800 m terdapat kontras nilai resistivitas yang menunjukkan adanya sesar (Gambar 15).



Gambar 14. Ilustrasi prinsip dasar metode VLF serta lokasi pengukuran VLF di daerah Arjasari, Banjaran, Bandung.



Gambar 15. Data VLF terukur beserta hasil pemfilteran Karous-Hjelt, pemfilteran Fraser, dan inversi 2D terhadap data resistivitas semu hasil hasil transformasi Hilbert.

4.6. Metode *Ground Penetrating Radar* untuk Investigasi Polusi

Metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) adalah metode geofisika yang digunakan untuk menyelidiki kondisi bawah permukaan dangkal berdasarkan prinsip perambatan gelombang elektromagnetik (EM) di dalam material. Metode ini secara luas dapat diaplikasikan pada geofisika dekat-permukaan, lingkungan, pertanian, forensik, dan tujuan geoteknik (Reynolds, 1997; Jol, 2009). Dalam kajian ini, kami membahas penerapan survei GPR sebagai teknik uji non-destruktif (NDT) untuk menyelidiki jejak kemungkinan kebocoran hidrokarbon atau cairan lainnya di bawah pabrik minyak bumi. Tumpahan hidrokarbon yang mungkin disebabkan oleh retakan pada pipa umumnya dikelompokkan menjadi dua kategori: *Light Non-Aqueous Phase Liquids* (LNAPL) jika gumpalan kebocoran didistribusikan di pinggiran kapiler di atas permukaan air dan sebagai *Dense Non-Aqueous Phase Liquids* (DNAPL) jika berada di bawah muka air tanah (Jol, 2009).

Peningkatan konsentrasi hidrokarbon dalam tanah berbanding lurus dengan peningkatan resistivitas dan penurunan permitivitas dielektrik (Lu dkk., 2011). Respon GPR yang ditunjukkan oleh radargram dapat bersifat spesifik di lokasi tertentu, namun secara umum, keberadaan hidrokarbon di dalam tanah akan meningkatkan reflektifitas radar (Campbell dkk., 1996; Benson dan Mustoe, 1998). Dalam beberapa kasus, reflektifitas cenderung menurun karena hilangnya hamburan sinyal GPR yang tinggi ketika cairan hidrokarbon menyusup ke pinggiran kapiler di

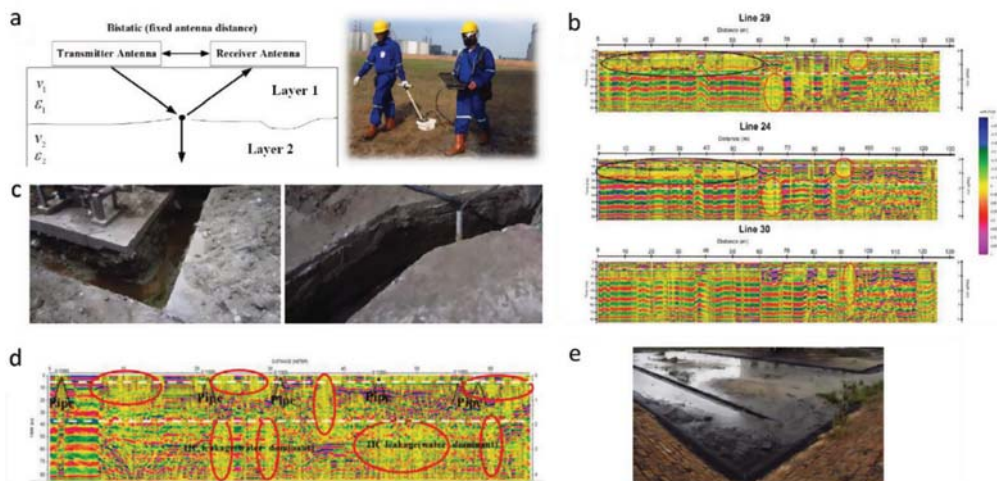
dalam tanah serta efek gabungan dari roughness uap kontaminan dan air-bensin-tanah (Lu dkk., 2011). Redaman sinyal GPR juga dapat dikaitkan dengan peningkatan konduktivitas listrik akibat biodegradasi hidrokarbon di dalam tanah (Jol, 2009; Lu dkk., 2011).

Dalam studi ini, radargram dari pengukuran GPR di beberapa pabrik minyak diperiksa untuk menyelidiki kontaminasi hidrokarbon di bawah permukaan karena kemungkinan retakan pada pipa atau kebocoran pada saluran pembuangan bawah tanah.

GPR dioperasikan dengan mentransmisikan gelombang EM berenergi rendah pada frekuensi antara 25 MHz dan 1 GHz ke tanah melalui antenna pemancar dan menerima gelombang pantul melalui antenna penerima (Gambar 16a). Gelombang pantul dipengaruhi oleh kontras kecepatan gelombang radio pada bahan yang merupakan fungsi dari permeabilitas magnetik, permitivitas dielektrik, konduktivitas listrik, dan frekuensi (Reynolds, 1997).

Akuisisi data menggunakan antenna bistatic 200 dan 600 Hz untuk mendapatkan profil radargram atau refleksi GPR. Terdapat tiga lintasan akuisisi data GPR di atas pipa terkubur yang memanjang pada arah tertentu. Lintasan 1 dibuat tepat di sepanjang sumbu tengah pipa, dua lintasan lainnya di bagian sisi kiri dan kanan garis tengah (di sekitar 30–50 cm dari bagian tengah). Hal ini untuk memastikan cakupan radargram dalam mengantisipasi geometri kebocoran atau plume kontaminan di bawah permukaan. Beberapa lintasan tegak lurus juga dibuat untuk

memverifikasi keberadaan dan kedalaman pipa. Untuk mendapatkan bagian GPR yang lebih jelas dan dapat ditafsirkan secara visual, data radargram diproses melalui beberapa langkah seperti *dewow filtering*, *DC shift correction*, *band pass filtering*, *background removal*, dan migrasi (Reynolds, 1997; Jol, 2009).



Gambar 16. (a) Ilustrasi prinsip dasar dan akuisisi data GPR. (b) Radargram pada tiga lintasan yang berbeda. (c) Penggalan singkapan untuk validasi dan *benchmark*. (d) Radargram yang telah diinterpretasi terkait keberadaan utilitas dan rembesan hidrokarbon. (e) Kondisi real area pengukuran di atas permukaan.

Gambar 16b menunjukkan tiga penampang GPR sejajar di atas pipa memanjang yang searah dengan penampang (lintasan 24 pada sumbu memanjang pipa). Lintasan-lintasan ini diukur untuk menyelidiki kemungkinan kebocoran pipa yang berisi air mengalir dari tangki air besar di pabrik minyak di Jawa. Di permukaan, tumpahan hidrokarbon terlihat di sekitar lintasan. Dari penampang ini, lapisan pertama dengan

ketebalan sekitar 0,3 m diidentifikasi sebagai pola lapisan yang tidak terganggu. Dari singkapan buatan yang digali di dekat lintasan (Gambar 16c), dipastikan bahwa lapisan pertama adalah beton dengan ketebalan yang hampir sama. Di bawah lapisan ini, ditemukan tanah berlumpur di atas tanah berpasir yang dipadatkan. Pantulan lapisan-lapisan ini dapat diidentifikasi dengan jelas pada penampang yang ditunjukkan dengan amplitudo sinyal yang relatif tinggi dari kedalaman sekitar 0.3 hingga 2 m. Di bawah lapisan tanah berpasir ditemukan lapisan lanau atau lempung. Ketinggian air diidentifikasi pada kedalaman sekitar 2 m dan ini diverifikasi dengan memeriksa beberapa sumur air yang berjarak ratusan meter dari lintasan. Antara jarak horizontal 0 - 60 m dan 90 - 100 dan kedalaman 0,3 - 1,5 m teridentifikasi *shadow zone* dengan nilai amplitudo sinyal yang rendah. Zona ini dapat dikaitkan dengan keberadaan LANPL di zona vadose di atas permukaan air di mana fase uap hidrokarbon menggantikan air dan karenanya mengurangi reflektifitas sinyal (de Castro dkk., 2003). Penjelasan lain yang mungkin untuk fitur sinyal yang teredam ini adalah terjadinya biodegradasi hidrokarbon (Jol, 2009; Lu, 2011) dan plume campuran minyak dan air yang didominasi air di lingkungan berlumpur atau lempung. Batas yang jelas dari permukaan air di zona non-shadow (bagian kanan radargram) dapat dikaitkan dengan kontras permitivitas dielektrik antara lapisan lempung berpasir dan lapisan jenuh air sedangkan di bawah shadow zone (bagian kiri dari radargram) disebabkan oleh perpindahan air dari zona transisi di atas

pinggiran kapiler (de Castro dkk., 2003). Tipe saluran (plume) air atau kebocoran juga diidentifikasi di bawah permukaan air antara jarak horizontal 60 - 70 m. Fitur ini mungkin dikaitkan dengan adanya DNAPL yang menggantikan air dari ruang pori dan mengendap melalui lapisan jenuh air. DNAPL tidak larut dalam air dan dapat bermigrasi sepanjang aliran air tanah. Hal ini penting untuk diperhatikan dari sudut pandang lingkungan.

Gambar 16d menunjukkan contoh lain dari radargram yang diambil di pabrik minyak Sumatera. Fitur hiperbolik terkait dengan posisi pipa yang berpotongan dengan penampang GPR. Pola perlapisan pada kedalaman 0,2 - 0,3 m menunjukkan adanya lapisan beton yang menutupi daerah pengukuran. Di beberapa titik, pola shadow zones diidentifikasi dari permukaan (pada 10 m, 20 - 30 m, 37 m, dan 60 - 65 m). Fitur-fitur ini terkait dengan adanya campuran tumpahan hidrokarbon dan air meteorik di permukaan (Gambar 16e). Muka air tanah di bawah permukaan diidentifikasi pada kedalaman sekitar 2 m. Shadow zones dengan nilai amplitudo rendah juga teridentifikasi secara vertikal melintasi permukaan air dari zona vadose (LNAPL) ke lapisan jenuh air (DNAPL).

Investigasi kebocoran hidrokarbon di bawah tanah menggunakan GPR telah dilakukan. Penampang-penampang GPR yang ditafsirkan menunjukkan adanya lapisan beton permukaan, tanah berlumpur yang dipadatkan, lapisan pasir, dan tanah liat asli serta muka air tanah. Keberadaan plume hidrokarbon diidentifikasi sebagai shadow zones

dengan amplitudo rendah yang dapat diartikan sebagai karena keberadaan LANPL di zona vadose di atas permukaan air yang mengurangi reflektifitas sinyal, atau karena terjadinya biodegradasi hidrokarbon, atau karena air-campuran minyak dan air yang didominasi di lingkungan berlumpur atau lempung.

5. TANTANGAN APLIKASI DAN PENGEMBANGAN METODE ELEKTROMAGNETIK

Meskipun metode-metode EM telah mengalami perkembangan pesat terutama semenjak 60 tahunan yang lalu, baik dari aspek teoretik, teknik akuisisi, instrumentasi, pemodelan dan komputasi numerik serta lainnya, terdapat beberapa tantangan di Indonesia yang penulis amati semenjak menekuni bidang ini hingga saat ini. Beberapa tantangan tersebut di antaranya:

1. Masih relatif kurangnya sumber daya insani yang tertarik menggeluti bidang elektromagnetik ini, terutama yang terlibat dalam aspek sains dan akademiknya.
2. Ketersediaan alat/instrumentasi EM yang masih sangat terbatas karena kurangnya minat, kemampuan dan kemandirian dalam mengembangkan aspek instrumentasi terkait. Hal ini mengakibatkan kebergantungan kepada produk instrumentasi luar negeri yang pada gilirannya akan terasa pengadaannya berbiaya tinggi.

3. Penetrasi kedalaman untuk menggali informasi bergantung pada besarnya momen sumber yang digunakan. Peningkatan kemampuan penetrasi sistem sebesar dua kali memerlukan peningkatan momen sumber sebesar satu orde magnitudo yang memerlukan peningkatan daya dari sumber sebesar dua orde magnitudo (Zhdanov, 2010). Tantangan lainnya adalah untuk membangkitkan sumber EM primer pada frekuensi rendah memerlukan sistem osilator yang stabil pada frekuensi tersebut.
4. Pemodelan yang realistik dan ideal adalah pemodelan 3-D, namun hal ini memerlukan kemampuan komputasi yang tinggi baik dari sisi sumber daya insani maupun sarana dan prasarananya selain kemampuan melakukan pemodelan terintegrasi.
5. Penelitian dan pengembangan metode-metode EM dari berbagai aspeknya secara kolaboratif dari pihak akademisi dan industri masih sangat terbatas.

Beberapa upaya solutif yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan perluasan jejaring kolaborasi pada bidang-bidang terkait EM antar kelompok bidang keilmuan di ITB (misal dari FMIPA, STEI, FTTM, FITB dan lainnya) pada level internal ITB, ataupun membentuk konsorsium antar perguruan tinggi di Indonesia dalam rangka menjawab tantangan-tantangan di atas dengan juga melibatkan pihak industri yang berpotensi menjadi pengguna manfaat pengembangan sains dan

teknologi EM kebumian di Indonesia. Kegiatan-kegiatan yang mencerminkan upaya berbagi sumber daya (*resource sharing*) juga penting semisal pihak-pihak yang memiliki kemampuan akademik dengan yang memiliki kemampuan pengadaan fasilitas.

6. PENUTUP

Tercapainya visi dan misi ITB serta terwujudnya fungsi tri-darma perguruan tinggi oleh ITB bergantung juga pada tingkat partisipasi sivitas ITB dalam kegiatan pengembangan institusi di ITB ini, termasuk penulis sebagai salah satu guru besar di ITB. Menjadikan ITB perguruan tinggi yang unggul, bermartabat, mandiri, dan diakui dunia serta mampu mempertinggi kualitas kesejahteraan bangsa tentu memerlukan *leadership* yang kuat, strategi yang tepat dan eksekutor kebijakan yang mau bekerja.

Berdasarkan rekam jejak selama penulis berkiprah di ITB, maka langkah berikutnya adalah meneruskan bidang yang sudah ditekuni disertai dengan penajaman dan perluasan agar sejalan dengan perkembangan khazanah pemodelan dan inversi seperti pemodelan dan inversi 3D fungsi respons Bumi untuk berbagai metode terutama metode elektromagnetik. Sejalan juga dengan tuntutan interpretasi numerik kebumian yang semakin mengarah pada model-model yang lebih kompleks dan realistis yang konsekuensinya memerlukan waktu komputasi dan *storage* memori yang besar, maka langkah selanjutnya adalah mengaplikasikan teknik komputasi parallel (*parallel computing*)

pada proses pemodelan dengan secara bertahap melengkapi sararananya baik *hardware* maupun *software* yang diperlukan. Selain itu, secara parallel penulis juga akan terus menulis karya ilmiah dalam bentuk jurnal internasional. Saat ini masih terdapat beberapa hasil penelitian penulis dan tim berbasis pemodelan maupun inversi dengan aplikasi yang beragam yang masih harus ditulis dalam bentuk makalah ilmiah.

Jejaring kolaborasi kerjasama riset ke depan juga akan diperkuat dan diperluas, yang efek positifnya juga membuat tim mahasiswa penulis berkesempatan bersinggungan dengan bidang-bidang yang sedang dikembangkan serta menjadi wahana *knowledge sharing*. Aspek pengabdian masyarakat juga akan tetap dilakukan baik penguatan sektor swasta terkait bidang keilmuan yang penulis geluti maupun upaya-upaya meningkatkan kualitas pendidikan sains dan teknologi di masyarakat. Partisipasi pengembangan institusi di ITB akan tetap penulis jalankan selama diperlukan sesuai dengan kemampuan demi terlaksananya *good governance* dan tri-darma perguruan tinggi di ITB.

DAFTAR PUSTAKA

Abadi, P., Saito, S., dan Srigutomo, W., 2014. "Low-latitude scintillation occurrences around the equatorial anomaly crest over Indonesia". *Annales Geophysicae.*, Vol. 32, 7-17, DOI: 10.5194/angeo-32-7-2014, 2014 (Q1), IF=1.585.

- Aizawa, K., Takakura, S., Asaue, H., Koike, K. et al., 2021. Electrical conductive fluid-rich zones and their influence on the earthquake initiation, growth, and arrest processes: observations from the 2016 Kumamoto earthquake sequence, Kyushu Island, Japan. *Earth Planets Space* 73, 12. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01340-w>
- Begum, S.K., 2017. Electrical Conductivity and Aftershock Activity in Seismically Active Region of Chamoli, Lesser Himalayas. *OJER* 06, 117-134. <https://doi.org/10.4236/ojer.2017.62007>
- Benson, A.K., Mustoe, N.B., 1998, Integration of electrical resistivity, ground-penetrating radar, and very low-frequency electromagnetic induction surveys to help map groundwater contamination produced by hydrocarbons leaking from underground storage tanks. *J. Environmental Geosciences*, 5 pp. 61-68.
- Cagniard, L., 1953. Basic Theory of the Magneto Telluric Method of Geophysical Prospecting. *Geophysics*, 18, 605-635.
- Campbell, D.L., Lucius, J.E., Ellefsen, K.J., Deszcz-Pan, M., 1996, Monitoring of a controlled LNAPL spill using ground penetrating radar, *Proc. Symp. Applications of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP'96)*, pp. 511-517
- Candra, A. D., Srigutomo, W., Sungkono, dan Santosa, B. J., 2014. "A Complete Quantitative Analysis of Self-Potential Anomaly Using Singular Value Decomposition Algorithm". *Proc. Of the IEEE International Conference on Smart Instrumentation Measurement*

and Application (ICSIMA) 25-27 November 2014, Kuala Lumpur, Malaysia ISBN 978-1-4799-8040-6.

Chouteau, M., Zhang, P., and Chapellier, D. (1996): Computation of apparent resistivity profiles from VLF-EM data using linear filtering, *Geophysical Prospecting*, 44, 215-232.

Chouteau, M., Zhang, P., Dion, D.J., Giroux, B., Morin, R., Krivochieva, S., 1997. Delineating mineralization and imaging the regional structure with magnetotellurics in the region of Chibougamau (Canada). *Geophysics* 62, 730-748. <https://doi.org/10.1190/1.1444183>

Christensen, N.B., 2002. A generic 1-D imaging method for transient electromagnetic data. *Geophysics* 67, 438-447. <https://doi.org/10.1190/1.1468603>

Comeau, M.J., 2015. Electrical Resistivity Structure of the Altiplano-Puna Magma Body and Volcan Uturuncu from Magnetotelluric Data. Thesis, Dept. of Physics, University of Alberta, Canada.

Constable, S.C., Parker, R.L., Constable, C.G., 1987. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics* 52, 289-300

Darisma, D., Said, U., dan Srigutomo, W., 2017. "2D Gravity inversion using particle swarm optimization method". 23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, 03 September 2017, DOI:3997/2214-4609.201702117.

- de Castro, D. L., Gomes, Branco, R.M.G.C, 2003, 4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history, *Journal of Applied Geophysics* 54, pp. 127- 144.
- Djamal, M., Indasari, W., Ramli, dan Srigutomo, W., 2015. "Fluxgate Based Detection of Magnetic Material in Soil Subsurface". *Applied Mechanics and Materials*, ISSN; 1662-7482, Vol. 7716, pp 55-58.
- Djamal, M., Indasari, W., Ramli, Srigutomo, W., 2016. "Detection of magnetic material in Subsurface using Electromagnetic induction method based on Fluxgate Sensor". *Key Engineering Materials*, ISSN; 1662-9795, Vol. 675-676, pp. 494-500, DOI:110.4028, 2016 Trans Tech Publication (Q3).
- Fajriani, Srigutomo, W., Pratomo, P. M., 2017. "Interpretation Of Self-Potential Anomalies for Investigating Fault Using The Levenberg-Marquardt Method: A Study Case In Pinggirsari, West Java, Indonesia". *Southeast Asian Conference on Geophysics IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 62 (2017) 012004: Doi:10.1088/1755-1315/62/1/012034.
- Febrina, M., Satria, E., Djamal, M., Srigutomo, W., Liess, M., 2019. "Development Of a Simple CO₂ Sensor Based on The Thermal Conductivity Detection by A Thermopile Measurement". *Journal Of the International Measurement Confederation*, Volume 133, February 2019, Pages 139-144.

- Fischer, G., Le Quang, B. V, and MULLER, I. (1983): VLF Ground surveys, a powerful tool for the study of shallow two-dimensional structures, *Geophysical Prospecting*, 31, 977-991.
- Fraser, D. C. (1969): Contouring of VLF-EM data, *GEOPHYSICS*, retrieved from internet: <http://library.seg.org/>, 34.
- Garcia, X., Boerner, D., dan Pedersen, L. B., 2003, Electric and Magnetic Galvanic Distortion Decomposition of Tensor CSAMT Data. Application to Data from the Buchans Mine (Newfoundland, Canada), *Geophysical Journal International*, Vol. 154, no. 3, pp 957-969
- Gharibi, M., and Pedersen, L. B. (1999): Transformation of VLF data into apparent resistivities and phases, *GEOPHYSICS*, retrieved from internet: <http://library.seg.org/>, 64, 1393-1402.
- Halawa, E., Bindar, Y., Purqon, A., and Srigutomo, W., 2022. Prediction of Carbon Monoxide Concentration with Variation of Support Vector Regression Kernel Parameter Value. *J. Math. Fund. Sci.* Vol. 54, No. 1, 39-53.
- Hapsoro, C. A., Srigutomo, W., dan Purqon, A., 2018. "3-D time domain electromagnetic (TDEM) modeling to analyze resistivity distribution in the geothermal system". 80th EAGE Conference and Exhibition 2018: Opportunities Presented by the Energy Transition; Copenhagen; Denmark; 11 June 2018 through 14 June 2018; Code 148615.

- Hapsoro, C.A., Srigutomo, W., Purqon, A., Warsa, W., Sutarno, D., Kagiya, T., 2021. Global Inversion of Grounded Electric Source Time-domain Electromagnetic Data Using Particle Swarm Optimization. *Journal of Engineering & Technological Sciences* Vol. 53 Issue 1, p29-55.
- Harja, A., Srigutomo, W., Mustopa, E. J., dan Sutarno, D., 2007. "CSAMT And DC-Resistivity Survey for Groundwater and Structural Investigation: Application To Eastern Bandung Basin, Indonesia". *Proceedings of the 2007 Asian Physics Symposium (APS 2007)*, November 29 - 30, 2007, Bandung, INDONESIA, ISBN 978-979-17090-1-9.
- Harja, A., Srigutomo, W., Tanaka, Y., Kagiya, T., dan Sutarno, D., 2016. "VLF - MT Survey around Nakadake crater at Aso Volcano". *International Symposium on Geophysical Issue, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 29, DOI: 10.1088/1755-1315/29/1/012016.
- Hauck, C. and Kneisel, C. (editors), 2008. *Applied Geophysics in Periglacial Environments*, Cambridge University Press, New York.
- Heriyanto, M., Srigutomo, W., 2017. "1-D DC Resistivity Inversion Using Singular Value Decomposition and Levenberg-Marquardt's Inversion Schemes". *Journal of Physics: Conference Series*, DOI: 10.1088/1742-6596/877/1/012066.
- Hermance, J. F. (1973): *Processing of magnetotelluric data*, *Physics of the*

Earth and Planetary Interiors, 7(3), 349-364. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(73\)90060-5](https://doi.org/10.1016/0031-9201(73)90060-5)

Hermance, J.F., 1995. Electrical conductivity models of the crust and mantle. AGU Ref. Shelf 1, Global Earth Phys., Handbook of Phys. Constants, pp. 190 - 205.

Huliselan, E.K., Bijaksana, S., Srigutomo, W., dan Kardena, E., 2010. "Scanning Electron Microscopy And Magnetic Characterization Of Iron Oxides In Solid Waste Landfill Leachate". Journal of Hazardous Materials Volume 179, Issue 1-3, pp. 701-708; ISSN 0304-3894, Q1.

Hyndman, R.D., Shearer, P.M., 1989. Water in the lower continental crust: modelling magnetotelluric and seismic reflection results. Geophys. J. Int. 98, 343-365.

Imaduddin, I., Srigutomo, W., Mustopa, E. J., 2019. "Development Of Data Acquisition Instrumentation And Inversion System For Earth Resistivity Survey In A Smart Integrated System". Journal of Physics: Conference Series 1204(1), 012122.

Jol, H. M., 2009, Ground Penetrating Radar theory and Applications, Elsevier.

Jones, A.G., 1992, Electrical conductivity of the continental lower crust; in Continental Lower Crust, D.M. Fountain, R.J. Arculus and R.W. Kay (ed.), Elsevier, p. 81-143.

Kaikkonen, P. (1979). Numerical VLF modeling, Geophys. Prosp., 27, 815-834.

- Karas, M., Tank, S.B., Özaydin, S., 2017. Electrical conductivity of a locked fault: investigation of the Ganos segment of the North Anatolian Fault using three-dimensional magnetotellurics. *Earth Planets Space* 69, 107. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0695-2>
- Karous, M., and Hjelt, S. E. (1983): Linear filtering of Dip-Angle Measurements, *Geophysical Prospecting*, 31, 782-794.
- Khairurrijal, Widiatmoko, E., Srigutomo, W., Kurniasih, N., 2012. "Measurement Of Gravitational Acceleration Using A Computer Microphone Port", *Physics Education* Vol, 47, Issue 6, November 2012, Pages 709-714; ISSN 0031-9120
- Khoza, T.D., Jones, A.G., Muller, M.R., Evans, R.L., Miensopust, M.P., Webb, S.J., 2013. Lithospheric structure of an Archean craton and adjacent mobile belt revealed from 2-D and 3-D inversion of magnetotelluric data: Example from southern Congo craton in northern Namibia: Mt Evidence of Thick Congo Craton. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 118, 4378-4397.
- Kirsch, R. (Ed.), 2009. *Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology*, 2nd edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Law, D., Mohd Noh, K.A., Md Rafek, A.G., 2019. Application of Transient Electromagnetic (TEM) Method for Delineation of Mineralized Fracture Zones. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 279, 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/279/1/012038>

- Lezaeta, P., Brasse, H., 2001. Electrical conductivity beneath the volcanoes of the NW Argentinian Puna. *Geophys. Res. Lett.* 28, 4651-4654. <https://doi.org/10.1029/2001GL013582>
- Liu, L., Xie, X., 2013. GPR for geotechnical engineering. *Journal of Geophysics and Engineering* 10. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/10/3/030201>
- Llera, F.J., Sato, M., Nakatsuka, K., Yokoyama, H., 1990. Temperature dependence of the electrical resistivity of water-saturated rocks. *Geophysics* 55, 576-582.
- Lu, Q., Feng, X., Liu, C., Li, H. L., Sato, 2011, Detection of LNAPL contaminated soils by GPR, *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE International*, pp. 842-845.
- Marinenko, A.V., Epov, M.I., 2017. Subsurface geoelectric array with two transmitters for petroleum exploration in offshore areas. *Russian Geology and Geophysics* 58, 1263-1269.
- Martakusumah, R. dan Srigutomo, W., 2012. "Comparison of 1D Magnetotelluric inversion using Levenberg-Marquardt and Occam's Inversion Schemes", *The 5th Asian Physics Symposium (APS 2012) Bandung, Indonesia 10-12 July 2012 Vol. 1656, ISBN 978-0-7354-1298-9, ISSN 0094-243X, pp. 070014-1 - 070014.*
- Mcneill, J. D., and Labson, V. F. (1991): Geological mapping using VLF radio fields, in: Nabighian, M. N., Ed., *Electromagnetic methods in*

applied geophysics II, retrieved from internet: <http://library.seg.org/>.

Mohammad, I. H., Srigutomo, W., Sutarno, D., dan Sumintadiredja, P., 2013. "Interpretation of 1D Vector Controlled-Source Audio-Magnetotelluric (CSAMT) Data Using Full Solution Modeling". J. Math. Fund. Sci., Vol. 345, No. 2, ISSN. 2337-5760, DOI: 10.5614, pp. 172-188 (HI=8, Q4).

Mustopa, E. J., Sutarno, D., Dan Srigutomo, W., 1997. "Inversi 1-D Data Magnetotelluric Dengan Metoda Marquardt-Levenberg". Proc. Of Indonesian Geophysicists Annual Meeting (HAGI), Bandung, 16-17 Oktober 1997, ISBN: 979-95053-1-3

Mustopa, E. J., Srigutomo, W., Sutarno, D., dan Fauzi, U., 2011. "Resistivitiy Structure in Kamojang Geothermal Field Derived from CSAMT Data", Indonesian Journal of Physics Vol 22, No. 1, Jan. 2011, pp 23-29.

Mustopa, E.J., Srigutomo, W., Sutarno, D., dan Fauzi, U., 2011. Resistivitiy Structure in Kamojang Geothermal Field Derived from CSAMT Data. Indonesian Journal of Physics. Vol 22 No. 1.

Nabighian, M.N (Ed.), 1987. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics - Theory, Volume 1 (Investigations in Geophysics vol. 3), Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma USA.

Nabighian, M.N (Ed.), 1991. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics - Applications, Part A and Part B (Investigations in

Geophysics vol. 3), Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma USA.

Nicolas Florsch. N., Muhlach, F., and Kammenthaler, M., 2018. *Everyday Applied Geophysics 2, Magnetism and Electromagnetism*, ISTE Press Ltd London UK and Elsevier Ltd Oxford UK.

Nono, F., Gibert, B., Parat, F., Loggia, D., Cichy, S.B., Violay, M., 2020. Electrical conductivity of Icelandic deep geothermal reservoirs up to supercritical conditions: Insight from laboratory experiments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 391, 106364. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.04.021>

Nugraha, M. G. Kirana, K. H., Srigutomo, W., dan Saepuzaman, D., Hapsoro, C. A., dan Septiyanto, R. F., "The Prediction of Rock fall-out Using CRSP 3D: A Case Study at Gunung Batu, Lembang West Java, Indonesia, *Pertanika J. Sci & Technol.* 25 (S): pp. 47-56 (2017), ISSN: 01287680

Pedersen, L. B., and Becken, M. (2005): Equivalent images derived from very-low frequency (VLF) profile data, *Geophysics*, 70(3), 43-50. <https://doi.org/10.1190/1.1925742>

Pedrera, A., Martos-Rosillo, S., Galindo-Zaldívar, J., Rodríguez-Rodríguez, M., Benavente, J., Martín-Rodríguez, J. F., dan Zúñiga-López, M. I., 2016, Unravelling Aquifer-Wetland Interaction Using CSAMT and Gravity Methods: The Mollina-Camorra Aquifer and the Fuente de Piedra Playa -Lake, Southern Spain, *Journal of Applied*

Geophysics, Vol. 129, pp 17-27

Pellerin, L., Johnston, J.M., and Hohmann, G.W., 1996. A numerical evaluation of electromagnetic methods in geothermal exploration. *Geophysics*, vol. 61, no. 1, pp. 121-130.

Pratama, A. B. dan Srigutomo, W., 2015. "Modeling of hydrological drawdown caused by pumping for unconfined, confined, and half-confined aquifers". *AIP Conference Proceedings* 1656 (1), 070015.

Putra, A.S., Sukono, Srigutomo, W., Hidayat, Y., dan Lesmana, E., 2017. "A Comparative Study of Simulated Annealing and Genetic Algorithm Method in Bayesian Framework to the 2D-Gravity Data Inversion". *Journal of Physics: Conference Series* Volume 1204, Issue 1, 7 May 2019, Article number 0120797th Asian Physics Symposium, APS 2017; Bandung; Indonesia; 29 August 2017 through 31 August 2017; Code 148183.

Qausar, A. M., Sumintadireja, P., dan Srigutomo, W., 2015. "Static Effect Correction in CSAMT data using Spatial-Filtering approach and its Application to Interpret Hidden Geothermal Systems based on Rock Electrical Resistivity Distribution". *Proceedings Indonesia International Geothermal Conferrention & Exhibition 2015*, Jakarta Convention Center, Indonesia-August 19-21.

Reynolds, A. M., 1997, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley & Sons Ltd.

- Saepuzaman, D., Srigutomo, W., Nugraha. M. G., "Cililin Landslide Process Modeling Using Lumped Mass Model". *Pertanika J. Sci & Technol.* 25 (S): pp. 23-24 (2017), ISSN: 01287680
- Sampurno, J., Apriansyah, Ardiat, R., Srigutomo, W., 2018. "Fractal analysis of land surface temperature for geothermal and non-geothermal sites characterization". *Journal of Physics: Conference Series* 1028(1), 012198.
- Sampurno, J., Azwar, A., Eljabbar, F. D., dan Srigutomo, W., 2016. "Multifractal Characterization of Size Distributions of Peat Soil". *Journal Math.Fund.Sci.* Vol. 48, No.2, pp. 106-114
- Sasaki, Y., Yoneda, Y., dan Matsuo, K., 1992, Resistivity Imaging of Controlled-source Audiofrequency Magnetotelluric Data, *GEOPHYSICS*, Vol. 57, no. 7, pp 952-955
- Savin, C., Ritz, M., Join, J.-L., dan Bachelery, P., 2001, Hydrothermal System Mapped by CSAMT on Karthala Volcano, Grande Comore Island, Indian Ocean, *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 48, no. 3, pp 143-152
- Setya D. H, Putra, Suryantini, dan Srigutomo, W., 2016. "Thermal Modeling and heat flow density interpretation of the onshore Northwest Java basin, Indonesia". *Geothermal Energy*: 4:12 DOI:10.1186/s40517-017-016-0052-x, IF=1.732 (HI=11, Q1) (Corresponding author).

- Simkin and Siebert, 1994, *Volcanoes of the World*: Smithsonian Institution and Geoscience Press, Inc., Tucson, Arizona.
- Simpson, F. dan Bahr, K., 2005. *Practical Magnetotellurics*, Cambridge Univ. Press.
- Slater, L.D., Ntarlagiannis, D., Day-Lewis, F.D., Mwakanyamale, K., Lane, J.W., Ward, A., Versteeg, R.J., 2010. Use of Induced Polarization to Characterize the Hydrogeologic Framework of the Zone of Surface-Water/Groundwater Exchange at the Hanford 300 Area, WA, in: *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2010*. Environment and Engineering Geophysical Society, pp. 955-960. <https://doi.org/10.4133/1.3445539>
- Soueid Ahmed, A., Revil, A., Byrdina, S., Coperey, A., Gailler, L., Grobbe, N., Viveiros, F., Silva, C., Jougnot, D., Ghorbani, A., Hogg, C., Kiyan, D., Rath, V., Heap, M.J., Grandis, H., Humaida, H., 2018. 3D electrical conductivity tomography of volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 356, 243-263.
- Srigutomo, W. dan Kagiya, T., 2003. "3-D TDEM Modeling And Its Application In Detecting Magma And Groundwater System In Volcanic Area". *Proceedings Of 2003 Annual Physics Seminar, October 2, 2003, Institut Tekonogi Bandung, Indonesia*, ISBN: 979-98010-0-1.
- Srigutomo, W. dan Pratomo, P. M., 2016. "2D Resistivity and Induced Polarization Measurement for Manganese Ore Exploration". *Journal*

of Physics: Conference Series 739 (1), 012138.

Srigutomo, W. dan Sutarno, D., 1998. "2-D Electromagnetic modeling using the finite-element method: application in Magnetotelluric case". *Kontribusi Fisika Indonesia*, Vol. 9, No. 2, pp. 55-65.

Srigutomo, W., Agustine, E., dan Zen, M. H., 2006. "Quantitative Analysis of Self-Potential Anomaly: Derivative Analysis, Least-Squares Method and Non-Linear Inversion". *Indonesian Journal of Physics* Vol 17, No. 2, April 2006, pages 49-55.

Srigutomo, W., Anwar, H., Agustine, H. Mahardika, H., 2019. "Three-dimensional DC Resistivity Modeling using Galerkin Finite Element Method Composed by Tetrahedral Elements". *Journal of Engineering and Technological Sciences*, Vol. 51 No.4, pp. 516-536, HI = 10, Q2.

Srigutomo, W., Handayani, G., Pribadi, A.R., dan Nugraha, A.M., 2018. "Investigation of 1D shear wave velocity profile using the spatial autocorrelation (SPAC) method: Case study at West Park ITB Campus, Bandung, Indonesia". *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences* Open Access Volume 13, Issue 6, 1 March 2018, Pages 2096-2107; ISSN: 18196608 (HI=21, Q2).

Srigutomo, W., Hapsoro, C.A., Purqon, A., Warsa, W., Sutarno, D., Kagiya, T., 2021. Nonlinear Inversion Using Very Fast Simulated Annealing for Horizontal Electric Dipole Time-Domain Electromagnetic Data. *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*; 21(5): 379-390.

- Srigutomo, W., Harja, A., Sutarno, D., and Tsuneomi Kagiya (2008): VLF data analysis through transformation into resistivity value: application to synthetic and field data, Indonesian Journal of Physics, retrieved from internet: [http://ijp.papsi.org/index.php/ijp/article/viewArticle/81,16\(4\),127-136](http://ijp.papsi.org/index.php/ijp/article/viewArticle/81,16(4),127-136).
- Srigutomo, W., Harja, A., Sutarno, D., dan Kagiya, T., 2005. "VLF Data Analysis Through Transformation into Resistivity Value: Application to Synthetic and Field Data". Indonesian Journal of Physics, Vol 16, No.4, pp.127-136.
- Srigutomo, W., Heriyanto, dan M., Aufa, M. H., 2019. "Gravity Inversion of Talwani Model using Very Fast Simulated Annealing". J. Math. Fund. Sci., Vol. 51, No. 2, pp. 177-190 (HI=8, Q3).
- Srigutomo, W., Kagiya, T., Kanda, W., dan Utada, H., 2005. "Study of Deep Sounding Time-Domain Electromagnetic (TDEM) Method Using Horizontal Electric Dipole to Infer Subsurface Resistivity Structure". Indonesian Journal of Physics Vol 16, No. 4, pp. 115-125.
- Srigutomo, W., Kagiya, T., Kanda, W., dan Utada, H., 2005. "Study of Deep Sounding Time-Domain Electromagnetic (TDEM) Method using Horizontal Electric Dipole to Infer Subsurface Resistivity Structure". Indonesian Journal of Physics Vol 16, No. 4, October 2005, pp.115-125.
- Srigutomo, W., Kagiya, T., Kanda, W., Munekane, H., Hashimoto, T., Tanaka, Y., Utada, H., dan Utsugi, M., 2008. "Resistivity structure of

Unzen Volcano derived from time domain electromagnetic (TDEM) survey". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 175, pp. 231-240, ISSN 0377-0273, Q1.

Srigutomo, W., Kurnia, R., Suprijadi, 2017. "Improvement of Simulation Runtime of Smoothed Particle Hydrodynamics by Using Graphics Processing Unit (GPU)". *J.ICT Res. Appl.*, Vol 11. No.3, pp.230-252, ISSN: 2337-5787, DOI: 10.5614/itbj.ict.res.appl.2017

Srigutomo, W., Novana, C. E., Singarimbun, A., Agustine, E., Puradimaja, D. J., Sunarya, A. S., Pratomo, P. M., dan Susilawati, A., 2010." Self-Potential Modeling for Investigation of Shallow Structure in Volcanic Region: a Study Case at Domas Crater, Tangkuban Parahu Volcano, West Java". *Indonesian Journal of Physics* Vol 21, No. 2, April 2010, pages 29-39.

Srigutomo, W., Trimadona, dan Agustine, A., 2016. "Investigation of Underground Hydrocarbon Leakage using Ground Penetrating Radar". 6th Asian Physics Symposium, *Journal of Physics Conference Series* 739 012137. doi:10.1088/1742-6596/739/1/012137.

Srigutomo, W., Trimadona, dan Pratomo, P.M., 2016. "2D Resistivity and Induced Polarization Measurement for Manganese Ore Exploration, *Journal of Physics: Conference Series* Vol. 739, Issue 1, Asian Physics Symposium 2015, APS 2015; Bandung; Indonesia; 19 August 2015 through 20 August 2015; Code 124083.

Srigutomo, W., Warsa, Sule, R., Trimadona, Prasetyo, D., Saito, A.,

- Nakayama, K., Hato, M., Prasetyo, A., dan Widarto, D. S., 2015. "Time-Domain Electromagnetic (TDEM) Baseline Survey for CCS In Gundih Area, Central Java, Indonesia". Proceedings of the 12th SEGJ International Symposium, Tokyo, Japan, 18-20 November 2015, pp 114-118.
- Srigutomo, W., Kagiya, T., Kanda, W., Munekane, H., Hashimoto, T., Tanaka, Y., Utada, H., (...), Utsugi, M., 2008. Resistivity structure of Unzen Volcano derived from time domain electromagnetic (TDEM) survey *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175 (1-2), pp. 231-240.
- Srigutomo, W., Sutarno, D., dan Mustopa, E. J., 1997. "2-D Electromagnetic modeling using the integral equation method, Proc. of Indonesian Geophysicists Annual Meeting (HAGI), Bandung, 16-17 October 1997, ISBN: 979-95053-1-3.
- Strangway, D. W., Swift, C. M., dan Holmer, R. C., 1973, The Application Of Audio-Frequency Magnetotellurics (Amt) To Mineral Exploration, Geophysics, Vol. 38, no. 6, pp 1159-1175
- Sulistyowati, R., Kurniadi, R., Srigutomo, W., 2015. Stability analysis of predator prey model on the case of aerosol-cloud-precipitation interactions. AIP Conference Proceedings 1677, 060023
- Sulistyowati, R., Viridi, S., Kurniadi, R., dan Srigutomo, W., 2016. "Relation Between Cloud Thickness-Cloud Number Concentration Differences And Rain Occurrence Based On Koren-Feingold Model". Journal of

Physics: Conference Series 771(1), 012047.

Susilawati, A., Niode, M., Surmayadi, M., Pratomo, P. M., Nurhasan, Mustopa, E. J., Sutarno, D., dan Srigutomo, W., 2022. "Resistivity Structure of Limboto Lake - Pentadio, Gorontalo, Indonesia based on 3D Magnetotelluric Inversion". (Submitted to *Frontiers in Earth Science*).

Sutarno, D. dan Srigutomo, W., 1998. "Application of the Finite-Element Method In 2-D Electromagnetic Modeling For The Current Source Case". *Kontribusi Fisika Indonesia*, Vol. 9 No. 3, Pp 89-98.

Tank, S.B., Karas, M., 2020. Unraveling the electrical conductivity structure to decipher the hydrothermal system beneath the Mt. Hasan composite volcano and its vicinity, SW Cappadocia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 405, 107048. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107048>

Viezzoli, A., Christiansen, A.V., Auken, E., Sørensen, K., 2008. Quasi-3D modeling of airborne TEM data by spatially constrained inversion. *Geophysics* 73, F105-F113. <https://doi.org/10.1190/1.2895521>

Wait, J.R., 1962, Theory of magnetotelluric fields; *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, v. 66D, p. 509-541.

Wang, X., He, L., Chen, L., Xu, L., Li, J., Lei, X., dan Wei, D., 2017, Mapping Deeply Buried Karst Cavities Using Controlled-Source Audio Magnetotellurics: A Case History of a Tunnel Investigation in

Southwest China, GEOPHYSICS, Vol. 82, no. 1, pp EN1-EN11

Wannamaker, P. E., 1997, Tensor CSAMT Survey over the Sulphur Springs Thermal Area, Valles Caldera, New Mexico, United States of America, Part I: Implications for Structure of the Western Caldera, GEOPHYSICS, Vol. 62, no. 2, pp 451-465

Wu, G., Hu, X., Huo, G., Zhou, X., 2012. Geophysical exploration for geothermal resources: An application of MT and CSAMT in Jiangxia, Wuhan, China. J. Earth Sci. 23, 757-767.

Younis, A., El-Qady, G., Abd Alla, M., Abdel Zaher, M., Khalil, A., Al Ibiary, M., dan Saraev, A., 2015, AMT and CSAMT Methods for Hydrocarbon Exploration at Nile Delta, Egypt, Arabian Journal of Geosciences, Vol. 8, no. 4, pp 1965-1975

Zhang, K., Wei, W., Lu, Q., Dong, H., Li, Y., 2014. Theoretical assessment of 3-D magnetotelluric method for oil and gas exploration: Synthetic examples. Journal of Applied Geophysics 106, 23-36. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.04.003>

Zhdanov, M.S., 2010. Electromagnetic geophysics: Notes from the past and the road ahead. Geophysics, Vol. 75, No. 5 p. 75A49-75A66

Zonge, K. L. dan Hughes, L. J., 1991, Controlled Source Audio-Frequency Magnetotellurics, dalam Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 2, Application, Parts A and B, Society of Exploration Geophysicists

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyadari bahwa menjadi guru besar atau professor bukanlah tujuan akhir, tetapi justru langkah awal amanah baru untuk berkarya pada bidang akademik dan penelitian lebih baik, membuka jalan bagi generasi muda untuk berinovasi berdasarkan ilmu pengetahuan, serta berkontribusi pada kecerahan dan kesejahteraan masyarakat. Pencapaian jabatan akademik ini, bukanlah hasil kerja keras individual penulis semata, tetapi melibatkan dukungan dan kerjasama semua pihak baik kolega dosen dan tendik, mahasiswa serta institusi ITB. Oleh karenanya dengan segala kerendahan hati penulis mengucapkan rasa terima kasih yang dalam kepada Rektor dan jajaran pimpinan ITB, pimpinan dan anggota Senat Akademik ITB, pimpinan dan anggota Forum Guru Besar ITB serta Dekan dan jajaran pimpinan FMIPA, staf kepegawaian dan lainnya yang senantiasa mendukung dan melancarkan proses pengurusan kenaikan jabatan.

Terima kasih yang tulus juga penulis sampaikan kepada kolega dosen dan tendik di lingkungan FMIPA, kolega dosen pada rumpun keilmuan Fisika, Kaprodi Sarjana Fisika, Kaprodi Magister dan Doktor Fisika, Kaprodi Magister Pengajaran Fisika, Kaprodi Magister Sains dan rekayasa Nuklir dan Doktor Rekayasa Nuklir. Terima kasih penulis ucapkan pula kepada Ketua KK Fisika Bumi dan Sistem Kompleks, Prof. Umar Fauzi yang senantiasa menyemangati, mendorong, merekomendasikan dan mengawal proses kenaikan jabatan ke guru besar. Secara khusus penulis

ucapkan terima kasih kepada Prof. Doddy Sutarno, yang memperkenalkan penulis dengan dunia elektromagnetik kebumihan secara lebih intens, menjadi pembimbing tugas akhir dan tesis, serta pembimbing dan pembina karir penulis dari awal bergabung dengan ITB hingga sekarang ini. Beliau juga menjadi salah satu rekomendator penulis untuk menjadi guru besar di ITB. Semoga Allah SWT, membalas kebaikan semua pihak dengan balasan yang lebih tinggi nilai kebaikannya.

Ungkapan terima kasih yang dalam penulis sampaikan pula kepada Prof. Satria Bijaksana (FTTM ITB), Prof. Benyamin Sapiie (FITB ITB), Prof. Hendarmawan (FTG Unpad), Prof. Baba Musta (Universiti Malaysia Sabah, dan Prof. Em. Tsuneomi Kagiya (Kyoto University) yang telah bersedia menjadi rekomendator penulis ketika menjalani proses pengusulan kenaikan jabatan guru besar. Terima kasih dan apresiasi yang tinggi kepada semua pihak yang tak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Terima kasih juga penulis sampaikan kepada Prihandhanu Mukti Pratomo, S.Si., M.Si. serta seluruh anggota Lab. WS Channel baik yang sudah alumni maupun masih menjadi mahasiswa yang tak dapat disebutkan satu per satu atas dukungan, keceriaan dan energi yang tersedia menghidupkan laboratorium induksi EM tempat karya-karya dihasilkan.

Kepada kedua orang tua yang telah berpulang ke haribaan ilahi, Ayahanda Susan Suhadi dan Ibunda Tati Sumiati, terima kasih atas bimbingan hidup, dorongan dan doa terus menerus yang memungkinkan penulis berada di titik ini. Semoga Allah mencurahkan maghfirah dan

rahmat-Nya senantiasa. Kepada Kakak-kakak dan adik-adik di keluarga besar, terima kasih atas dukungan dan doa serta kebersamaan selama ini.

Akhirnya, teruntuk istri dan anak-anak tercinta: Eleonora, Adiva, Zyad dan Samy, terima kasih tak terhingga atas kesetiaan mendampingi, mendoakan, menyediakan suasana ceria serta menjadi sumber lautan semangat untuk berkiprah dan berkarya.

CURRICULUM VITAE



Nama : **Prof. Ir. WAHYU SRIGUTOMO,**
S.Si., M.Si., Ph.D.

Tmpt./tgl lahir : Bandung, 13 Juli 1970

Kel. Keahlian : Fisika Bumi dan Sistem
Kompleks, FMIPA ITB

Alamat Kantor : Jalan Ganesha 10 Bandung

Nama Istri : Dr. Eleonora Agustine, S.Si., M.T.

Anak-anak : 1. Dyah Reyhaniadiva Srigutomo, S.T.

2. Hilmy Reyhanzyad Srigutomo

3. Samy Reyhannurayman Srigutomo

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Doctor of Philosophy (Ph.D.), Geophysics, The University of Tokyo, Japan, 2022. Dissertation: *Resistivity structure of Unzen Volcano, Japan from time-domain electromagnetic (TDEM) data and its implication to magmatic volatiles-groundwater interaction.*
- Magister Sains (M.Si.), KBK Fisika Bumi, Fisika FMIPA ITB, 1997. Tesis: *Pemodelan elektromagnetik 2-D menggunakan metode finite-element untuk kasus gelombang bidang (MT) dan kasus sumber arus garis.*
- Sarjana Sains (S.Si.), KBK Fisika Bumi, Fisika FMIPA ITB, 1995. Tugas Akhir: *Pemodelan elektromagnetik 2-D menggunakan metode*

persamaan integral.

- Program Studi Program Profesi Insinyur (Ir.), Teknik Geofisika, Fakultas Teknologi Pertambangan dan Mineral (FTTM) ITB, 2021.

II. RIWAYAT PEKERJAAN DI ITB

- Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung (2020 - sekarang).
- Ketua Program Studi Magister dan Doktor Fisika (Februari 2020 - Mei 2020).
- Direktur Sarana dan Prasarana Institut Teknologi Bandung (2015 - 2020).
- Wakil Direktur Sarana dan Prasarana Institut Teknologi Bandung (2013 - 2015).
- Kepala Sub-Direktorat Sarana dan Prasarana Institut Teknologi Bandung (Juli 2012 - Desember 2012).
- Manejer Kerjasama dan Pengabdian kepada Masyarakat FMIPA ITB (Januari 2011 - Desember 2012).
- Koordinator Tim Humas FMIPA-ITB (2007 - 2010).
- Sekretaris Eksekutif Program B Program Dikti, Dept. Fisika, FMIPA ITB (2005).

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- CPNS, III/A, 01-02-1997

- Penata Muda, III/A, 01-08-1998
- Penata, III/C, 01-04-2010
- Penata Tingkat I, III/D, 01-10-2013
- Pembina, IV/A, 01-10-2015
- Pembina Tingkat 1, IV/B, 01-04-2021

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli Madya, 01-04-1999
- Asisten Ahli, 01-01-2001
- Lektor Kepala, 01-12-2009 (Loncat Jabatan)
- Profesor/Guru Besar, 01-07-2020

V. KEGIATAN PENELITIAN

- Pengembangan Pemodelan dan Optimasi Bayesian Metode Elektromagnetik Domain Waktu (TDEM) dan Aplikasinya untuk Eksplorasi Kebumian, Skema: Pendidikan Magister menuju Doktor untuk Sarjana Unggul PPSPMDSU 2022 (Ketua Peneliti).
- Distribusi Kedalaman Titik Curie, Gradien Termal, dan Aliran Panas di Pulau Jawa, Indonesia, Skema: Riset Unggulan ITB 2022 (Ketua Peneliti)
- Perubahan Perilaku Masyarakat Terkait Protokol Kesehatan 3M Selama Pandemi Covid-19, FMIPA ITB - Institut Teknologi Sepuluh Nopember (BNPB) no. FMIPA.PM-2-03-2020.

- Pemanfaatan Bahan Bakar Nuklir Berbasis Thorium Untuk Industri Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di Indonesia. Tahun: 2020 | Peran: Anggota Pengusul | Sumber Dana: Ristekdikti, Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi
- Pemanfaatan Bahan Bakar Nuklir Berbasis Thorium Untuk Industri Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di Indonesia. Tahun: 2019 | Peran: Anggota Pengusul | Sumber Dana: Ristekdikti, Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi
- Pemodelan Numerik Fisika Gunungapi Untuk Studi Mekanisme Aktivitas Gunungapi (Studi Kasus Gunung Sinabung). Tahun: 2018 | Peran: Ketua Pengusul | Sumber Dana: Internal Perguruan Tinggi, Penelitian Dasar
- Pengembangan Sistem Deteksi Dini Gunung Api Berbasis Internet of Things (IoT). Tahun: 2018 | Peran: Anggota Pengusul | Sumber Dana: Internal Perguruan Tinggi, Penelitian Dasar
- Peningkatan Efisiensi Pemanfaatan Energi Biogas Dengan Venturimeter. Tahun: 2018 | Peran: Anggota Pengusul | Sumber Dana: Ristekdikti, Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi
- Development of 3-D Magnetotelluric Finite Element Modeling and Efficient Non-Linear Inversion in Volcanology and Geothermal System. Tahun: 2018 | Peran: Ketua Pengusul | Sumber Dana: Swasta / Industri, Penelitian Dasar

- Pemanfaatan Bahan Bakar Nuklir Berbasis Thorium Untuk Industri Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di Indonesia. Tahun: 2018 | Peran: Anggota Pengusul | Sumber Dana: Ristekdikti, Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi
- Pengembangan Pemodelan dan Inversi Geometri Kontinu Metode Self-Potential dan DC Resistivity serta Aplikasinya untuk Investigasi Struktur Hidrologi Dangkal. Tahun: 2017 | Peran: Ketua Pengusul | Sumber Dana: Internal Perguruan Tinggi,
- Pengembangan Experimental Studi struktur bawah permukaan gunung Tangkuban Parahu dan sekitarnya berdasarkan data elektromagnetik yang diintegrasikan dengan data geofisika lainnya untuk menentukan zona sumber panas bumi. Tahun: 2016 | Peran: Anggota Pengusul | Sumber Dana: Ristekdikti, Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi
- Pengembangan Model Predator-Mangsa KF untuk Menyelidiki Pengaruh Konsentrasi Aerosol terhadap Curah Hujan di Beberapa Wilayah Indonesia. Tahun: 2016 | Peran: Ketua Pengusul | Sumber Dana: Sumber Dana Lain, Pengembangan Experimental
- Pengembangan Sistem Deteksi Dini Gunung Api. Tahun: 2016 | Peran: Anggota Pengusul | Sumber Dana: Ristekdikti, Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi
- Implementasi Metode Time Domain Electromagnetic (TDEM) untuk monitoring injeksi CO₂ ke bawah permukaan bumi. Tahun:

2016 | Peran: Anggota Pengusul | Sumber Dana: Ristekdikti, Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi

- Implementasi Metode Time Domain Electromagnetic (TDEM) untuk monitoring injeksi CO₂ ke bawah permukaan bumi. Tahun: 2015 | Peran: Anggota Pengusul | Sumber Dana: Ristekdikti, Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi
- Pemanfaatan limbah nuklir tingkat tinggi pada beberapa tipe reaktor nuklir berpendingin gas bersuhu tinggi (HTGR). Tahun: 2015 | Peran: Anggota Pengusul | Sumber Dana: Lembaga Nirlaba, Penelitian Terapan
- Pemodelan Kuantitatif Aliran Hidrotermal Gunung Tangkuban Parahu Berbasis Data SelfPotential dan Magnetotellurik. Tahun: 2014 | Peran: Ketua Pengusul | Sumber Dana: Pemerintah, Penelitian Terapan.

VI. PUBLIKASI (Jurnal Internasional)

- Erniwati Halawa, Yazid Bindar, Acep Purqon, and **Wahyu Srigutomo**, *Prediction of Carbon Monoxide Concentration with Variation of Support Vector Regression Kernel Parameter Value*, Journal of Mathematics and Fundamental Sciences, 54(1), 2022, pp. 39-53.
- Alamta Singarimbun, Umar Said, Dini Andriani, R. B. Astro, Bakrun Bakrun, I G. P. F. Soerya Djaja, Eleonora Agustine, Pepen Suspendi, **Wahyu Srigutomo**, Curie Point Depth Analysis of Lesugolo Area, East Nusa Tenggara, Indonesia Based on Ground

Magnetic Data, Journal of Engineering and Technological Sciences, 2022, 54(1), 220111.

- **W Srigutomo**, CA Hapsoro, A Purqon, Warsa, D Sutarno, T Kagiya, *Nonlinear Inversion Using Very Fast Simulated Annealing for Horizontal Electric Dipole Time-Domain Electromagnetic Data*, Journal of Electromagnetic Engineering and Science, 2021, 21(5), 379-390.
- **Srigutomo, W.**, Djaja, I.G.P.F.S., Puspito, N.T., *Synthetic Source Inversion Tests with the Damped Isochrone Inversion Approach*, Journal of Earthquake and Tsunami, 2021, 15(1), 2150002.
- 5. Hapsoro, C.A., **Srigutomo, W.**, Purqon, A., Sutarno, D., Kagiya, T., *Global inversion of grounded electric source time-domain electromagnetic data using particle swarm optimization*, Journal of Engineering and Technological Sciences, 2021, 53(1), pp. 1-27, 210101.
- Maria Evita, Azka Zakiyyatuddin, Sensius Seno, Nina Siti Aminah, **Wahyu Srigutomo**, Irwan Meilano, Ari Setiawan, Herlan Darmawan, Imam Suyanto, Mohammad Yasin, Retna Apsari, Wiwit Suryanto, Mitra Djamal, *Development of Volcano Warning System for Kelud Volcano*, Journal of Engineering & Technological Sciences, 2021, 53(2).
- Wahyudi, Setiawan, A., Putra, H., **Srigutomo, W.**, Suryanto, W., *Topography changes and thermal distribution at the Kelud crater after*

the 2014 Plinian eruption, Indonesian Journal of Geography, 2021, 52(3), pp.411-417.

- Girsang, W., Sari, D.C.R., **Srigutomo, W.**, Gondhowiardjo, T.D., Sasongko, M.B., *Concept and application of relaxing radial retinectomy for retinal detachment with advanced proliferative vitreoretinopathy*, International Journal of Retina and Vitreous, 2020, 6(1), 46.
- M. Yasin, Retna Apsari, Kristia Ningsih, Y.G.Y. Yhuwana, M. Zulkarnaen, Mitra Djamal, Irwan Meilano, Maria Evita, Nina Siti Aminah, **Wahyu Srigutomo**, Ari Setiawan, Herlan Darmawan, Imam Suyanto, Wahyudi, Wiwit Suryanto, Heriansyah Putra, Irzaman, Perdinan, S.W. Harun, *Detection of seismograph signal using fiber bundle sensor*, Optik, volume 208, April 2020, Article number 164554.
- Iryanti, M., Aminudin, A., Agustine, E., Bijaksana, S., **Srigutomo, W.**, Setiawan, T., *Identifying of peat soil layers using K-means cluster in the South Kalimantan, Indonesia*, Journal of Engineering Science and Technology, 2020, 15(4), pp.2522-2531.
- **Srigutomo, W.**, Heriyanto, M., Hilmi Aufa, M., *Gravity inversion of Talwani model using very fast simulated annealing*, Journal of Mathematical and Fundamental Sciences, Volume 51, Issue 2, 2019, pp 177-190.
- **Wahyu Srigutomo**, Hairil Anwar, Eleonora Agustine, Harry Mahardika, *Three-dimensional DC Resistivity Modeling using*

Galerkin Finite Element Method Composed by Tetrahedral Elements, J. Eng. Technol. Sci., Vol. 51, No. 4, 2019, pp 516-536.

- Melany Febrina, Eko Satria, Mitra Djamal, **Wahyu Srigutomo**, and Martin Liess, *Development of a simple CO2 sensor based on the thermal conductivity detection by a thermopile*, Journal of Measurement, 133(2019), pp 139-144.
- **Srigutomo, W.**, Handayani, G., Pribadi, A.R., Nugraha, A.M., *Investigation of 1D shear wave velocity profile using the spatial autocorrelation (SPAC) method: Case study at West Park ITB Campus, Bandung, Indonesia*, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 13(6), pp 2096-2107 (2018).
- Saepuzaman, D., **Srigutomo, W.**, and Nugraha, M.G., *Cililin landslide process modeling using lumped mass model*, Pertanika Journal of Science and Technology, 25(s), pp 23-34 (2017).
- Nugraha, M.G., Kirana, K.H., **Srigutomo, W.**, Saepuzaman, D., Hapsoro, C.A., and Septiyanto, R.F., *Prediction of rockfall run-out using CRSP 3D: A case study at Gunung Batu, Lembang, West Java, Indonesia*, Pertanika Journal of Science and Technology, 25(s), pp 47-56 (2017).
- **Srigutomo, W.**, Kurnia, R., and Suprijadi, *Improvement of fluid simulation runtime of smoothed particle hydrodynamics by using graphics processing unit (GPU)*, Journal of ICT Researcher and Applications, 11(3), pp 230-252 (2017).

- Putra, S.D.H., Suryantini, and **Srigutomo, W.**, *Thermal modeling and heat flow density interpretation of the onshore Northwest Java Basin, Indonesia*, Journal of Geothermal Energy, 4(1), 12 (2016).
- Djamal, M., Indrasari, W., Ramli, and **Srigutomo, W.**, *Detection of magnetic material in soil subsurface using electromagnetic induction method based on fluxgate sensor*, Journal of Key Engineering Materials, 675-676, pp 494-500 (2016).
- Sampurno, J., Azwar, A., Latief, F.D.E., and **Srigutomo, W.**, *Multifractal characterization of pore size distribution of peat soil*, Journal of Mathematical and Fundamental Sciences, 48(2), pp 106-114 (2016).
- P. Abadi, S. Saito, and **W. Srigutomo**, *Low-latitude scintillation occurrences around the equatorial anomaly crest over Indonesia*, Ann. Geophys., 32, 7-17, 2014, doi: 10.5194/angeo 32-7-2014.
- Widyaningrum Indrasari, Mitra Djamal, **Wahyu Srigutomo**, Nur Hadziqoh, *High Sensitivity Fluxgate Sensor for Detection of AC Magnetic Field: Equipment for Characterization of Magnetic Material in Subsurface*, Advanced Materials Research Vol. 896 (2014) pp 718-721, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.896.718,
- Imran Hilman Mohammad, **Wahyu Srigutomo**, Doddy Sutarno, Prihadi Sumintadiredja, *Interpretation of 1D Vector Controlled-Source Audio-Magnetotelluric (CSAMT) Data using Full Solution Modeling*, J. Math. Fund. Sci., Vol. 45, No. 2, 2013, 172-188.

- Widyaningrum Indrasari, Mitra Djamal, **Wahyu Srigutomo**, Ramli, *A Magnetic Distance Sensor with High Sensitivity Based on Double Secondary Coil of Fluxgate*, IOSR Journal of Applied Physics Vol. 2(5) Nov - Dec 2012, pp 29 -35.
- Khairurrijal, Eko Widiatmoko, **Wahyu Srigutomo**, and Neny Kurniasih, *Measurement of gravitational acceleration using a computer microphone port*, Physics Education, IOP Science, 2012, pp 709-714.
- Imran Hilman Mohammad, **Wahyu Srigutomo**, Doddy Sutarno, Prihadi Sumintadireja, *The Modeling of 2D Controlled Source Audio Magnetotelluric (CSAMT) Responses Using Finite Element Method*, Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2012, 4, 293-304 doi:10.4236/jemaa.2012.47041
- Estevanus Kristian Huliselan, Satria Bijaksana, **Wahyu Srigutomo**, Edwan Kardena, *Scanning electron microscopy and magnetic characterization of iron oxides in solid waste landfill leachate*, Journal of Hazardous Materials, 179 (2010), pp 701-708.
- **Wahyu Srigutomo**, Tsuneomi Kagiya, Wataru Kanda, Hiroshi Munekane, Takeshi Hashimoto, Yoshikazu Tanaka, Hisashi Utada, Mitsuru Utsugi, *Resistivity structure of Unzen Volcano, Kyushu, Japan from TDEM survey*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 175 (2008), 231-240.
- S. Komori, T. Kagiya, M. Utsugi, A. Terada, H. Inoue, **W. Srigutomo**, Y. Tanaka, H. Hoshizumi, *Relation between High*

Temperature and Low Resistivity in the Shallow Part of the Northeastern Foot of Unzen Volcano (Bulletin of Volcanological Society of Japan, vol 53 No. 4, 2008, p. 131-136, in Japanese with English abstract and figure captions).

- Kagiya, T., Hashimoto, T., **Wahyu Srigutomo**, Kanda, W., Tanaka, Y. and Utsugi, M., *Interaction of magma and groundwater in Unzen Volcano inferred from electromagnetic observations*, Monthly Chikyu, 24, 858-865, 2002 (in Japanese).

VII. PENGHARGAAN

- Satyalancana Karya Satya 10 Tahun
- Satyalancana Karya Satya 20 Tahun

VIII. SERTIFIKASI

- Sertifikasi Dosen Nasional, 24 Agustus 2011. Kementerian Pendidikan Nasional



Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132

Telp. (022) 2512532, E-mail: sekretariat-fgb@pusat.itb.ac.id

 fgb.itb.ac.id

 [FgbItb](https://www.facebook.com/FgbItb)

 [FGB_ITB](https://twitter.com/FGB_ITB)

 [@fgbitb_1920](https://www.instagram.com/fgbitb_1920)

 [Forum Guru Besar ITB](https://www.youtube.com/ForumGuruBesarITB)

