



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Hendra Grandis

**PERAN PEMODELAN GEOFISIKA
DALAM EKSPLORASI SUMBER-DAYA ALAM
DAN MITIGASI BENCANA KEBUMIHAN**

30 September 2017
Aula Barat Institut Teknologi Bandung

**Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**
30 September 2017

Profesor Hendra Grandis

**PERAN PEMODELAN GEOFISIKA
DALAM EKSPLORASI SUMBER-DAYA ALAM
DAN MITIGASI BENCANA KEBUMIHAN**



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: PERAN PEMODELAN GEOFISIKA DALAM EKSPLORASI SUMBER-DAYA ALAM DAN MITIGASI BENCANA KEBUMIHAN
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,
tanggal 30 September 2017.

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
Data katalog dalam terbitan

Hendra Grandis
PERAN PEMODELAN GEOFISIKA DALAM EKSPLORASI SUMBER-DAYA ALAM
DAN MITIGASI BENCANA KEBUMIHAN
Disunting oleh Hendra Grandis

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2017
viii+56 h., 17,5 x 25 cm
ISBN 978-602-6624-04-8
1. Geofisika 1. Hendra Grandis

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan kesehatan, kemampuan dan kekuatan untuk menyelesaikan naskah orasi ilmiah dengan judul "**Peran Pemodelan Geofisika dalam Eksplorasi Sumber-daya Alam dan Mitigasi Bencana Kebumihan**". Orasi ilmiah ini merupakan salah bentuk pertanggungjawaban akademik penulis sebagai Guru Besar ITB dalam bidang Geo-Elektromagnetik di Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan (FTTM) ITB.

Orasi ilmiah yang tertuang dalam tulisan ini membahas secara singkat metode pemodelan geofisika, aplikasi dan perkembangan terkini serta prospeknya di masa depan. Fokus dan contoh yang ditampilkan pada tulisan singkat ini, yaitu mengenai pemodelan geofisika dan metode elektromagnetik (EM), dimaksudkan untuk memberikan gambaran mengenai komitmen pada aktivitas penelitian, pendidikan dan pengabdian pada masyarakat sesuai dengan bidang keilmuan dan keahlian saya.

Orasi ilmiah kali ini agak berbeda karena diselenggarakan sekaligus sebagai salah satu sesi dari kuliah Studium Generale (KU-4078) yang merupakan kuliah pilihan bagi mahasiswa seluruh ITB. Penulis berharap karya kecil ini bermanfaat bagi para pembaca untuk memperoleh wawasan dan inspirasi serta dapat menjadi salah satu rujukan awal bagi yang berminat menekuni bidang geofisika, khususnya pemodelan geofisika.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar ITB atas kesempatan yang telah diberikan untuk menyampaikan orasi ilmiah pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar ITB. Semoga aktivitas kita ini dapat berkontribusi bagi kemajuan almamater, bangsa dan negara tercinta serta memperoleh ridho Allah SWT.

Bandung, 30 September 2017

Hendra Grandis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
SINOPSIS	vii
1. PENDAHULUAN	1
2. PRINSIP DASAR GEOFISIKA	2
3. PEMODELAN GEOFISIKA	5
3.1 Pemodelan Inversi dengan Pendekatan Linier	5
3.2 Pemodelan Inversi dengan Pendekatan Global	7
Pencarian Sistematis dan Acak (<i>Random</i>)	7
Konsep Probabilitas untuk Formulasi Pemodelan Inversi	9
4. PEMODELAN INVERSI SEBAGAI OPTIMASI	10
4.1 Algoritma Markov Chain Monte Carlo (MCMC)	10
4.2 Algoritma Optimasi Terinspirasi Proses Alam	13
Algoritma Genetika	14
Particle Swarm Optimization (PSO)	16
5. APLIKASI METODE ELEKTRO-MAGNETIK (EM)	20
5.1 Studi Regional	21
5.2 Studi Patahan Aktif	24
5.3 Studi Gunung-api Aktif	26
5.3 Eksplorasi Geotermal	28
6. PERSPEKTIF KE DEPAN	34

6.1 Pengembangan Pemodelan Geofisika	34
6.2 Aplikasi Geo-Elektromagnetik	35
6.3 Pengembangan Geosains	39
7. PENUTUP	40
8. UCAPAN TERIMA KASIH	41
DAFTAR PUSTAKA	43
CURRICULUM VITAE	49

SINOPSIS

Pemodelan inversi geofisika adalah pencarian minimum suatu fungsi (fungsi *misfit*, fungsi obyektif) pada ruang berdimensi banyak sesuai dengan jumlah parameter model. Pada umumnya metode stokastik digunakan untuk mengeksplorasi ruang model secara intensif melalui algoritma *guided random search*, yaitu pencarian "acak" yang diarahkan pada bagian dari ruang model yang memiliki probabilitas tinggi sebagai daerah solusi. Beberapa algoritma mengadopsi sistem dengan mekanisme tertentu yang ada di alam (*nature inspired algorithm*) untuk mencapai solusi atau target. Salah satu contoh yang relatif sederhana adalah Particle Swarm Optimization (PSO). Sejumlah besar "pelaku" atau agen bergerak dalam ruang model berdasarkan proses belajar dari pengalaman dan dari sesamanya menuju posisi solusi optimal. Pemodelan inversi geofisika pada dasarnya adalah permasalahan optimasi yang juga menjadi obyek bahasan bidang-bidang ilmu lainnya.

Model atau solusi menggambarkan distribusi atau variasi spasial sifat fisika bawah-permukaan yang dapat digunakan untuk memperkirakan kondisi atau struktur geologinya. Oleh karena itu penerapan geofisika sangat beragam, mulai dari eksplorasi sumber-daya alam (migas, geotermal, mineral, air tanah), studi lingkungan dan keteknikan (perkiraan distribusi polutan dalam tanah, konfigurasi batuan keras untuk fondasi bangunan besar dan lain lain) sampai mitigasi bencana

alam kebumian (studi sesar aktif, perkiraan struktur internal gunung-api aktif, pemetaan bidang gelincir pada tanah berpotensi longsor dan sebagainya).

PERAN PEMODELAN GEOFISIKA DALAM EKSPLORASI SUMBER-DAYA ALAM DAN MITIGASI BENCANA KEBUMIAN

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan tempat pertemuan tiga lempeng besar, yaitu lempeng Eurasia, lempeng India-Australia dan lempeng Pasifik serta lempeng Filipina yang relatif lebih kecil. Oleh karena itu kondisi geologi dan tektonik Indonesia sangat kompleks dengan tingkat kegempaan dan aktivitas gunung-api yang tergolong sangat tinggi. Namun demikian, konsekuensi lain dari kondisi geologi dan tektonik tersebut adalah banyaknya cekungan sedimen yang berpotensi sebagai zona penghasil migas, zona mineralisasi serta potensi energi geotermal (panas-bumi) yang sangat besar.

Geofisika merupakan salah satu cabang ilmu kebumian yang dapat digunakan untuk mempelajari kondisi geologi bawah-permukaan khusus-nya dalam rangka eksplorasi sumber-daya alam kebumian. Selain itu, sebagai perangkat (*tools*) penyelidikan bawah-permukaan bumi, geofisika dapat pula dimanfaatkan untuk lebih memahami fenomena alam kebumian dalam rangka usaha mitigasi bencana alam kebumian, seperti gempa-bumi, aktivitas gunung-api, gerakan tanah dan lain sebagainya.

Pada tulisan ini diperkenalkan geofisika secara singkat kemudian diikuti dengan pembahasan mengenai pemodelan geofisika yang

merupakan salah satu aspek penting dalam penerapan geofisika untuk berbagai tujuan dan obyek kajian sebagaimana disebut di atas. Untuk itu dibahas salah satu *trend* perkembangan pemodelan geofisika, yaitu algoritma optimasi yang mengadopsi prinsip-prinsip yang telah ada di alam (*nature inspired algorithms*). Selain itu disajikan pula secara garis besar beberapa contoh aplikasi geofisika dan pemodelan geofisika sebagai bagian dari usaha pengembangan ilmu dasar, eksplorasi sumber-daya alam (minyak dan gas, geotermal, mineral, dan sebagainya) serta mitigasi bencana kebumihan (gempa-bumi, aktivitas gunung-api, tanah longsor, dan lain lain).

Contoh-contoh aplikasi geofisika dan pemodelan geofisika lebih difokuskan pada metode elektromagnetik (EM) khususnya magnetotellurik (MT). Dengan demikian, tulisan singkat ini juga dimaksudkan untuk memberikan gambaran mengenai komitmen saya pada aktivitas penelitian, pendidikan dan pengabdian pada masyarakat sesuai dengan bidang keilmuan dan keahlian, baik di masa lalu maupun proyeksi dan prospeknya di masa yang akan datang.

2. PRINSIP DASAR GEOFISIKA

Secara sederhana geofisika adalah aplikasi ilmu **fisika** untuk mempelajari bagian dalam (*interior*) bumi mulai dari lapisan kerak bumi (*crust*) sampai inti bumi (*core*). Untuk mempelajari geofisika diperlukan penguasaan fisika dan **matematika** yang kuat, **komputasi** sebagai perangkat perhitungan dan analisis serta **geologi** untuk interpretasi data. Dalam geofisika dikenal metode yang berasosiasi dengan data

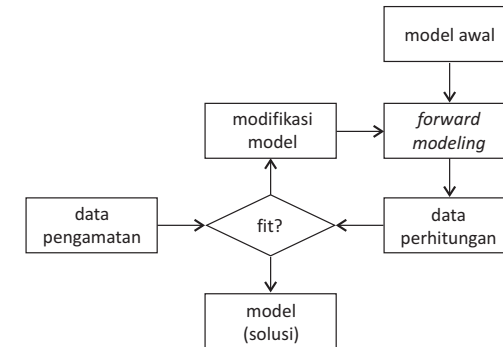
(gelombang, medan atau parameter observasi yang lain) dan parameter fisis bawah-permukaan yang relevan (densitas, sifat kemagnetan, kecepatan rambat gelombang seismik, resistivitas dan lain-lain). Metode-metode geofisika yang cukup dikenal antara lain adalah: gravitasi, magnetik, seismik refraksi dan refleksi, geolistrik, elektromagnetik (EM), dan sebagainya. Selain itu dikenal bidang kajian yang memanfaatkan metode-metode geofisika serta prinsip fisika lainnya untuk obyek yang lebih spesifik, seperti misalnya **seismologi**, **volkanologi** dan lain-lain [1].

Pada pengambilan (akuisisi) data lapangan diukur "sinyal" yang timbul sebagai akibat dari impuls atau gangguan buatan (artifisial) yang dikenakan pada bumi (misalnya gelombang seismik, medan EM), namun terdapat pula sinyal yang telah ada dengan sendirinya (misalnya gelombang gempa-bumi, medan EM, gravitasi, magnetik). Pengukuran dapat dilakukan di permukaan bumi atau di darat, di udara (*airborne geophysics*), di laut (*marine geophysics*) atau dapat pula di lubang bor (*borehole geophysics*) semuanya dengan tujuan untuk memperkirakan kondisi atau struktur bawah-permukaan bumi berdasarkan distribusi atau variasi parameter fisis-nya.

Data yang telah diukur dan direkam secara digital kemudian diproses untuk kompensasi adanya derau (*noise*) dan "sinyal" lain yang tidak diinginkan. Sinyal lain yang perlu dihilangkan biasanya merupakan efek dari fenomena yang telah diketahui, baik karena dapat diukur secara terpisah atau dapat dimodelkan, misalnya variasi temporal medan utama magnet bumi, efek topografi pada medan (percepatan) gravitasi dan lain-lain. Tujuannya adalah untuk mengisolasi sinyal yang benar-benar merupakan efek dari kondisi atau struktur bawah-permukaan, yang

sering disebut sebagai "sinyal geologi". Pengolahan data geofisika juga bertujuan untuk memunculkan karakteristik yang lebih spesifik dari suatu data yang disebut **anomali**, yaitu data dengan besaran atau pola yang berbeda dari data yang secara umum ada di lingkungan sekitarnya, baik secara temporal maupun spasial. Pada tahap ini *anomaly enhancement* umumnya mengandalkan teknik pemfilteran (*filtering*). Sinyal dengan frekuensi (atau panjang gelombang) tertentu dapat diredam, atau sebaliknya dikuatkan. Data geofisika pada umumnya merupakan fungsi dari posisi dan ditampilkan dalam bentuk peta. Oleh karenanya dalam geofisika dikenal pula frekuensi spasial ataupun panjang gelombang spasial [2,3].

Hasil pengolahan data geofisika hanya dapat digunakan untuk interpretasi secara kualitatif, misalnya untuk menentukan secara kasar daerah prospek yang masih perlu penyelidikan lebih lanjut. Untuk interpretasi kuantitatif perlu dilakukan pemodelan, yaitu dengan membuat model yang merepresentasikan distribusi spasial sifat fisis bawah-permukaan, misalnya densitas, kemagnetan, kecepatan gelombang seismik, resistivitas dan sebagainya. Dengan memanfaatkan prinsip-prinsip fisika yang relevan kita dapat mensimulasikan atau menghitung "data" sebagai respons dari model, yang biasa disebut sebagai proses pemodelan ke depan (*forward modeling*). Suatu model dianggap layak jika respons model tersebut (data perhitungan) telah cocok atau "fit" dengan data pengamatan [4,5]. Dengan kata lain, model tersebut telah dapat "menjelaskan" dengan baik data yang teramati atau terukur di lapangan (Gambar 1).



Gambar 1. Diagram alir prinsip pemodelan data geofisika.

3. PEMODELAN GEOFISIKA

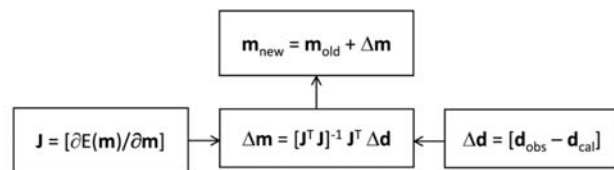
Proses pencocokan (*fitting*) antara data perhitungan dengan data pengamatan dalam geofisika disebut sebagai pemodelan inversi (*inverse modeling*). Pemodelan inversi telah berkembang sangat pesat sebagai bagian dari perangkat pengolahan data dan interpretasi dalam semua bidang geofisika, sehingga dapat dikatakan *geophysical problems are inverse problems*.

3.1 Pemodelan Inversi dengan Pendekatan Linier

Pemodelan inversi pada dasarnya adalah pencarian minimum suatu fungsi obyektif $E(\mathbf{m})$ yang menyatakan selisih kuadratik antara data pengamatan $\mathbf{d}_{\text{obs}}$ dan data perhitungan $\mathbf{d}_{\text{cal}}(\mathbf{m})$ untuk suatu model $\mathbf{m}$ tertentu. Dalam geofisika, fungsi obyektif adalah persamaan non-linier mengingat hubungan antara data dengan parameter model pada umumnya dinyatakan oleh persamaan non-linier $\mathbf{d}_{\text{cal}}(\mathbf{m})$. Turunan parsial orde pertama fungsi obyektif terhadap setiap parameter model yang

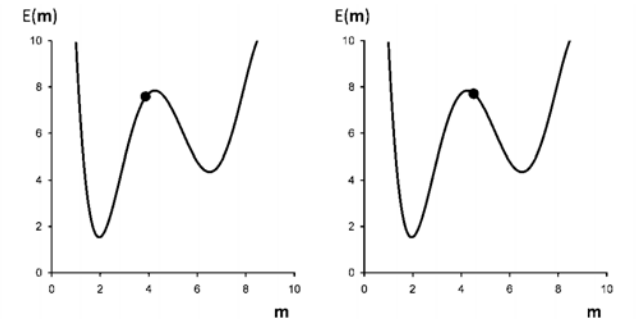
dinyatakan oleh matriks Jacobi $\mathbf{J}$ bersama *misfit* $\Delta \mathbf{d}$ digunakan untuk modifikasi model secara iteratif hingga diperoleh solusi (model) dengan *misfit* minimum [5,6]. Dalam hal ini, bagian modifikasi model pada Gambar 1 dihitung menggunakan prosedur sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2.

Secara konsep, fungsi obyektif adalah permukaan (*surface*) dalam ruang berdimensi banyak sesuai jumlah parameter model M . Sebagai ilustrasi, jika jumlah parameter model hanya 1 maka fungsi obyektif hanya berupa kurva. Pada kasus tersebut, 2 alternatif model awal (*initial model*) yang cukup berdekatan dapat konvergen ke solusi yang berbeda yang merupakan konsekuensi dari pendekatan linier (lihat Gambar 3).



Gambar 2. Prosedur modifikasi model sebagai bagian dari proses perbaikan model secara iteratif untuk memperoleh solusi, yaitu model dengan *misfit* minimum.

Pemodelan inversi non-linier dengan pendekatan linier memiliki dua kelemahan yang saling berkaitan, yaitu: (i) sensitif terhadap pilihan model awal dan (ii) kemungkinan konvergen menuju solusi yang tidak optimal atau minimum lokal, bukan minimum global. Hal ini berkaitan dengan penggunaan informasi "lokal" pada setiap iterasi pemodelan inversi non-linier dengan pendekatan linier. Konsekuensi dari kelemahan pendekatan linier tersebut adalah perlunya model awal yang cukup dekat dengan solusi atau model yang dicari [5,6].



Gambar 3. Ilustrasi fungsi obyektif (yang sebenarnya tidak diketahui) dengan 2 alternatif model awal yang dapat konvergen ke solusi yang berbeda, yaitu minimum global (kiri) dan minimum lokal (kanan).

3.2 Pemodelan Inversi dengan Pendekatan Global

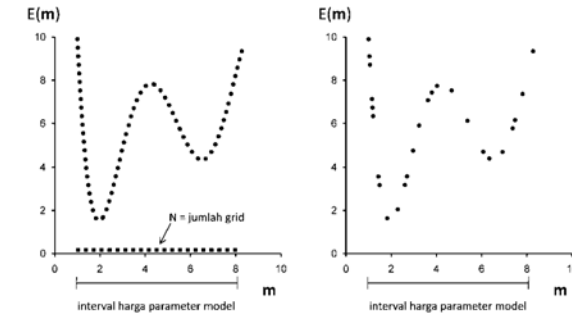
Pencarian Sistematis dan Acak (*Random*)

Untuk mengatasi kelemahan pendekatan linier pada pemodelan inversi non-linier maka digunakan pendekatan global yang menghindari penggunaan turunan fungsi obyektif terhadap setiap parameter model. Untuk itu dilakukan eksplorasi terhadap "ruang model", yaitu ruang berdimensi banyak sesuai dengan jumlah parameter model M , secara lebih intensif. Cara "termudah" meskipun mungkin bukan cara yang efisien adalah dengan pencarian sistematis (*systematic grid search*). Ruang model didefinisikan terlebih dahulu secara *a priori* dengan menentukan interval harga minimum dan maksimum setiap parameter model. Ruang model didiskretisasi dengan membagi setiap interval tersebut menjadi sejumlah grid sesuai dengan ketelitian yang diinginkan. Jika jumlah grid sama untuk semua parameter model, misalnya N , maka jumlah model yang harus dihitung respons-nya untuk evaluasi fungsi *misfit* atau fungsi

obyektif adalah N^M . Jika jumlah grid berbeda untuk tiap parameter model, maka jumlah model yang harus dievaluasi adalah $N_1 \times N_2 \times \dots \times N_M$.

Pencarian sistematis memerlukan waktu komputasi yang sangat lama jika jumlah parameter model dan diskretisasinya cukup besar. Bahkan pencarian sistematis tidak mungkin dilakukan untuk jumlah parameter model yang sangat banyak, misalnya untuk pemodelan bawah-permukaan secara 2D atau 3D. Untuk meningkatkan efisiensi perhitungan digunakan pencarian model secara acak (*random*). Bilangan acak dari komputer dipetakan pada interval harga minimum dan maksimum setiap parameter model. Dari sini muncul nama metode Monte Carlo yang merujuk kota tempat perjudian terkenal di Perancis selatan [7]. Jumlah model yang terpilih dari ruang model menentukan ketelitian dan efisiensi pencarian solusi. Ilustrasi kedua metode pendekatan global untuk kasus $M=1$ tersebut diperlihatkan pada Gambar 4.

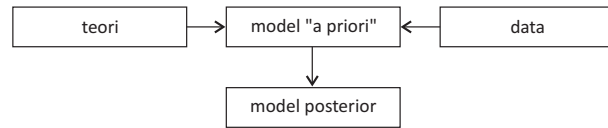
Pemodelan inversi non-linier dengan pendekatan global menghasilkan sejumlah besar model terpilih dari ruang model untuk dievaluasi. Pada dasarnya dapat dipilih model dengan *misfit* minimum sebagai solusi tunggal atau model inversi. Namun, hasil evaluasi sejumlah besar model dari ruang model merupakan informasi yang sangat berharga untuk diabaikan. Sebagian dari model yang telah dievaluasi memiliki *misfit* yang cukup kecil yang masih dapat ditoleransi mengingat adanya ketidakpastian (*error*) pada data. Dari model-model tersebut dapat dihasilkan solusi atau model inversi yang lebih informatif, yaitu model rata-rata dan ketidakpastiannya dalam bentuk standar deviasi setiap parameter model.



Gambar 4. Ilustrasi pemodelan inversi non-linier dengan pendekatan global, pencarian sistematis (kiri) dan pencarian acak (kanan).

Konsep Probabilitas untuk Formulasi Pemodelan Inversi

Formulasi pemodelan inversi menggunakan konsep probabilitas diperkenalkan salah satunya oleh Tarantola dan Valette [8]. Dalam hal ini konsep probabilitas digunakan untuk merepresentasikan informasi. Solusi inversi diperoleh dengan memadukan semua informasi yang tersedia, yaitu: teori yang menghubungkan data dengan parameter model, model *a priori* dan data lapangan. Hasilnya adalah model *a posteriori* atau model posterior. Dengan kata lain, model *a priori* diperbaharui (*di-update*) menjadi model *a posteriori* berkat adanya teori dan setelah diperoleh data (lihat Gambar 5). Ketidakpastian informasi secara alamiah telah terintegrasi dalam representasi informasi menggunakan konsep probabilitas tersebut. Dalam implementasinya formulasi pemodelan inversi menggunakan persamaan Bayes lebih sering digunakan [7], yang merupakan bentuk khusus dari formulasi yang diperkenalkan oleh Tarantola dan Valette [8].



Gambar 5. Formulasi pemodelan inversi menggunakan konsep probabilitas.

Inversi non-linier dengan pendekatan global khususnya yang menggunakan pencarian acak dapat menghasilkan sejumlah besar model yang memenuhi kriteria sebagai solusi. Formulasi permasalahan atau pemodelan inversi menggunakan konsep probabilitas dianggap lebih mengakomodasi sifat stokastik dari pencarian acak. Demikian pula dengan pendekatan global lainnya yang didasarkan pada pencarian acak atau variasinya yang termasuk dalam kategori metode Monte Carlo.

4. PEMODELAN INVERSI SEBAGAI OPTIMASI

4.1 Algoritma Markov Chain Monte Carlo (MCMC)

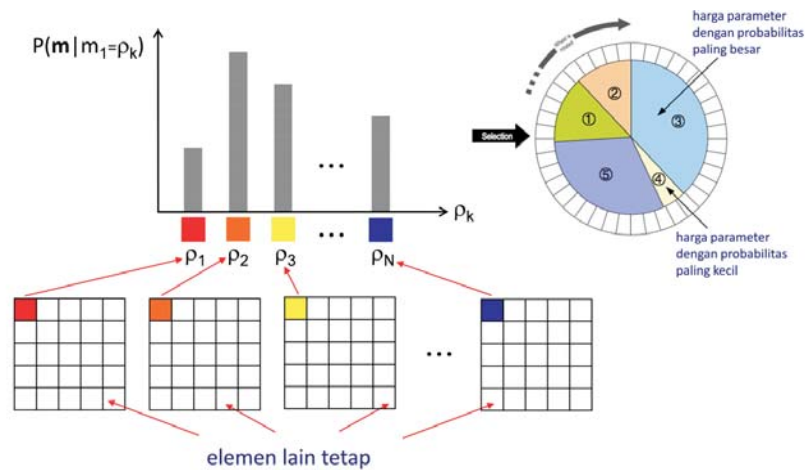
Pada pemodelan inversi, kriteria yang harus dipenuhi solusi (model) adalah fungsi *misfit* atau fungsi obyektif yang berharga minimum. Dalam implementasinya kriteria lain dapat digunakan untuk menentukan solusi. Kriteria tambahan selain fungsi obyektif disebut sebagai kendala (*constraint*) yang membatasi karakteristik model yang dapat diterima sebagai solusi inversi. Oleh karena itu pemodelan inversi dapat dianggap sebagai permasalahan optimasi, yaitu pencarian solusi optimum yang memenuhi berbagai kriteria yang telah ditentukan. Untuk menyederhanakan masalah tulisan singkat ini lebih fokus pada pencarian minimum fungsi obyektif tanpa kendala tambahan.

Pada metode pencarian acak murni (*pure random search*) yang telah dibahas sebelumnya semua model dalam ruang model memiliki peluang yang sama untuk terpilih. Dengan kata lain, probabilitas model untuk terpilih berharga konstan dalam interval harga minimum dan maksimum parameter model yang ditentukan secara *a priori*. Metode pencarian acak murni sangat tidak efisien karena model yang "jauh" dari solusi yang diinginkan memiliki peluang untuk terpilih. Model-model tersebut tetap harus dievaluasi harga fungsi obyektifnya [9].

Untuk meningkatkan efisiensi metode pencarian acak maka dilakukan modifikasi terhadap probabilitas pemilihan harga parameter model *a priori* sehingga tidak lagi berharga konstan pada semua intervalnya. Terdapat banyak metode optimasi yang secara umum dapat disebut sebagai metode pencarian acak terarah (*guided random search*), salah satunya adalah metode atau algoritma Markov Chain Monte Carlo (MCMC).

Gambar 6 menampilkan mekanisme seleksi harga parameter model untuk satu elemen model tertentu (misalnya lapisan dari suatu model berlapis horisontal, piksel dari suatu peta atau gambar). Probabilitas untuk suatu harga parameter model tidak lagi konstan melainkan bervariasi sebagai fungsi dari *misfit*. Jika *misfit* kecil maka probabilitas harga parameter model tersebut bernilai besar dan sebaliknya. Dalam hal ini, harga parameter model dari elemen model lainnya sementara dibuat tetap (tidak diubah). Modifikasi harga parameter model dari setiap elemen model secara berurutan membentuk suatu rantai Markov yang konvergen ke suatu kondisi stasioner. Secara teoritik, kondisi tersebut merepresentasikan model posterior atau solusi inversi lengkap dengan

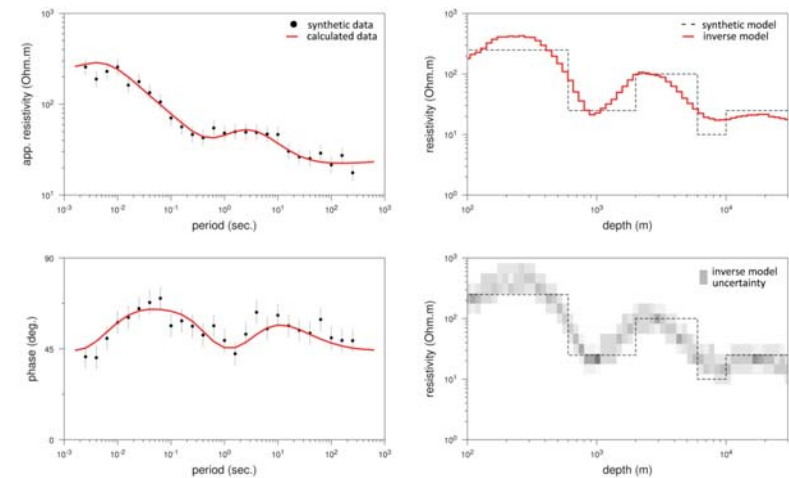
fungsi densitas probabilitas (*probability density function*) yang dapat digunakan antara lain untuk menentukan model optimum dan ketidakpastiannya [10,11].



Gambar 6. Mekanisme pemilihan harga parameter model untuk suatu elemen model pada algoritma MCMC dan implementasinya secara skematis menggunakan "roulette wheel".

Pada Gambar 7 ditampilkan hasil pemodelan inversi data magnetotellurik (MT) 1D menggunakan algoritma MCMC. Model terdiri dari lapisan-lapisan bawah-permukaan dengan ketebalan meningkat secara logaritmik sesuai dengan kedalaman untuk merepresentasikan berkurangnya resolusi. Pada proses inversi harga ketebalan tetap, parameter model yang dicari adalah harga resistivitas (tahanan-jenis) setiap lapisan. Harga resistivitas tiap lapisan dapat dipilih antara 1 sampai 1000 Ohm.m yang terdiskretisasi secara homogen pada skala logaritmik menjadi 20

harga resistivitas. Interval harga resistivitas tersebut secara *a priori* dianggap dapat mewakili lapisan bawah-permukaan yang konduktif sampai resistif. Untuk memperoleh model yang lebih bermakna (*feasible*) secara geologi ditambahkan kriteria kehalusan model (*smoothness*) agar variasi resistivitas dari satu lapisan ke lapisan lain cukup kecil [10].



Gambar 7. Data sounding MT, resistivitas-semu dan fasa sebagai fungsi dari periode (kiri), dan hasil pemodelan 1D menggunakan algoritma MCMC (kanan) [10].

4.2 Algoritma Optimasi Terinspirasi Proses Alam

Algoritma MCMC sebenarnya telah dikenal jauh sebelum algoritma optimasi yang lain namun dalam konteks yang berbeda, yaitu untuk simulasi fungsi densitas probabilitas tertentu. Dalam konteks optimasi, algoritma MCMC digunakan untuk menjelaskan mekanisme yang terdapat pada algoritma *simulated annealing* (SA) yang dikenal kemudian. Algoritma pencarian acak terarah (*guided random search*) telah berkembang

pesat dengan berbagai variasinya untuk menyelesaikan permasalahan optimasi yang terdapat pada berbagai bidang ilmu. Pada beberapa dekade terakhir algoritma optimasi banyak mengadopsi mekanisme yang terdapat di alam (*nature-inspired algorithms*) sebagaimana diresumekan secara garis besar oleh Yang [12] berikut ini:

- Genetic Algorithm (Holland, 1975; De Jong, 1975)
- Simulated Annealing (Kirkpatrick et al, 1983)
- Markov Chain Monte Carlo (Geman & Geman, 1984)
- Ant Colony Optimization (Dorigo, 1992)
- Particle Swarm Optimization (Kennedy & Eberhart, 1995)
- Differential Evolution (Storn & Price, 1997)
- Harmony Search (Geem et al, 2001)
- Artificial Bee Colony (Karaboga, 2005)
- Firefly Algorithm (Yang, 2008) , Cuckoo Search (Yang & Deb, 2009), Bat Algorithm (Yang, 2010)...

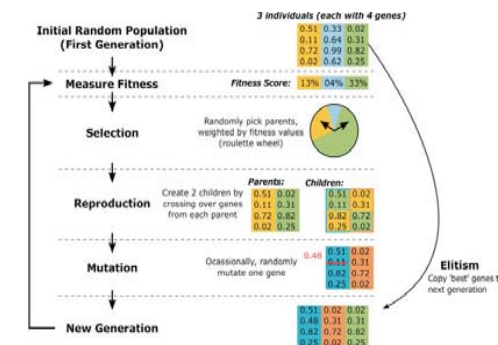
Sebagai gambaran bagaimana algoritma tersebut bekerja maka dibahas secara singkat algoritma genetika serta PSO yang cukup "intuitif".

Algoritma Genetika

Genetic Algorithm (GA) mengadopsi mekanisme evolusi biologis yang menghasilkan populasi dari generasi ke generasi berikutnya yang lebih unggul dan lebih sesuai dengan kondisi alam dan lingkungan (*survival for the fittest*). Anggota populasi direpresentasikan oleh model yang merupakan kumpulan harga parameter model yang dikodekan, biasanya kode biner, riil atau lainnya. Konsep *fitness* dinyatakan oleh kesesuaian antara respons model dengan data, sehingga *fitness* yang tinggi berasosiasi dengan *misfit* yang rendah.

Pada tahap awal, sejumlah individu sebagai anggota suatu populasi ditentukan secara acak. Pasangan individu dipilih melalui proses **seleksi** berdasarkan *fitness*-nya untuk proses **reproduksi**, dimana elemen-elemen dari model dipertukarkan dan dihasilkan populasi baru dengan jumlah yang sama dengan populasi sebelumnya. Anggota populasi ada yang mengalami **mutasi**, yaitu perubahan salah satu elemen model. Proses stokastik yang melibatkan bilangan acak terjadi pada semua proses, mulai dari seleksi berdasarkan *fitness*, pemilihan elemen model yang dipertukarkan pada reproduksi, pemilihan model dan elemen model yang mengalami mutasi. Mekanisme elitisme memungkinkan individu terbaik pada satu generasi otomatis menjadi anggota generasi berikutnya (Gambar 8).

Evolusi dari satu generasi ke generasi berikutnya merepresentasikan eksplorasi ruang model untuk menghasilkan sekumpulan model yang makin mendekati model optimal. Solusi inversi biasanya diambil model terbaik atau model rata-rata beserta ketidakpastiannya [4,6].



Gambar 8. Ilustrasi optimasi menggunakan algoritma genetika sederhana dengan kode bilangan riil (sumber: nature.com).

Particle Swarm Optimization (PSO)

Algoritma PSO didasarkan pada perilaku kelompok hewan untuk mencapai target bersama. Anggota kelompok yaitu individu (atau partikel) merepresentasikan model, sementara target adalah "posisi" dalam ruang model dimana model memenuhi kriteria *misfit* minimum. Pada algoritma PSO yang paling sederhana, setiap individu "bergerak" dalam ruang model berdasarkan pada hasil pembelajaran pribadi (*cognitive learning*) dan pembelajaran dari lingkungannya (*social learning*). Sinergi dari kedua pembelajaran tersebut pada setiap individu dapat membuat sekelompok individu atau populasi mencapai target bersama.

Pada pembelajaran pribadi, individu mengikuti mekanisme **inersia** dan **memori**, sedangkan pada pembelajaran dari lingkungannya, individu menggunakan informasi dari individu lainnya atau mekanisme **kerja-sama** (*cooperation*). Pada mekanisme inersia, individu akan tetap bergerak sesuai dengan arah pergerakan sebelumnya. Mekanisme memori memungkinkan individu bergerak ke posisi terbaik sebelumnya (*personal best*). Individu juga memanfaatkan informasi mengenai posisi terbaik dari individu lainnya saat ini (*global best*) dan bergerak ke arah tersebut (lihat Gambar 9).

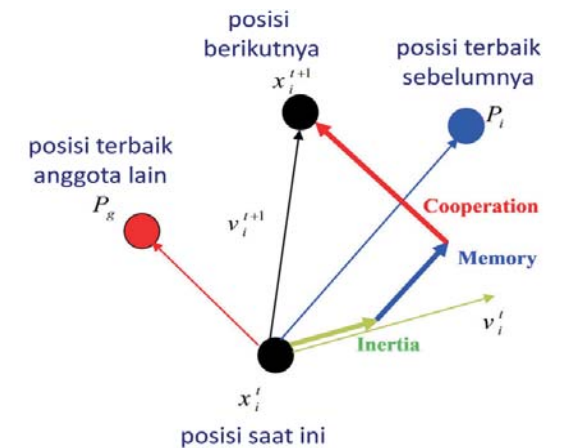
PSO menggunakan formulasi sederhana mekanika benda bergerak dengan kecepatan berubah beraturan. Posisi suatu individu pada ruang model saat ini $x(k+1)$ ditentukan oleh posisi $x(k)$, kecepatan $v(k)$ dan percepatan $a(k)$ sebelumnya. Untuk penambahan waktu (iterasi) satu satuan waktu (*unit time*) maka,

$$x(k+1) = x(k) + v(k) + \frac{1}{2} a(k)$$

Kecepatan merepresentasikan inersia, sedangkan percepatan terdiri dari komponen memori dan kerja-sama. Untuk setiap iterasi dalam satu satuan waktu, besaran kecepatan dan percepatan menjadi besaran jarak sehingga semua komponen dapat dijumlahkan secara langsung. Dengan demikian komponen memori adalah jarak antara posisi individu yang ditinjau dengan posisi *personal best* p , sementara komponen kerja-sama adalah jarak antara individu tersebut dengan posisi *global best* g (k) sebagaimana dinyatakan oleh,

$$x(k+1) = x(k) + C_1 \times v(k) + C_2 \times R_1 \times (p - x(k)) + C_3 \times R_2 \times (g(k) - x(k))$$

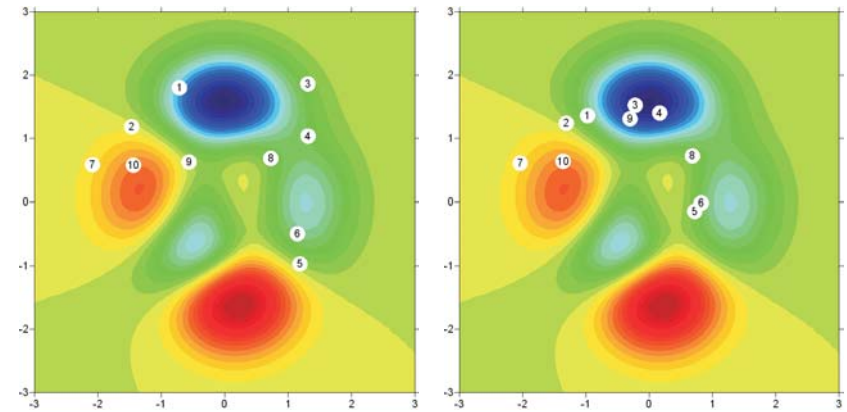
dengan konstanta C_1 , C_2 dan C_3 adalah bilangan kurang dari 1 sehingga perpindahan pada setiap komponen (inersia, memori dan kerja-sama) tidak dilakukan secara penuh. Besaran $\frac{1}{2}$ pada faktor percepatan diserap oleh konstanta C_3 . Sementara itu, bilangan acak R_1 dan R_2 merepresentasikan proses stokastik pada komponen memori dan kerja-sama [13,14].



Gambar 9. Mekanisme algoritma Particle Swarm Optimization (PSO).

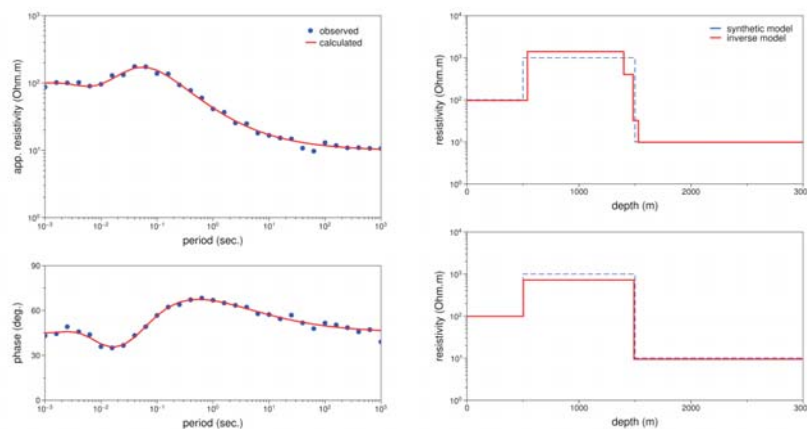
Algoritma PSO digunakan untuk mencari harga minimum suatu fungsi sederhana yang didefinisikan oleh dua parameter (x dan y) dengan 10 individu (Gambar 10). Fungsi tersebut adalah *peaks function* yang sering digunakan untuk menguji pencarian harga maksimum suatu fungsi pada bahasa pemrograman Matlab. Untuk pencarian harga minimum pada contoh ini, modifikasi fungsi tersebut dilakukan dengan penambahan konstanta (+10) sehingga terdapat 2 minimum lokal dan 1 minimum global.

Pada iterasi ke 1 semua individu tersebar pada ruang model 2D secara acak dan masing-masing belum memiliki inersia maupun memori (*personal best*). Posisi terbaik dari semua individu dijadikan dasar untuk berpindah atau bergerak bagi individu lainnya. Dalam hal ini individu 1 memiliki posisi paling dekat dengan nilai minimum sehingga menjadi *global best*. Pada iterasi ke 2 setiap individu akan berusaha menuju posisi individu 1 tersebut, seperti terlihat jelas misalnya pada individu 3, 4 dan 9. Namun demikian, sifat stokastik dan konstanta yang terlibat tidak serta-merta membuat semua individu berada tepat di posisi individu 1. Pada iterasi ke 2 ini setiap individu telah memiliki inersia dan memori yang bersama dengan informasi mengenai posisi *global best* yang baru (individu 3) menentukan pergerakan pada iterasi selanjutnya. Pada iterasi ke 20 semua individu praktis telah berada posisi yang saling berdekatan dan sangat dekat dengan koordinat minimum fungsi obyektif.



Gambar 10. Particle Swarm Optimization (PSO) untuk penentuan minimum fungsi sederhana 2D (*peaks function*) pada iterasi 1 (kiri) dan iterasi 2 (kanan).

Contoh hasil pemodelan magnetotellurik (MT) 1D menggunakan algoritma PSO diperlihatkan pada Gambar 11. Pada inversi data sintetik yang berasosiasi dengan model sintetik 3 lapisan digunakan model *a priori* yang terdiri dari 3 lapisan dan 5 lapisan dengan hasil *misfit* hampir sama. Inversi hanya dimaksudkan untuk memperoleh model optimal. Pada akhir iterasi hampir semua model berada pada posisi yang sangat berdekatan dalam ruang model sehingga ketidakpastian model sangat kecil dan kemungkinan dapat disalah-artikan sebagai tidak ada kesalahan pada model hasil inversi [14]. Hal ini merupakan salah satu kekurangan dari algoritma PSO. Selain itu algoritma PSO tersebut memang tidak diimplementasikan dalam konteks perhitungan fungsi densitas probabilitas model posterior sebagaimana pada algoritma MCMC sebelumnya.



Gambar 11. Inversi data sounding magnetotellurik (MT) 1D menggunakan algoritma PSO, data sintetik dan respons model inversi (kiri), model 1D hasil inversi dengan model a priori 5 lapisan (kanan atas) dan 3 lapisan (kanan bawah) [14].

5. APLIKASI METODE ELEKTRO-MAGNETIK (EM)

Dalam tulisan ini hanya dibahas metode elektromagnetik (EM) yang memanfaatkan medan EM alami sebagai akibat interaksi medan magnet utama bumi dan angin matahari (*solar wind*) dengan karakteristik frekuensi rendah. Medan magnet bumi juga mengalami "gangguan" dari aktivitas kelistrikan atmosfer (petir) dengan karakteristik frekuensi tinggi. Medan magnet bumi yang bervariasi terhadap waktu menginduksi medan listrik di dalam bumi yang selanjutnya juga menimbulkan medan magnet sekunder, demikian seterusnya. Fenomena listrik - magnet tersebut sangat bergantung pada sifat fisika medium bawah-permukaan bumi yaitu resistivitas. Besaran resistivitas kemudian digunakan untuk memperkirakan kondisi atau struktur geologi. Secara umum frekuensi

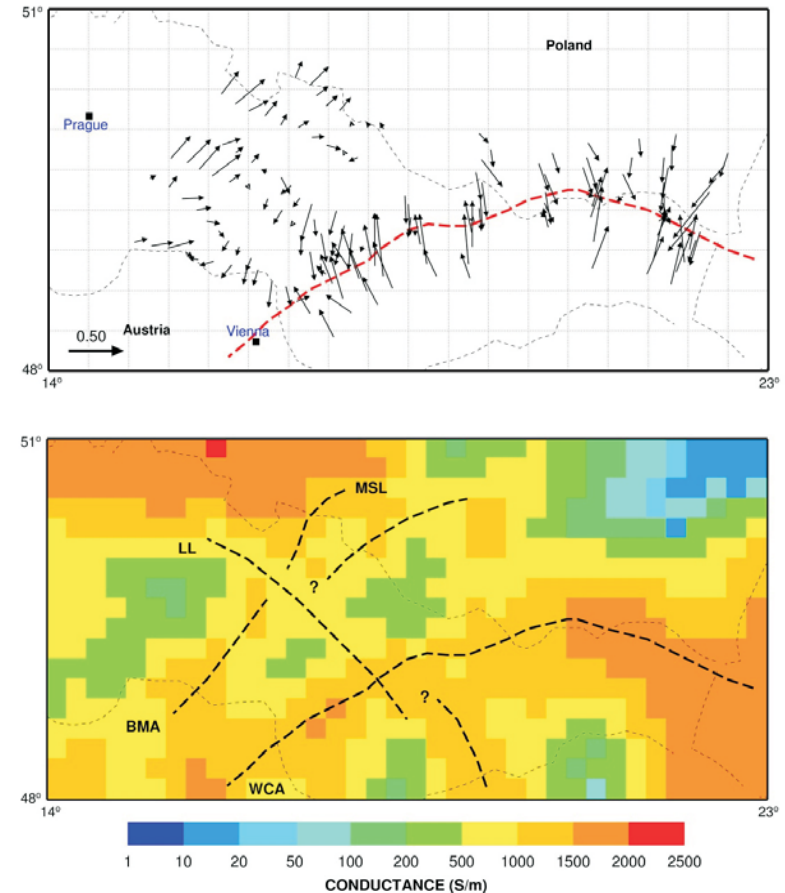
tinggi berasosiasi dengan kedalaman penetrasi (*skin depth*) dangkal sedangkan frekuensi rendah akan menjangkau kedalaman yang besar, dalam orde kilometer sampai beberapa puluh bahkan ratusan kilometer, sehingga aplikasi metode EM sangat bervariasi [15].

5.1 Studi Regional

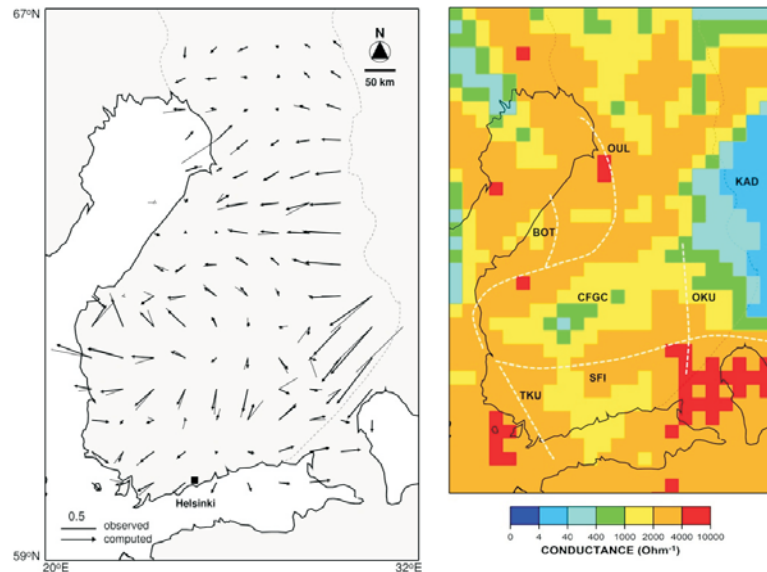
Pada pengukuran data Deep Geomagnetic Sounding (GDS) variasi medan magnet bumi komponen horisontal (H_x , H_y) dan vertikal (H_z) terhadap waktu direkam secara terus menerus (kontinu). Dalam domain frekuensi, fungsi transfer antara medan magnet vertikal terhadap medan magnet horisontal mengandung informasi mengenai distribusi resistivitas bawah-permukaan. Fungsi transfer tersebut dapat diplot sebagai vektor induksi atau *induction arrow* yang cenderung menunjuk ke arah medium yang lebih konduktif (lihat Gambar 12). Mengingat jarak antar titik pengamatan cukup jauh (10-20 km) dan frekuensi yang direkam cukup rendah (periode 20-100 menit) maka informasi yang diperoleh umumnya bersifat regional dengan resolusi spasial yang tidak terlalu tinggi. Pemodelan data GDS biasanya menggunakan model lapisan "tipis" (*thin sheet model*) dimana heterogenitas terkonsentrasi hanya pada suatu lapisan di permukaan atau pada kedalaman tertentu. Untuk itu kedalaman penetrasi medan EM yang digunakan harus jauh lebih besar dari ketebalan lapisan tipis dengan ukuran diskretisasi lateral 3-5 kali ketebalannya. Pada metode EM pemodelan lapisan tipis yang berada pada medium homogen atau 1D merupakan pendekatan dari pemodelan 3D yang cukup efektif untuk studi regional [11].

Pada Gambar 12 ditampilkan hasil pemodelan inversi menggunakan algoritma MCMC data GDS dari daerah Bohemian Massif dan West Carpathian di Eropa timur yang merupakan hasil kerja sama antara Université Paris 7 dan Université Paris 11 (Paris Sud), Perancis dengan Institute of Geophysics, Republik Czech. Pemodelan dimaksudkan untuk memperoleh distribusi lateral konduktivitas pada lapisan tipis yang berada pada kedalaman antara 20-30 km. Medium 1D "rata-rata" dianggap telah diketahui dari hasil penelitian sebelumnya. Dalam hal ini parameter model adalah konduktansi atau hasil perkalian antara konduktivitas dengan ketebalan lapisan dengan satuan Ohm^{-1} atau Siemens/m. Distribusi konduktansi lapisan tipis yang diperoleh berkorelasi dengan sangat baik dengan geologi setempat [16,17].

Pemodelan inversi menggunakan model lapisan tipis digunakan pula untuk analisis data GDS dari Fennoscandian Shield yang juga merupakan hasil kerja sama antara Université Paris 7 dan Université Paris 11 (Paris Sud), Perancis dengan University of Oulu, Finlandia. Secara garis besar, batas-batas anomali konduktivitas menunjukkan kesesuaian yang baik dengan kondisi geologi regional daerah tersebut (Gambar 13). Interpretasi geologi dan tektonik lebih detail terhadap hasil pemodelan tersebut menunjukkan keberhasilan penggunaan data GDS yang juga sering disebut sebagai Magneto-variational Sounding (MVS) untuk studi regional [18,19].



Gambar 12. Data Geomagnetic Deep Sounding (GDS) dalam bentuk vektor induksi (atas) dan peta distribusi konduktansi hasil pemodelan inversi dan interpretasinya (bawah) [16].



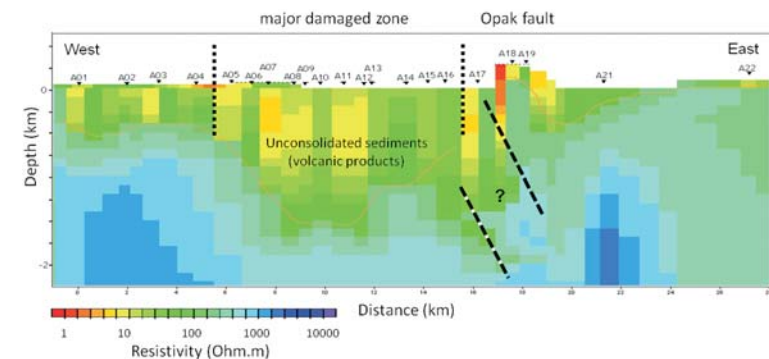
Gambar 13. Data Geomagnetic Deep Sounding (GDS) dalam bentuk vektor induksi (kiri) dan peta distribusi konduktansi hasil pemodelan inversi dan interpretasinya (kanan) [18].

5.2 Studi Patahan Aktif

Metode magnetotellurik (MT) juga memanfaatkan medan EM alami, namun selain pengukuran medan magnet komponen horisontal dan vertikal (H_x , H_y , H_z) metode ini juga melibatkan pengukuran medan listrik horisontal (E_x , E_y). Fungsi transfer antara medan listrik dengan medan magnet pada domain frekuensi mengandung informasi mengenai distribusi resistivitas bawah-permukaan [15]. Distribusi spasial titik pengamatan (sounding) MT umumnya jauh lebih rapat, demikian pula dengan jumlah frekuensi atau periode yang terdapat pada data *sounding* MT. Oleh karena itu cakupan studi menggunakan data MT relatif lebih

detail dari pada data GDS. Metode MT biasanya digunakan untuk eksplorasi daerah prospek geotermal, mineral, hidrokarbon dan studi geologi lainnya.

Gempa Yogyakarta yang terjadi pada tanggal 26 Mei 2006 dengan skala magnitudo $M_w = 6.4$ menimbulkan banyak kerusakan dan korban jiwa. Sebagian besar kerusakan bangunan berkaitan dengan rendahnya kualitas bangunan di daerah sekitar pusat gempa. Meskipun demikian tingkat kerusakan bangunan yang cukup parah terkonsentrasi pada daerah tertentu saja, yaitu di sebelah barat daerah yang diduga sebagai patahan atau sesar Opak. Hasil survey MT mengkonfirmasi dugaan bahwa daerah dengan kerusakan berat tersebut berasosiasi dengan keberadaan sedimen produk vulkanik yang relatif lunak dan tebal yang umumnya sangat rentan terhadap guncangan gempa-bumi (Gambar 14). Keberadaan sedimen tersebut juga diperkuat oleh pemodelan dan interpretasi data gravitasi [20]. Studi patahan aktif menggunakan metode MT juga telah dilakukan pada patahan Cimandiri, Jawa Barat [21].



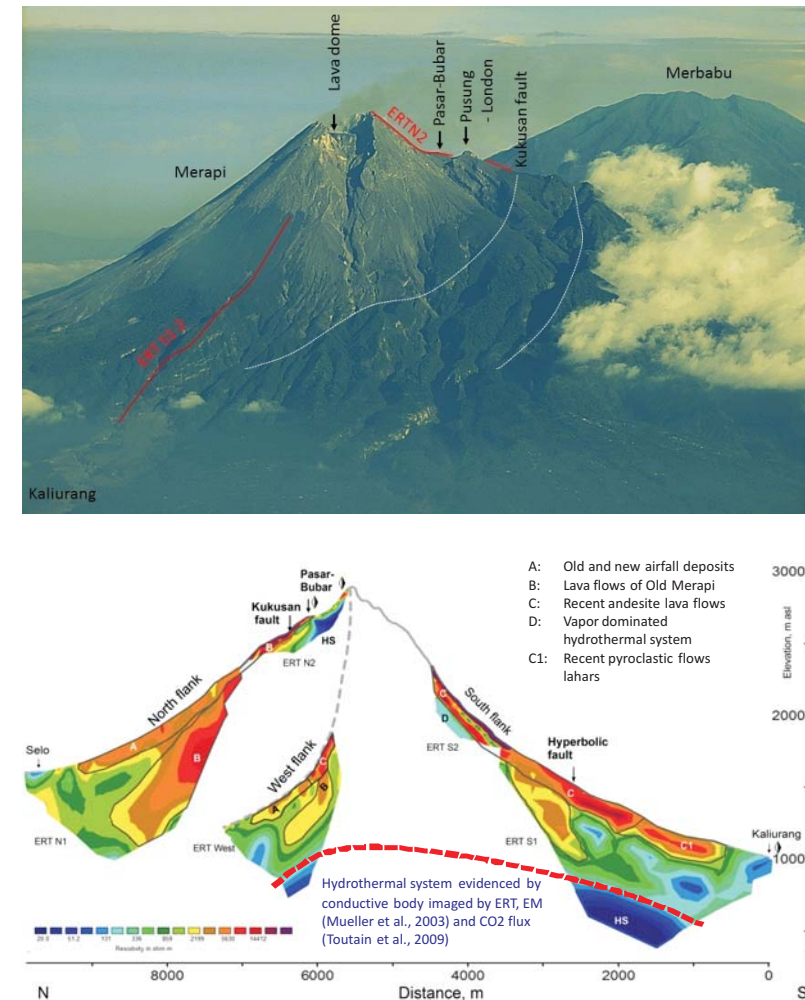
Gambar 14. Hasil pemodelan 2D data magnetotellurik (MT) pada lintasan dalam arah Barat-Timur yang memotong daerah dengan kerusakan berat dan patahan Opak [20].

5.3 Studi Gunung-Api Aktif

Proses naiknya magma ke dekat permukaan menjelang erupsi suatu gunung-api aktif biasanya berlangsung cukup cepat dan dinamikanya dapat dipelajari melalui pemantauan geodetik dan kegempaan mikro. Untuk mempelajari dinamika gunung-api aktif dalam selang waktu yang jauh lebih lama dapat digunakan metode geofisika lain, diantaranya metode Self-Potential (SP), geolistrik dan magnetotellurik (MT). Tujuannya adalah untuk memperkirakan struktur bagian dalam (internal) gunung-api yang dapat berpengaruh pada dampak erupsi di masa yang akan datang. Selama ini penelitian untuk tujuan tersebut lebih terfokus pada struktur internal gunung-api pada kedalaman besar menggunakan metode MT, misalnya untuk memetakan keberadaan kantong magma, kemungkinan adanya *parasitic conduit*, *magma plumbing* dan sebagainya [22,23].

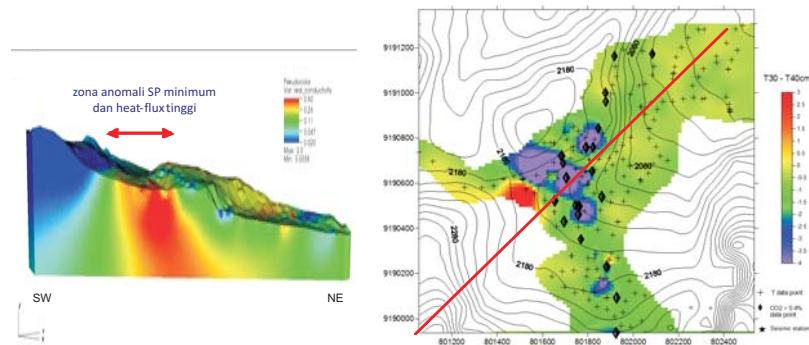
Metode geolistrik dengan teknik ERT (Earth Resistivity Tomography) dengan jangkauan kedalaman yang tidak terlalu besar juga digunakan untuk mempelajari struktur internal bagian atas (kerucut) gunung-api aktif. Studi yang telah dilakukan di lereng G. Merapi (D.I. Yogyakarta) bertujuan untuk memetakan zona aktivitas hidrotermal dangkal. Zona tersebut biasanya merupakan daerah rekahan (*fracture*) dan lemah yang berpotensi sebagai tempat keluarnya gas (*degassing*) maupun tempat terjadinya longsor (*flank collapse*). Hasilnya ditampilkan pada Gambar 15. Penelitian ini merupakan kerja-sama antara ITB, UGM dan Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) dengan Université Savoie Mont Blanc (USMB) dan Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Perancis. Interpretasi terhadap hasil pemodelan

geolistrik 2D didukung oleh hasil penelitian sebelumnya antara lain tentang fluks CO₂ dan pemodelan data MT [24,25].



Gambar 15. Posisi lintasan pengukuran geolistrik tomografi pada lereng G. Merapi (atas) dan hasil pemodelan 2D dan interpretasinya (bawah) [23].

Metode yang sama juga telah diterapkan pada G. Papandayan (Jawa Barat). Anomali konduktivitas tinggi dari hasil pemodelan 2D dan 3D berkorelasi dengan zona anomali rendah SP dan fluks panas yang cukup tinggi (Gambar 16). Saat ini masih terus dilakukan penyempurnaan model resistivitas 3D serta pengukuran di laboratorium terhadap sampel batuan dan tanah dari daerah tersebut. Daerah hidrotermal aktif selain ditandai oleh anomali resistivitas rendah diperkirakan juga merupakan daerah alterasi yang menimbulkan adanya anomali polarisasi terimbas atau IP (Induced Polarization) [26].



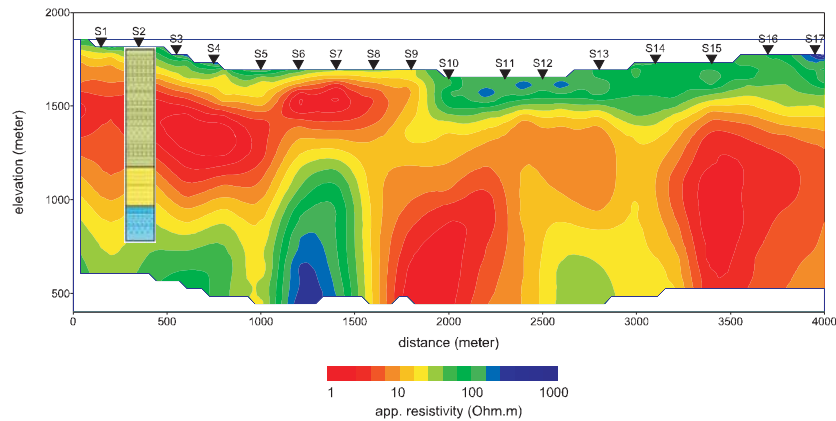
Gambar 16. Hasil awal pemodelan 3D data geolistrik (kiri) dan peta fluks panas yang didasarkan atas selisih temperatur pada dua kedalaman yang berbeda (kanan) di puncak G. Papandayan pada lokasi erupsi tahun 2002 [26].

5.4 Eksplorasi Geotermal

Di Indonesia, daerah prospek geotermal pada umumnya berasosiasi dengan daerah vulkanik. Magma gunung-api yang relatif tua berfungsi sebagai sumber panas (*heat source*) dan memanaskan reservoir di atasnya yang dibentuk oleh batuan berpori yang terisi air. Aktivitas hidrotermal di

reservoir geotermal membuat batuan di atasnya mengalami perubahan atau alterasi sehingga permeabilitasnya rendah dan dapat mencegah pelepasan panas ke permukaan bumi. Alterasi yang terjadi pada batuan penudung (*cap rock*) tersebut ditandai oleh dominasi mineral lempungan (*smectite* dan sejenisnya) yang memiliki resistivitas sangat rendah (sekitar 1-10 Ohm.m sehingga sangat kontras dengan resistivitas batuan produk vulkanik yang lebih resistif (500-1000 Ohm.m atau bahkan lebih). Metode magnetotellurik (MT) dapat memetakan zona anomali resistivitas pada kedalaman yang cukup besar (2-3 km) terutama yang berasosiasi dengan batuan penudung dan reservoir sehingga dapat mendelineasi daerah prospek geotermal.

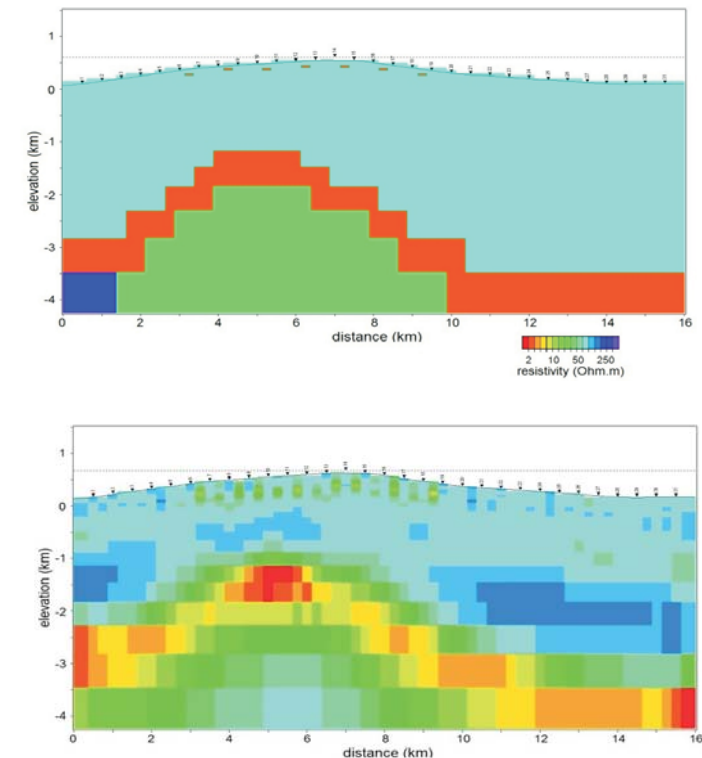
Survey geolistrik pada tahap eksplorasi awal (*reconnaissance*) bertujuan memetakan anomali resistivitas rendah pada kedalaman relatif dangkal. Dengan demikian pada tahap berikutnya survey MT dilakukan hanya pada daerah yang lebih spesifik (daerah prospek). Untuk lebih mengefektifkan metode geolistrik, teknik pengukuran konvensional (*sounding*) dengan jangkauan kedalaman cukup besar dipadukan dengan pemodelan quasi-2D berbasis algoritma MCMC. Model resistivitas quasi-2D diperoleh dengan korelasi model 1D dari beberapa titik *sounding* pada satu profil menggunakan kriteria kehalusan (*smoothness*) model [27]. Model resistivitas yang diperoleh dari lapangan geotermal Wayang-Windu, Bandung selatan, menunjukkan kesesuaian dengan geologi setempat yang didukung oleh data bor (Gambar 17). Selain itu, tingkat produksi uap yang besar dari beberapa sumur yang berdekatan dengan lintasan pengukuran geolistrik berkorelasi dengan *cap rock* yang tebal [28].



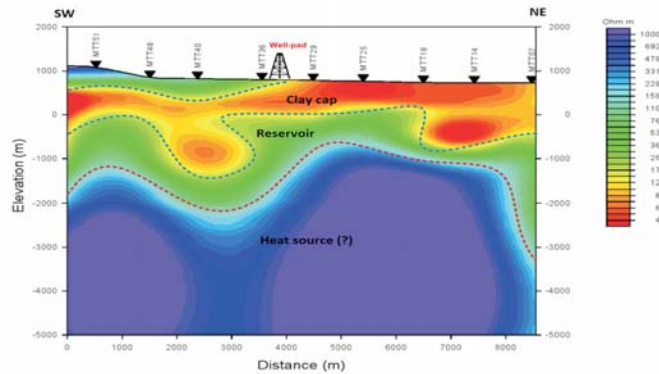
Gambar 17. Model resistivitas quasi-2D dari inversi data geolistrik dan interpretasi struktur (patahan) yang dapat diidentifikasi dari peta geologi dan foto satelit [28].

Data MT di daerah geotermal sering mengalami distorsi yang disebut *static shift* yaitu pergeseran kurva sounding resistivitas-semu pada semua periode, yang terjadi akibat pengaruh heterogenitas lokal dekat permukaan dan topografi. Efek statik tersebut akan sangat berpengaruh pada hasil pemodelan 1D. Oleh karena itu pada setiap titik pengukuran MT di daerah geotermal hampir selalu dilakukan pula pengukuran Transient Electromagnetics (TEM) dengan jangkauan kedalaman rendah namun relatif tidak mengalami distorsi. Simulasi menggunakan model sintetik 2D menunjukkan bahwa pemodelan inversi 2D mampu mendelineasi batuan penutup dan reservoir geotermal secara cukup baik (Gambar 18) [29]. Pemodelan MT 1D menggunakan algoritma MCMC dapat pula didesain untuk meminimumkan efek statik meskipun hal tersebut masih dapat diperdebatkan dari segi teori penyebab efek statik [30].

Hasil pemodelan 2D data MT dari daerah prospek geotermal di Sulawesi Utara ditampilkan pada Gambar 19 yang memperlihatkan kesesuaian hasil pemodelan dengan pemboran yang berhasil. Contoh lain keberhasilan metode MT untuk eksplorasi daerah prospek geotermal akan disampaikan pada saat presentasi mengingat perijinan publikasi data lapangan yang tidak mudah.



Gambar 18. Model resistivitas 2D daerah prospek geotermal yang dikarakterisasi oleh adanya batuan penutup, reservoir dan heterogenitas dekat permukaan penyebab efek statik (atas) dan hasil inversi data sintetik MT (bawah) [29].

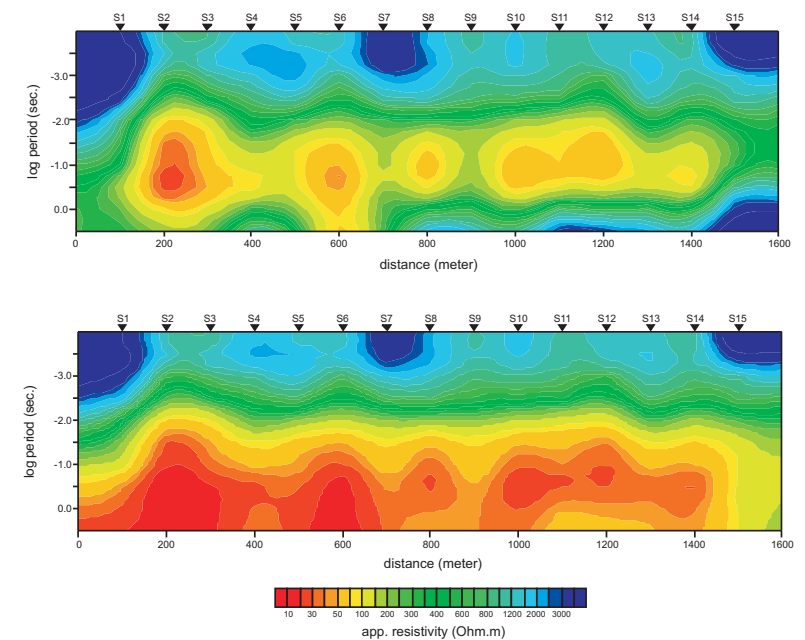


Gambar 19. Model resistivitas 2D berdasarkan data MT dari daerah prospek geotermal di Sulawesi Utara yang berhasil mengidentifikasi cap rock dan reservoir geotermal.

Pada beberapa kasus tertentu, pada tahap awal eksplorasi dilakukan survey CSAMT (Controlled-Source Audio-frequency Magnetotellurics) yang merupakan varian dari metode MT yang menggunakan sumber medan EM buatan (*transmitter*). Penggunaan CSAMT bertujuan untuk meningkatkan kekuatan sinyal medan EM primer, namun frekuensi audio yang relatif tinggi membuat jangkauan kedalaman CSAMT tidak terlalu besar. Pengukuran mode skalar dapat dilakukan sekaligus di beberapa titik *sounding* pada satu lintasan sehingga survey CSAMT relatif cepat. Selain keunggulan tersebut, terdapat pula keterbatasan metode CSAMT [31].

Data CSAMT mengalami distorsi akibat jarak yang berhingga antara *transmitter* dan *receiver* atau titik *sounding* yang disebut sebagai efek medan dekat (*near field*). Pemodelan data CSAMT menggunakan konsep *full solution* pada dasarnya dapat mengakomodasi adanya sumber medan

EM primer pada jarak tertentu dari titik *sounding*. Meskipun demikian, presentasi data CSAMT dalam bentuk *pseudosection* (penampang resistivitas semu) untuk interpretasi kualitatif dapat menimbulkan kesalahan akibat adanya distorsi tersebut. Untuk itu perlu dilakukan "koreksi" yang didasarkan atas penggunaan persamaan yang sesuai untuk masing-masing kondisi data CSAMT, yaitu pada *far field* (seperti MT), *near field* dan transisi di antara keduanya. Gambar 20 menunjukkan perbandingan antara *pseudosection* sebelum dan sesudah koreksi untuk data CSAMT dari suatu lintasan di lapangan geotermal Kamojang, Jawa Barat [32].



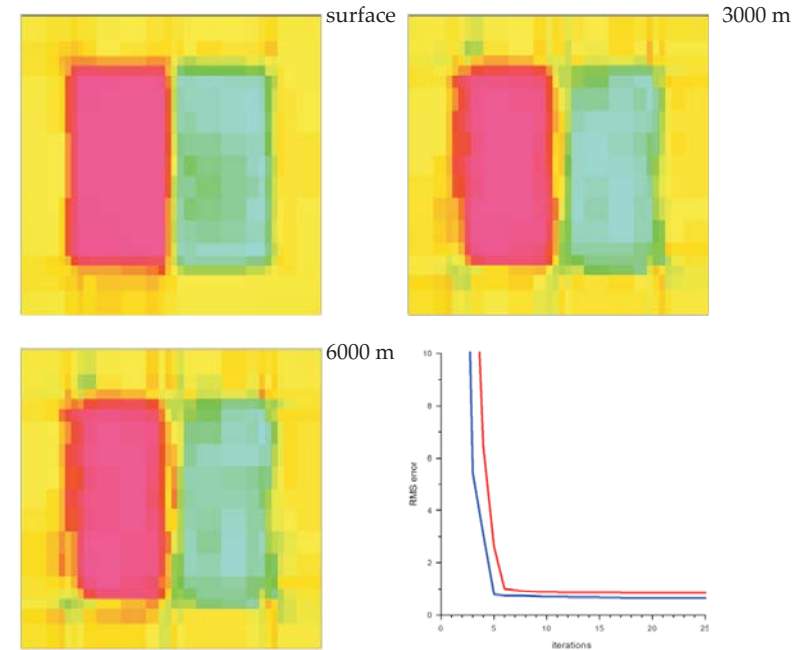
Gambar 20. *Pseudosection* data CSAMT dari lapangan geotermal Kamojang sebelum (atas) dan sesudah (bawah) dilakukan koreksi medan dekat (*near-field*) [32].

6. PERSPEKTIF KE DEPAN

6.1 Pengembangan Pemodelan Geofisika

Pengembangan metode inversi atau optimasi menggunakan konsep probabilistik (misalnya inferensi Bayes) dan resolusinya menggunakan metode stokastik (metode Monte Carlo) masih merupakan kajian yang menarik dan akan terus berkembang di masa yang akan datang. Pada tahun 1990-an saat saya mulai mengembangkan pemodelan inversi menggunakan algoritma MCMC [10,11] belum banyak yang tertarik ke bidang tersebut. Hal tersebut kemungkinan disebabkan oleh kemampuan komputer saat itu yang belum mendukung metode komputasi yang sangat intensif (*computer intensive methods*). Perkembangan terakhir menunjukkan semakin banyaknya penelitian dan publikasi mengenai pengembangan algoritma MCMC dan berbagai variasinya [33].

Pemodelan MT 3D mulai dikembangkan untuk merepresentasikan kondisi bawah-permukaan yang lebih realistis, misalnya pada pemodelan MT di daerah vulkanik pada eksplorasi geotermal dengan kompleksitas topografi dan struktur resistivitas bawah-permukaan. Meskipun masih terkendala ketersediaan sarana komputasi yang memadai, melalui program penelitian bersama saya juga telah merintis pengembangan pemodelan inversi MT 3D menggunakan algoritma MCMC (Gambar 21) [34]. Ketersediaan perangkat pemodelan ke depan MT 3D yang telah teruji dan tersedia secara bebas untuk kepentingan akademik dan penelitian [35], membuka peluang bagi pengembangan metode pemodelan inversi MT 3D secara umum, bukan hanya dengan pendekatan global.

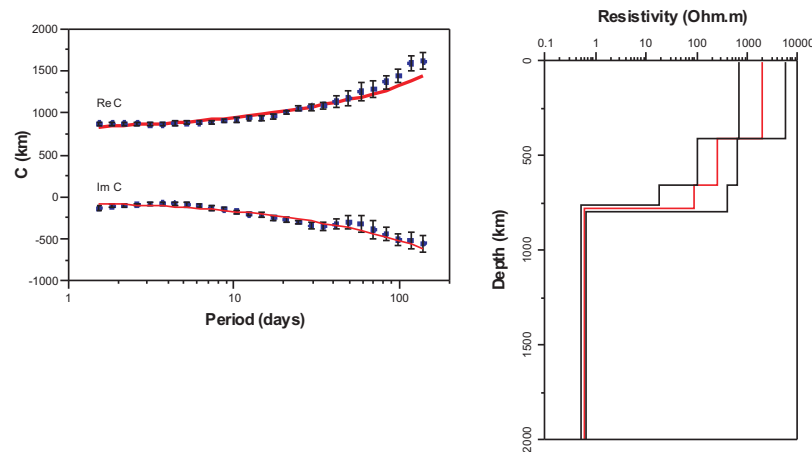


Gambar 21. Hasil pemodelan data sintetik yang berasosiasi dengan model standar untuk pengujian pemodelan ke depan 3D MT (COMMEMI) [34].

6.2 Aplikasi Geo-Elektromagnetik

Ketersediaan komputer cepat saat ini membuat metode Monte Carlo untuk inversi yang sederhana (pemodelan 1D) menjadi menarik untuk ditinjau kembali. Pemodelan resistivitas 1D data medan EM skala global (*planetary scale*) yang diperoleh dari data pengamatan observatorium magnetik dari seluruh dunia yang digabung dengan data satelit magnetik memberikan hasil yang menarik. Diskontinuitas dari model konduktivitas pada kedalaman sekitar 800 km yang tidak ditemukan dari data seismologi merupakan hal yang masih perlu dikaji lebih lanjut (Gambar

22) [36]. Aplikasi metode tersebut untuk data magnetik hasil pengukuran satelit dari planet lain yang menarik minat banyak peneliti di tingkat internasional juga memberikan peluang kolaborasi yang lebih luas lagi [37].



Gambar 22. Data dalam bentuk fungsi transfer magnetik komponen real dan imajiner sebagai fungsi dari periode yang diperoleh dari gabungan data observatorium magnetik dan satelit (kiri) dan hasil pemodelan 1D menggunakan metode Monte Carlo (kanan) [36].

Penelitian fundamental bagi Indonesia dengan keterbatasan dalam hal fasilitas dan infrastruktur penelitian mungkin belum menjadi prioritas utama. Namun, penelitian semacam itu dapat dijadikan sebagai sarana untuk pengembangan metode, terutama metode pemodelan. Disamping itu, banyak penelitian yang dianggap fundamental atau berskala terlalu besar telah menunjukkan keterkaitannya dengan keperluan praktis dan bernilai ekonomis. Salah satunya adalah studi MT 3D pada skala sub-kontinental Australia yang menunjukkan korelasi struktur resistivitas

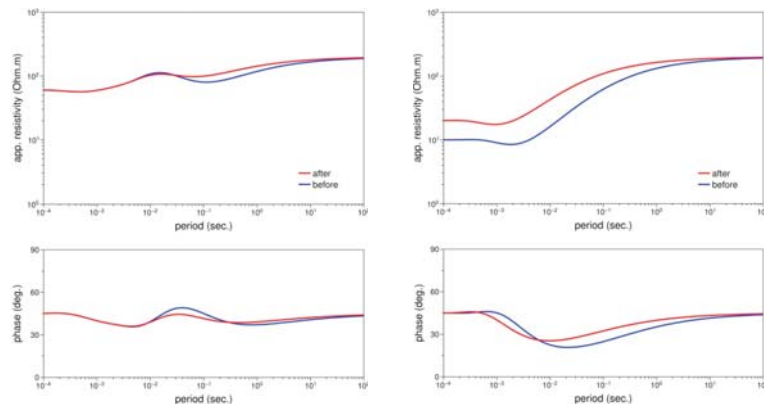
pada kedalaman 30-40 km dengan keberadaan zona-zona mineralisasi yang sangat produktif [38].

Dalam tataran yang lebih "pragmatis", kesenjangan antara potensi sumber-daya yang ada dan kapasitas terpasang pembangkit listrik dari energi geotermal merupakan kesempatan untuk terus meningkatkan kemampuan nasional dalam teknologi eksplorasi dan produksi geotermal [39]. Disamping itu, terjadi peningkatan yang cukup signifikan pada pemanfaatan metode elektromagnetik (dan juga metode geofisika non-seismik lainnya terutama gravitasi) untuk eksplorasi hidrokarbon. Hal tersebut berkat peningkatan ketelitian dan resolusi peralatan pengukuran modern serta pengembangan metode pengukuran, pengolahan data dan pemodelannya [3,40]. Dengan demikian metode geofisika non-seismik dapat saling melengkapi dengan metode seismik refleksi yang merupakan metode utama untuk eksplorasi berbagai tipe hidrokarbon dan berbagai tipe reservoirnya, konvensional maupun non-konvensional.

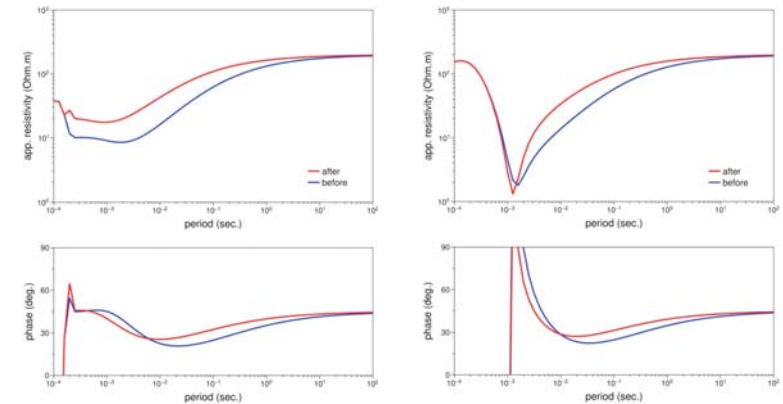
Disamping kecenderungan peningkatan penggunaan metode geofisika non-seismik untuk eksplorasi migas, pemantauan proses EOR (Enhanced Oil Recovery) dan CCS (Carbon Capture and Storage) juga memanfaatkan metode non-seismik khususnya elektromagnetik. Implementasi CCS di Indonesia telah dilakukan inisiasinya melalui kerjasama antara ITB, Kyoto University, Pertamina dalam bentuk JICA-JST "pilot project". Sebagai langkah awal sebelum pelaksanaan simulasi reservoir, studi karakterisasi reservoir diantaranya melalui survey seismik telah dilakukan di lapangan Pertamina Gundih, Jawa Tengah [41]. Pengukuran awal (*baseline survey*) Time Domain Electromagnetics (TDEM) yang direncanakan sebagai perangkat untuk pemantauan proses

CCS juga telah dilaksanakan [42].

Sebagai antisipasi keterbatasan metode TDEM dalam hal resolusi vertikal, simulasi perubahan resistivitas reservoir akibat injeksi CO₂ pada data MT juga telah dilakukan. Respons MT di permukaan bumi akibat perubahan resistivitas reservoir (kedalaman 800 meter) dari 10 Ohm.m menjadi 20 Ohm.m sangat kecil. Respons MT tepat di atas lapisan reservoir tampak lebih jelas (Gambar 23). Dengan asumsi "host" medium diketahui resistivitas dan ketebalannya, respons pada kedalaman tertentu dapat dihitung dari data MT di permukaan menggunakan metode "layer stripping" [43]. Hasil yang ditampilkan pada Gambar 24 menunjukkan kemiripan dengan hasil perhitungan teoritis (Gambar 23 kanan) meskipun terdapat perbedaan akibat ketidakstabilan perhitungan impedansi pada periode rendah. Perubahan data MT masih terlihat meskipun parameter lapisan di atas reservoir tidak diketahui dengan akurat (Gambar 24 kanan).



Gambar 23. Perubahan data MT di permukaan (kiri) dan di atas lapisan reservoir pada kedalaman 800 meter (kanan) akibat perubahan resistivitas reservoir.



Gambar 24. Data MT di atas lapisan reservoir hasil "layer stripping" dengan medium diketahui dengan tepat (kiri) dan dengan medium ekuivalen (kanan).

6.3 Pengembangan Geosains

Kerangka tektonik dan geologi Indonesia yang unik masih akan terus menarik minat penelitian dari komunitas ilmu kebumih- nasional maupun internasional. Hal ini dapat secara berkesinambungan dimanfaatkan semaksimal mungkin untuk pengembangan institusi dan sumber-daya manusia (*capacity building*) tidak hanya dari universitas tetapi juga dari institusi yang bertanggung-jawab pada permasalahan yang berkaitan dengan fenomena alam atau bencana alam kebumih-, khususnya gempa-bumi dan aktivitas gunung-api.

Pada kondisi harga minyak yang tidak terlalu kondusif beberapa tahun terakhir dan yang diperkirakan masih akan berlanjut beberapa tahun ke depan, saat seperti ini merupakan kesempatan untuk meningkatkan kemampuan dan kemandirian nasional dalam berbagai aspek geosains. Pada saat ini sedang dirintis kerja-sama internasional

antara ITB khususnya FTTM-ITB dan Kyoto University Jepang dalam penelitian bersama dengan topik **Integrated Geoscience Studies for Mitigation of Multi-Hazards in Bandung Basin and its Surrounding Region, Indonesia**. Program ini merupakan kelanjutan dari program-program sebelumnya dengan topik yang berbeda, antara lain tentang CCS sebagaimana telah disebutkan di depan dan kerja-sama lain mengenai pengembangan geotermal.

7. PENUTUP

Uraian di atas memberikan gambaran secara umum perjalanan karir akademik saya dalam aspek penelitian, pengajaran dan pengabdian pada masyarakat di ITB selama 3 dekade. Sekecil apapun kontribusi tersebut, semuanya telah saya upayakan semaksimal mungkin sesuai dengan kemampuan saya pribadi dan kondisi yang ada. Saya memegang prinsip pentingnya penguasaan suatu metode (metode geofisika ataupun metode pemodelan geofisika). Penguasaan metode yang kuat akan membuka kesempatan bagi penerapannya untuk berbagai tujuan yang lebih spesifik seperti untuk eksplorasi sumber-daya alam, studi lingkungan maupun mitigasi bencana alam kebumian. Fokus pada penguasaan metode, bukan pada obyek, juga relatif "robust" atau tahan terhadap perubahan yang terjadi, misalnya pada saat harga minyak kurang kondusif seperti beberapa tahun belakangan atau perkembangan pemanfaatan geotermal yang relatif stagnan. Saya masih tetap dapat berkarya pada tataran yang lebih fundamental untuk pengembangan metode pemodelan.

Ke depan, saya berharap tetap dapat secara konsisten menjaga dan melanjutkan komitmen untuk melakukan berbagai usaha yang telah

diuraikan sebelumnya pada bagian perspektif. Semoga kontribusi kecil tersebut nantinya mampu memberikan inspirasi dan harapan bagi generasi penerus untuk tetap optimis dalam bekerja keras dengan segala daya-upaya untuk kepentingan yang lebih besar lagi di masa yang akan datang.

8. UCAPAN TERIMA KASIH

Pertama dan terutama saya memanjatkan puji dan syukur kehadiran Allah SWT, hanya berkat rahmat dan karunia yang telah dilimpahkan-Nya saya dapat sampai pada tahap kehidupan pribadi, keluarga dan karir akademik seperti saat ini. Pada kesempatan ini saya menyampaikan terima kasih dan penghargaan kepada Rektor dan Pimpinan ITB, semua pilar institusi ITB, Dekanat khususnya Dekanat FTTM-ITB atas semua fasilitas dan dukungan yang telah diberikan. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada Pimpinan dan Anggota Forum Guru Besar ITB atas kesempatan yang diberikan kepada saya untuk menyampaikan orasi ilmiah di hadapan para hadirin sekalian pada forum yang terhormat ini.

Pada pengusulan kenaikan jabatan fungsional akademik Guru Besar saya memperoleh kepercayaan dan rekomendasi dari Prof. Pascal Tarits (Univ. Bretagne Occidentale, Brest, Perancis), Prof. Herry Haryono (Puslit Geoteknologi LIPI), Prof. Djoko Santoso (FTTM-ITB), Prof. Nanang Puspito (FTTM-ITB), Prof. Eddy Subroto (FITB-ITB) dan Prof. Umar Fauzi (FMIPA-ITB). Untuk itu semua, saya mengucapkan terima kasih yang tak terhingga.

Para guru, dosen, senior dan pembimbing saat masih di Departemen

Geofisika dan Meteorologi (GM) FMIPA-ITB, di Université Paris 7 dan Université Paris 11 (Paris Sud) Perancis, yaitu Prof. Michel Menvielle, Prof. Michel Roussignol dan Prof. Pascal Tarits juga telah mewarnai kehidupan dan karir akademik saya. Oleh karenanya saya menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya. Tidak lupa terima kasih saya sampaikan pula kepada kolega di KK Geofisika Terapan dan Eksplorasi, Program Studi Teknik Geofisika dan FTTM-ITB umumnya atas terciptanya suasana akademik dan kekeluargaan yang kondusif hingga memberikan peluang dan dukungan kita semua untuk berkarya bagi almamater dan masyarakat luas. Terima kasih juga kepada para mahasiswa khususnya yang telah menjadi alumni setelah belajar bersama saya dalam proses pembimbingan S1, S2, S3 yang konon katanya "sangat berat".

Apresiasi perlu saya sampaikan kepada para kolega dan mitra kerja dari institusi lain seperti Puslit Geoteknologi LIPI, BMKG, institusi di lingkungan Kementrian ESDM, antara lain Direktorat Panasbumi Ditjen EBTKE, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), Pusat Survey Geologi (PSG), Puslitbang Geologi Kelautan (PPGGL), Puslitbang Jalan dan Jembatan Kementrian PUPR, Pertamina Geothermal Energy (PGE), PEP Cepu, Elnusa Geosains, Unit Geomin PT. Aneka Tambang, Medco Integrated Resources (MIR) Medco Energy, Geoservices, Recsalog Geoprima, dan lain lain yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu, yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk berinteraksi, berdiskusi dan mewujudkan ide-ide bersama.

Pada hari yang berbahagia ini, perkenalkanlah saya menghaturkan terima kasih yang setulusnya kepada keluarga besar saya, yaitu ayah H.

Aa Tedjasoeksmana (alm.) dan ibu Endang Soekanti, berkat limpahan kasih sayang dan didikan merekalah saya mampu terus belajar, berkarya dan berjuang hingga akhirnya bisa berdiri disini, juga kepada adik-adik kandung beserta keluarga masing-masing. Terima kasih kepada bapak Soenardi (alm.) dan ibu Doemi Hernijah, atas pengayoman dan bimbingan dalam kehidupan keluarga kami. Dukungan dan pendampingan selama lebih dari 30 tahun dalam suka dan duka dari istri tercinta Retno Damayanti serta kebahagiaan yang dihadirkan oleh anak-anak terkasih Nadia Rahmania dan Raisha Pradisti adalah hal yang tak ternilai bagi kehidupan saya selama ini, terima kasih yang tak terhingga bagi kalian semua.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. (2002), An Introduction to Geophysical Exploration 3rd edition, Blackwell Science.
- [2] Keating, P., Pinet, N. (2011), Use of non-linear filtering for the regional-residual separation of potential field data, Journal of Applied Geophysics, vol. 19, 315-322.
- [3] Grandis, H., Dahrin, D. (2014), Full tensor gradient of simulated gravity data for prospect scale delineation, Journal of Mathematical and Fundamental Sciences, vol. 46, no. 2, 107-124.
- [4] Grandis, H. (2009), Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika, Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI).
- [5] Menke, W. (2012), Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory 3rd edition, Academic Press.

- [6] Sen, M.K., Stoffa, P.L. (2013), *Global Optimization Methods in Geophysical Inversion* 2nd edition, Cambridge University Press.
- [7] Tarantola, A. (2005), *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*, SIAM.
- [8] Tarantola, A., Valette, B. (1982), Inverse problems = quest for information, *Journal of Geophysics*, vol. 50, no. 3, 150-170.
- [9] Grandis, H. (1999), Inversi non-linier menggunakan metoda Monte-Carlo: Kasus magnetotellurik (MT) 1-D, *Kontribusi Fisika Indonesia*, vol. 10, 51-57.
- [10] Grandis, H., Menvielle, M., Roussignol, M. (1999), Bayesian inversion with Markov chains - I. The magnetotelluric one-dimensional case, *Geophysical Journal International*, vol. 138, 757-768.
- [11] Grandis, H., Menvielle, M., Roussignol, M. (2002), Thin-sheet electromagnetic inversion modeling using Monte Carlo Markov Chain (MCMC) algorithm, *Earth Planets Space*, vol. 54, 511-521.
- [12] Yang, X.S. (2014), *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, Elsevier.
- [13] Shaw, R., Srivastava, S. (2007), Particle swarm optimization: A new tool to invert geophysical data, *Geophysics*, vol. 72, no. 2, F75-F83.
- [14] Grandis, H., Maulana, Y. (2017), Particle Swarm Optimization (PSO) for magnetotelluric (MT) 1D inversion modeling, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 62(1), 012033.
- [15] Chave, A., Jones, A. (2012), *The Magnetotelluric Method: Theory and Practice*, Cambridge.
- [16] Grandis, H., Menvielle, M., Roussignol, M. (2013), Thin-sheet

- inversion modeling of geomagnetic deep sounding data using MCMC algorithm, *International Journal of Geophysics*, 2013/531473.
- [17] Ádám A., Koppán, A. (2004), Long period electromagnetic induction vectors in a sedimentary back-arc basin (Carpatho-Pannonian Basin), *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, vol. 34, no. 4, 363-379.
- [18] Grandis, H., Menvielle, M. (2015), Thin-sheet electromagnetic modeling of magnetovariational data for a regional-scale study, *Earth Planets Space*, vol. 67: 121.
- [19] Korja, T., Engels, M., Zhamaletdinov, A.A., Kovtun, A.A., Palshin, N.A., Smirnov, M.Y., Tokarev, A.D., Asming, V.E., Vanyan, L.L., Vardaniants, I.L., BEAR Working Group (2002), Crustal conductivity in Fennoscandia – A compilation of a database on crustal conductance in the Fennoscandian Shield, *Earth Planets Space*, vol. 54, 535-558.
- [20] Grandis, H., Widarto, D.S., Nurhasan, Mogi, T., Ogawa, Y. (2006), Importance of geophysical investigations of active faults and crustal structures in earthquake hazard mitigation, *Proceedings International Workshop on Integration of Geophysical Parameter as a Set of Large Earthquake Precursors*, Bandung, Indonesia, 21 November 2006.
- [21] Grandis, H., Sumintadireja, P., Gaffar, E.Z. (2010), Pencitraan resistivitas bawah-permukaan daerah sesar Cimandiri berdasarkan data magnetotellurik (MT): Hasil pendahuluan, *Jurnal Geofisika*, vol. 2010/1, 34-37.
- [22] Grandis, H., Widarto, D.S., Sumintadireja, P., Yudistira, T., Gaffar, E.Z., Suantika, G. (2005), Pencitraan struktur internal gunung-api aktif menggunakan metode magnetotellurik (MT) dan implikasinya pada

mitigasi erupsi: Studi kasus Gunung Guntur, Laporan Akhir RUT X, Kementrian Riset dan Teknologi RI.

- [23] Spichak, V.V. (2011), Numerical simulation and inversion of MT fields in the 3D electric conductivity model of the Vesuvius volcan, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, vol. 47, 72-76.
- [24] Byrdina, S., Friedel, S., Santoso, A.B., Suryanto, W., Suhari, A. Vandemeulebrouck, J., Rizal, M.H., Grandis, H. (2017), Asymmetrical hydrothermal system below Merapi volcano imaged by geophysical data, *EGU General Assembly, Vienna, Austria*, 23-28 April 2017.
- [25] Müller, A., Haak, V. (2004), 3-D modeling of the deep electrical conductivity of Merapi volcano (Central Java): integrating magnetotellurics, induction vectors and the effects of steep topography, *Journal of Volcanology Geothermal Research*, vol. 138, 205-222.
- [26] Byrdina, S., Révil, A., Gunawan, H., Saing, U.B., Grandis, H. (2017), Hydrothermal system of Papandayan volcano from temperature, Self-Potential (SP) and geochemical measurements, *AIP Conf. Proc.* 1861(1), 030033.
- [27] Irawan, D., Grandis, H., Sumintadireja, P. (2015), Quasi-2D resistivity model from inversion of Vertical Electrical Sounding (VES) data using guided random search algorithm, *Journal of Mathematics and Fundamental Sciences* vol. 47 no. 3, 269-280.
- [28] Grandis, H., Irawan, D., Grandis, Sumintadireja, P. (2014), Quasi-2D resistivity model from inversion of Vertical Electrical Sounding (VES) data for preliminary geothermal prospecting, *Proceedings Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition, Jakarta*, 4-6 June 2014.

- [29] Grandis, H. (2010), Studi efek statik pada data magnetotellurik (MT) menggunakan pemodelan inversi 2D, *Prosiding Seminar Nasional Energi Universitas Padjadjaran, Bandung*, 3 November 2010.
- [30] Grandis, H., Alfadli, M.K. (2011), Correction of static shift in magnetotelluric (MT) data without Transient EM (TEM) data, *Proceedings 11th Annual Indonesian Geothermal Association Meeting & Conference, Bandar Lampung*, 13-14 December 2011.
- [31] Grandis, H. (2000), Koreksi efek sumber pada data "Controlled-Source Audio-Magnetotellurics" (CSAMT), *Jurnal Teknologi Mineral*, VII/1, 43-50.
- [32] Grandis, H., Sumintadireja, P. (2017), Improved pseudosection representation for CSAMT data in geothermal exploration, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 62(1), 012035.
- [33] Sambridge, M., Bodin, T., Gallagher, K., Tkalcic, H. (2013), Trans-dimensional inference in the geosciences, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vo. 371, 20110547.
- [34] Grandis, H., Mogi, T. (2014), MCMC Algorithm for inversion of magnetotelluric data in 3D: A synthetic case, *Proceedings 22nd EM Induction Workshop, Weimar, Germany*, 24-30 August 2014.
- [35] Fomenko E, Mogi T. (2002), A new computation method for a staggered grid of 3D EM field conservative modeling, *Earth Planets Space*, vol. 54, 499-509.
- [36] Tarits, P., Grandis, H. (2016), Deep mantle conductivity inference from Bayesian inversion, *Proceedings 23rd EM Induction Workshop, Chiang Mai, Thailand*, 14-20 August 2016.

- [37] Chivet, F., Tarits, P. (2014), Electrical conductivity of the mantle of Mars from MGS magnetic observations, *Earth Planets Space*, vol. 66: 85.
- [38] Wang, L., Hitchman, A.P., Ogawa, Y., Siripunvaraporn, W., Ichiki, M., Fuji-ta, K. (2014), A 3-D conductivity model of the Australian continent using observatory and magnetometer array data, *Geophysical Journal International*, vol. 198, 1143-1158.
- [39] Poernomo, A., Satar, S., Effendi, P., Kusuma, A., Azimudin, T., Sudarwo, S. (2015), An overview of Indonesia geothermal development - Current status and its challenges, *Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015*.
- [40] Hoversten, G.M., Myer D., Key, K., Alumbaugh, D., Hermann, O., Hobbet, R. (2015), Field test of sub-basalt hydrocarbon exploration with marine controlled source electromagnetic and magnetotelluric data, *Geophysical Prospecting*, vol. 65, 1284-1310.
- [41] Tsuji, T. and Gundih CCS project team (2014), Reservoir characterization for site selection in the Gundih CCS, project, Indonesia, *Energy Procedia*, 63(2014), 6335-6343.
- [42] Srigutomo, W. and Gundih CCS project team (2015), Time-domain electromagnetic (TDEM) baseline survey for CCS in Gundih area, Central Java, Indonesia, *Proceedings 12th SEGJ International Symposium*, November 2015.
- [43] Ogaya, X., J. Ledo, P. Queralt, A.G. Jones, A. Marcuello (2016), A layer stripping approach for monitoring resistivity variations using surface magnetotelluric responses, *Journal of Applied Geophysics*, 132, 100-115.

CURRICULUM VITAE



Nama : **HENDRA GRANDIS**
 Tmpt. & tgl. lhr. : Madiun, 5 September 1962
 Kel. Keahlian : Geofisika Terapan dan Eksplorasi
 Alamat Kantor : Jalan Ganesha 10 Bandung
 Nama Istri : Retno Damayanti
 Nama Anak : 1. Nadia Rahmaniana Grandis
 2. Raisha Pradisti Grandis

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Doktor (Dr.), Géophysique Interne, Université Paris 7, Paris, France, 1994.
- Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA), Géophysique Interne, Université Paris 7, Paris, France, 1990.
- Sarjana Geofisika dan Meteorologi, FMIPA Institut Teknologi Bandung, 1986.

II. RIWAYAT KERJA di ITB:

- Staf Pengajar Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Fakultas Teknologi Mineral (FTM), Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral (FIKTM), Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan (FTTM) ITB, 1987 - sekarang.
- Anggota Komisi Program Pasca-Sarjana (KPPS) FTTM-ITB, 2015 - sekarang.
- Ketua Program Studi Magister dan Doktor Teknik Geofisika

FTTM-ITB, 2008 - 2012.

- Ketua Program Studi Sarjana Geofisika FIKTM-ITB, 2005 - 2008.
- Sekretaris Departemen Geofisika dan Meteorologi FMIPA-ITB, 1998 - 2002.

III. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli Madya, 1 Agustus 1988.
- Asisten Ahli, 1 Mei 1995.
- Lektor Muda, 1 Oktober 1997.
- Lektor Madya, 1 Januari 2001.
- Lektor, 1 Januari 2001.
- Lektor Kepala, 1 Juni 2004.
- Profesor/Guru Besar, 1 Mei 2017.

IV. KEGIATAN PENELITIAN

- Conductivity structure of Australia continental and sub-continental scale from magnetotelluric (MT) and Geomagnetic Deep Sounding (GDS) data, with Graham Heinson (Univ. of Adelaide).
- 3D resistivity imaging of active volcanoes, with Svetlana Byrdina, André Révil, Jean-Philippe Metaxian (Univ. Savoie Mont Blanc, Chambéry, France).
- Deep mantle conductivity inference from Bayesian inference, with Pascal Tarits, Sophie Hautot (Univ. Bretagne Occidentale, Brest, France).
- Regional conductivity study from Geomagnetic Deep Sounding

(GDS) data, with Michel Menvielle (Centre d'Etude de l'Environnement Terrestre et Planétaires, Saint Maur des Fosses, France).

- 3D magnetotelluric inversion using MCMC algorithm, with Toru Mogi (Hokkaido Univ., Sapporo, Japan).
- Magnetotelluric study of Cimandiri active fault zone for earthquake hazard mitigation, with Katsumi Hattori (Chiba Univ., Chiba, Japan).
- Magnetotelluric study of Yogyakarta 2006 earthquake damaged area, with Yashuo Ogawa (Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan).

V. TECHNICAL REPORT

- Integrated gravity, magnetic and seismic data interpretation for North Kakap (Natuna) PSC Block.
- Magnetotellurics (MT), Transient EM (TEM) and gravity study for Gede-Pangrango geothermal prospect, West Java.
- Magnetotellurics (MT) and geo-electrical study at earth electrode proposed sites for Java-Sumatra Interconnection of High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Line.
- Preliminary study using 3D gravity modelling for coal bed methane (CBM) prospect at Kapuas III PSC Block.
- Software development for magnetotellurics (MT) impedance tensor decomposition.
- Airborne gravity and magnetic data reprocessing and interpretation of bird's head Papua.

VI. PUBLIKASI

- **Grandis, H.**, Maulana, Y. (2017), Particle Swarm Optimization (PSO) for magnetotelluric (MT) 1D inversion modeling, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 62(1), 012033, doi: 10.1088/1755-1315/62/1/012033.
- **Grandis, H.**, Sumintadireja, P. (2017), Improved pseudosection representation for CSAMT data in geothermal exploration, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 62(1), 012035, doi: 10.1088/1755-1315/62/1/012035.
- **Grandis, H.**, Dahrin, D. (2017), The Utility of free software for gravity and magnetic advanced data processing, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 62(1), 012046, doi: 10.1088/1755-1315/62/1/012046.
- Byrdina, S., Révil, A., Gunawan, H., Saing, U.B., **Grandis, H.** (2017), Hydrothermal system of Papandayan volcano from temperature, Self-Potential (SP) and geochemical measurements, AIP Conf. Proc. 1861(1), 030033, doi: 10.1063/1.4990920.
- Handyarso, A., **Grandis, H.** (2017), Magnetotelluric (MT) data smoothing based on B-Spline algorithm and qualitative spectral analysis, AIP Conf. Proc. 1861(1), 030051, doi: 10.1063/1.4990938.
- Febriani, F., Widarto, D.S., Gaffar, E., Nasution, A., **Grandis, H.** (2017), Subsurface structure imaging of the Sembalun-Propok area, West Nusa Tenggara, Indonesia by using the audio-frequency magnetotelluric data, AIP Conf. Proc. 1861(1), 030055, doi: 10.1063/1.4998733.
- Febriani, F., Widarto, D.S., Gaffar, E., Nasution, A., **Grandis, H.**

(2017), The magnetotelluric phase tensor analysis of the Sembalun-Propok area, West Nusa Tenggara, Indonesia, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 817(1), 012072, doi: 10.1088/1742-6596/817/1/012072.

- Irawan, D., **Grandis, H.**, Sumintadireja, P. (2015), Quasi-2D resistivity model from inversion of Vertical Electrical Sounding (VES) data using guided random search algorithm, Journal of Mathematics and Fundamental Sciences vol. 47 no. 3, 269-280, doi: 10.5614/j.math.fund.sci.2015.47.3.5.
- **Grandis, H.**, Menvielle, M. (2015), Thin-sheet electromagnetic modeling of magnetovariational data for a regional-scale study, Earth Planets Space, vol. 67:121, doi: 10.1186/s40623-015-0290-3.
- Warsa, W., **Grandis, H.**, Parnadi, W.W. (2015), Three-dimensional magnetic resonance sounding tomography, Proceedings 12th SEGJ International Symposium, doi: 10.1190/segj122015-055.
- Warsa, W., **Grandis, H.**, Parnadi, W.W., Santoso, D. (2014), Three-dimensional inversion of Magnetic Resonance Sounding (MRS) for groundwater detection, International Journal of Technology vol. 3 no. 3, 219-226, doi: 10.14716/ijtech.v5i3.614.
- Warsa, W., **Grandis, H.**, Parnadi, W.W., Santoso, D. (2014), Multi-dimensional inversion modeling of Surface Nuclear Magnetic Resonance (SNMR) data for groundwater exploration, Journal of Engineering and Technological Sciences vol. 46B no. 2, 123-140, doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2014.46.2.1.
- **Grandis, H.**, Dahrin, D. (2014), Full tensor gradient of simulated gravity data for prospect scale delineation, Journal of Mathematics and Fundamental Sciences, vol. 46, no. 2, 107-124,

doi: 10.5614/j.math.fund.sci.2014.46.2.1.

- **Grandis, H.,** Dahrin, D. (2014), Constrained two-dimensional inversion of gravity data, Journal of Mathematics and Fundamental Sciences, vol. 46, no. 1, 1-13, doi: 10.5614/j.math.fund.sci.2014.46.1.1.
- **Grandis, H.** (2014), Simulation of 3D gravity anomaly of thin coal layer in a sedimentary environment and its delineation, International Journal of Tomography and Simulation, vol. 26, no.2, 1-11.
- **Grandis, H.,** Menvielle, M., Roussignol, M. (2013), Thin-sheet inversion modeling of geomagnetic deep sounding data using MCMC algorithm, International Journal of Geophysics, doi: 10.1155/2013/531473.
- Warsa, W., **Grandis, H.,** Parnadi, W.W., Santoso, D. (2013), Study of 3-D SNMR inversion modeling, Proceedings 11th SEGJ International Symposium, doi: 10.1190/segj112013-065.
- Warsa, W., **Grandis, H.,** Parnadi, W.W., Santoso, D. (2013), 3-D SNMR inversion of water content, Proc. 19th EAGE Near Surface Geoscience, doi: 10.3997/2214-4609.20131365.
- **Grandis, H.,** Menvielle, M., Roussignol, M. (2002), Thin-sheet electromagnetic inversion modeling using Monte Carlo Markov Chain (MCMC) algorithm, Earth Planets Space, vol. 54, 511-521, doi: 10.1186/BF03353042.
- **Grandis, H.,** Menvielle, M., Roussignol, M. (1999), Bayesian inversion with Markov chains - I. The magnetotelluric one-dimensional case, Geophysical Journal International, vol. 138, 757-

768, doi: 10.1046/j.1365-246x.1999.00904.x.

- **Grandis, H.** (1999), An alternative algorithm for one-dimensional magneto-telluric response calculation, Computer & Geosciences, vol. 25, 119-125, doi: 10.1016/S0098-3004(98)00110-1.

VII. PENGHARGAAN

- Lencana Pengabdian ITB 25 tahun.
- Lencana Karya Satya Republik Indonesia 10 tahun dan 20 tahun.
- Recognized and Leading Innovation Award 2015, Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI).

VIII. KEANGGOTAAN ORGANISASI PROFESI

- Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI).
- European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE).
- Society of Exploration Geophysicists (SEG)