

KONFIGURASI CEKUNGAN SEDIMEN BERDASARKAN SURVEI MAGNETOTELLURIK, STUDI KASUS DI TELUK KAU, HALMAHERA, INDONESIA

Bambang Sugiarto^{1,2}

¹Pusat Survei Geologi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral

²Program Magister Teknik Geologi, Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran
bambang.sugiarto@esdm.go.id

ABSTRAK

Pada tahun 2013 dilakukan survei magnetotellurik untuk mendukung kegiatan eksplorasi migas daerah *frontier* di Kawasan Timur Indonesia. Akuisisi data magnetotellurik menggunakan *Phoenix Geophysics* MTU-5A dengan koil MTC-50 pertama kali dilakukan dalam riwayat eksplorasi daerah Teluk Kau, Halmahera, Indonesia. Penelitian ini menggunakan 65 MT-Station dengan interval 1.0 hingga 2.0 kilometer. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui konfigurasi batuan dasar cekungan sedimen di daerah ini. Hasil pengolahan data magnetotellurik menunjukkan delineasi dan sebaran lapisan sedimen yang tebal, berkisar antara 2100 hingga 3000 meter pada bagian barat, serta lapisan sedimen yang sangat tebal, berkisar antara 3000 hingga 4000 meter pada bagian timur lintasan pemodelan bawah permukaan (Line B). Hasil pemodelan ini diverifikasi menggunakan data gaya berat dan data seismik yang tersedia. Batuan sedimen yang tebal ini kemungkinan berumur Mesozoik (pra-tersier). Sedimen berumur Mesozoik ini bisa menjadi potensi keberadaan cekungan migas.

Kata kunci : Eksplorasi Migas, Konfigurasi Batuan Dasar, Magnetotellurik, Mesozoik, Teluk Kau

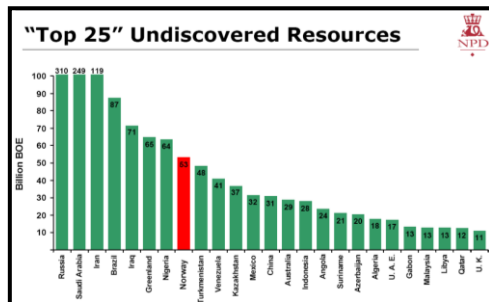
ABSTRACT

In 2013 a magnetotelluric survey was carried out in the frontier regions of Eastern Indonesia to support oil and gas exploration activities. The acquisition of Magnetotelluric data using Phoenix Geophysics MTU-5A with MTC-50 coil was the first time in Kao Bay exploration history. This study uses 65 MT-station with interval 1.0 to 2.0 kilometers. The aims of this study to determine the basement configuration of sedimentary basin in this area. The result of magnetotelluric data processing showed delineation and distribution of thick sedimentary layers, ranging from 2100 to 2000 meters in the western part, and very thick sedimentary layer ranging from 3000 to 4000 meter in the eastern part of the subsurface model (Line B). The result of this modelling are verified using available gravity and seismic data. These thick sedimentary layers are probably Mesozoic (pre-tertiary) age. This Mesozoic sediment can be a potential for existence of oil and gas basin.

Keywords: Basement Configuration, Kao Bay, Magnetotelluric, Mesozoic, Oil and Gas Exploration

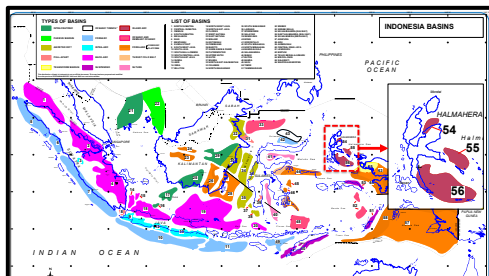
PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara berkembang yang termasuk dalam kategori *Top 25 Undiscovered Resources* (Gambar 1). Masih banyak peluang untuk meningkatkan jumlah cadangan minyak dan gas bumi, terutama di lapangan “*frontier*” di Indonesia bagian timur.



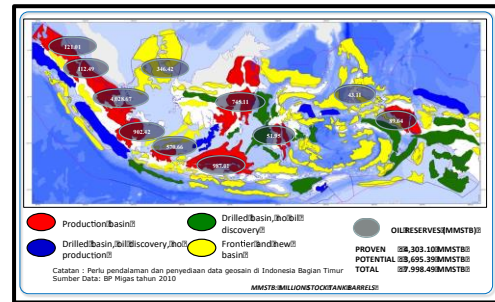
Gambar 1. *Top 25 Undiscovered Resources* (NPDI, 2010)

Pertamina pada tahun 1982 membuat klasifikasi tipe cekungan di Indonesia. Setelah dimodifikasi oleh Beicip (1985) terdapat 66 cekungan yang diklasifikasikan dalam 15 tipe cekungan. Cekungan Teluk Kau bersamaan dengan Cekungan Teluk Buli dan Cekungan Teluk Weda termasuk dalam kategori “*Island Arc Basin*” (Gambar 2).

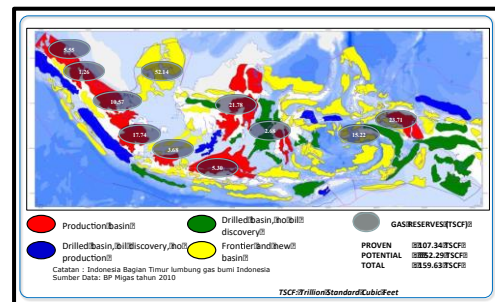


Gambar 2. Klasifikasi tipe cekungan (Pertamina, 1982; Beicip, 1985)

Status Cekungan minyak bumi dan gas bumi pernah dirilis oleh BPBaru pada tahun 2009, Badan Geologi menerbitkan peta sebaran cekungan yang keseluruhannya berjumlah 128 cekungan berdasarkan data anomali gaya berat (*Bouguer*). Dari 128 cekungan yang teridentifikasi baru 16 cekungan yang proven dan berproduksi. Gambar berikut memperlihatkan tumpang tindih (*overlay*) peta cekungan berdasarkan anomali gaya berat (*Bouguer*) dengan status cadangan minyak bumi dan gas bumi.



Gambar 3. Status cekungan minyak bumi, Januari 2009 (BP Migas 2010)



Gambar 4. Status cekungan gas bumi, Januari 2009 (BP Migas 2010)

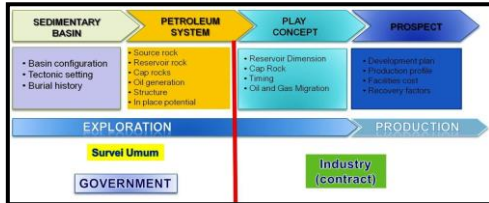
Neraca potensi energi, data Badan Geologi 2011 pada Tabel 1 memperlihatkan jika tidak ada penemuan baru, cadangan minyak bumi kita hanya cukup untuk jangka waktu (*life time*) 18 tahun. Untuk itu pemerintah perlu menggiatkan kegiatan eksplorasi terutama di wilayah Indonesia bagian Timur.

Tabel 1. Neraca Petensi Energi (Badan Geologi, 2011)

Jenis Energi	Sumber daya	Cadangan	Produksi	Life time
Minyak bumi	151 milyar barrel	9 milyar barrel	500 juta barrel	18 tahun
Gas Bumi	487 TSCF	188 TSCF	3 TSCF	62 tahun
CBM	453 TSCF	NA	NA	NA
Batubara	120 milyar ton	28 milyar ton	317 juta ton	93 tahun
Tambang terbuka	41 milyar ton	NA	NA	NA
Batubara tambang bawah tanah	574 TSCF	NA	NA	NA
Shale gas	11 milyar ton	NA	NA	NA
Shale oil	13.195 MWe	16.020 MWe	1.226 MW	sustainable

Negara harus mengetahui kekayaan alamnya termasuk potensi sumber daya geologi, tidak seperti selama ini, dimana informasi cekungan migas hanya diperoleh dari laporan pihak swasta / industri. Peran pemerintah meliputi karakterisasi suatu *sedimentary basin*, termasuk didalamnya *basin configuration*, *tectonic setting* dan *burial history*; serta karakterisasi suatu *petroleum system* yang meliputi

pengetahuan tentang *source rock*, *reservoir rock*, *cap rock*, *oil generation*, *structure* dan *in place potential*. Berikut ditunjukkan dalam Gambar 5 peran pemerintah dalam eksplorasi migas.



Gambar 5. Peran Pemerintah dalam Eksplorasi Migas.

Perlu inisiatif dari pemerintah untuk melakukan investasi dalam eksplorasi migas (survei umum di daerah hulu). Hal ini bertujuan untuk mengurangi resiko bisnis industri migas dan meningkatkan posisi *bargaining* pemerintah. Informasi geologi hasil survei umum pemerintah merupakan insentif non-fiskal dan bentuk *risk sharing* bagi *resource industry*. Menurut UU No. 22 Tahun 2001 Tentang Minyak dan Gas Bumi: (1) Survei umum meliputi survei geologi, geofisika, dan geokimia untuk memperkirakan letak dan potensi sumber daya migas; (2) Pengolahan data survei umum meliputi perolehan, pengadministrasian, pengolahan, penataan, penyimpanan, pemeliharaan, dan pemusnahan.

Pada kegiatan eksplorasi di daerah *frontier* (*basin reconnaissance*) dibutuhkan metode yang efektif dan efisien untuk mendelineasi prospek sebelum dilakukan survei seismik. Dibandingkan metode seismik metode *Magnetotelluric* (MT) jauh lebih efisien dari segi biaya (1/10 – 1/2). Seperti ditunjukkan Gambar 6 dibawah ini, masalah aksesibilitas, topografi yang terjal, cuaca yang ekstrim, dapat diatasi oleh metode MT.



Gambar 6. Keunggulan Metode MT.

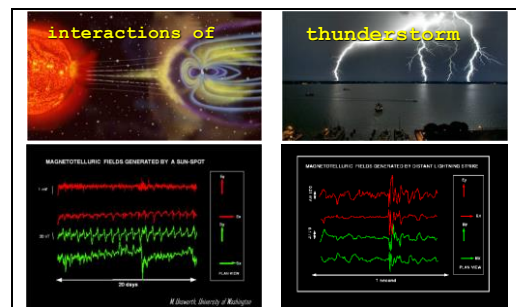
METODE

Metode Magnetotellurik pertama kali diperkenalkan oleh Lois Cagniard pada tahun 1953. Penemuan ini dilatarbelakangi oleh hubungan timbal balik antara medan listrik dan medan elektromagnetik. Metode magnetotellurik (MT) adalah metode sounding elektromagnetik (EM) untuk mengetahui struktur tahanan jenis bawah permukaan dengan cara melakukan pengukuran pasif komponen medan listrik (E) dan medan magnet (H) alam yang berubah terhadap waktu menggunakan frekuensi gelombang EM dengan lebar 10^{-4}Hz – 10^4Hz .

Keuntungan utama dari metode ini adalah kemampuannya yang unik untuk eksplorasi sampai kedalaman sangat besar (ratusan kilometer), serta dalam penyelidikan dangkal, semua tanpa menggunakan sumber daya buatan (dengan pengecualian versi '*controlled-source*' dari metode ini). Sedangkan kerugian utama dengan metode sumber alami MT adalah kekuatan sinyalnya yang tidak menentu.

Sinyal MT disebabkan oleh dua hal:

1. Pada frekuensi yang lebih rendah (umumnya $< 1\text{Hz}$ atau satu siklus/s), sumber sinyal interaksi antara angin matahari dengan medan magnet bumi. Seperti badai matahari memancarkan aliran ion, energi ini mengganggu medan magnet bumi dan menyebabkan frekuensi rendah energi untuk menembus permukaan bumi.
2. Sinyal frekuensi yang lebih tinggi ($> 1\text{Hz}$) dibuat oleh seluruh dunia: badai, biasanya dekat khatulistiwa, aktivitas petir / halilintar (*thunderstorm*). Energi yang diciptakan oleh badai listrik perjalanan mengelilingi bumi (dalam panduan gelombang antara permukaan bumi dan ionosfer) dengan sejumlah energi yang menembus ke dalam bumi.



Gambar 7. Sumber gelombang MT.

Persamaan Maxwell merupakan sintesa hasil-hasil eksperimen (empiris) mengenai fenomena listrik-magnet yang didapatkan oleh Faraday, Ampere, Gauss, Coulomb disamping yang dilakukan oleh Maxwell sendiri. Penggunaan persamaan tersebut dalam metoda MT telah banyak diuraikan dalam buku-buku pengantar geofisika khususnya yang membahas metoda EM (Keller & Frischknecht, 1966; Porstendorfer, 1975; Rokityansky, 1982; Kauffman & Keller, 1981; 1985). Dalam bentuk diferensial, persamaan Maxwell dalam domain frekuensi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon}$$

Masing-masing parameter memiliki hubungan $D = \epsilon E$, $B = \mu H$, dan $J = \sigma E$, dimana:

E = Kuat medan listrik

H = Fluks medan magnet

B = Permeabilitas magnetik

J = Rapat arus listrik

ϵ = Dielektrik

σ = Konduktivitas

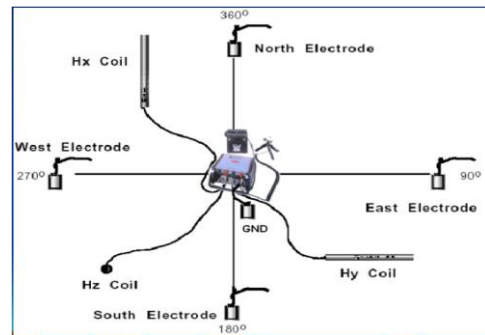
ρ = Tahanan jenis

Ada dua dipole listrik ortogonal untuk mengukur dua komponen medan listrik horizontal dan dua sensor magnetik paralel untuk mengukur komponen magnetik yang sesuai. Sensor magnetik terdiri dari kumparan dengan puluhan ribu inti besi yang mengelilinginya yang sangat permeabel dengan total panjang sensor biasanya adalah sepanjang 2 m. Ketiga sensor mengukur komponen magnetik vertikal. Dengan pengukuran perubahan dalam magnetik (H) dan medan listrik (E) lapangan selama rentang frekuensi, sebuah kurva tahanan jenis semu dapat diproduksi, analog yang dihasilkan untuk tahanan jenis semu diukur sebagai sebuah fungsi frekuensi bukan antar-elektroda pemisah.

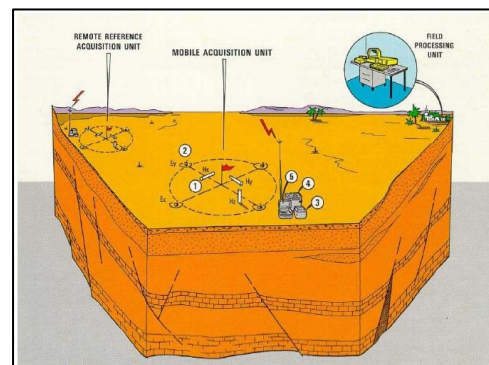
Peralatan lapangan yang digunakan dalam pengambilan data MT, diantaranya:

- Alat Magnetotellurik type MTU-5A buatan Phoenix Geophysics, Canada.

- 3 coil magnetic (untuk komponen H_x , H_y dan H_z)
- 3 Elektroda Porouspot sebanyak 5
- Kabel penghubung
- Air garam
- Accu 12 volt, Inverter DC –AC
- Laptop (notebook) lapangan
- GPS Navigator Portable
- Kompas geologi



Gambar 8. Layout umum pengukuran MT.



Gambar 9. Desain survei MT dengan *remote reference*

Pada dasarnya pengambilan data di daerah survey (*data acquisition*) MT dilakukan untuk mengetahui variasi medan EM terhadap waktu, yaitu dengan mengukur secara simultan komponen horizontal medan listrik (E_x , E_y) dan medan magnet (H_x , H_y). Sebagai pelengkap diukur pula komponen vertikal medan magnet (H_z).

Oleh karena itu, alat ukur MT terdiri dari tiga sensor sinyal magnetik (coil / magnetometer) dan dua pasang sensor sinyal listrik (porous pot / elektroda) beserta unit penerima yang berfungsi sebagai pengolah sinyal dan perekam data. Magnetometer yang biasa digunakan adalah tipe induksi dengan sensitivitas tinggi (~ 50 mV/nT) mengingat lemahnya sinyal magnetik. Komponen peralatan magnetotellurik ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10 Komponen Peralatan MT/AMT

Elektroda potensial sebaiknya dari jenis non-polarizable porous-pot Cu-CuSO₄ dengan kestabilan yang tinggi terutama terhadap perubahan temperatur karena pengukuran data MT memerlukan waktu yang relatif lama dibanding dengan pengukuran potensial pada survey geolistrik tahanan-jenis. Elektroda jenis Pb-PbCl₂ atau Cd-CdCl₂ jarang digunakan, disamping mahal juga dapat mencemari lingkungan.

Unit penerima terdiri dari dua bagian utama yaitu bagian analog dan bagian digital sesuai dengan bentuk data yang terdapat di dalamnya. Pada bagian analog terdapat dua jenis filter yaitu RFI (*radio frequency interference*) dan *notch filters* masing-masing untuk mengeliminasi gangguan atau interferensi dari frekuensi radio dan frekuensi jala-jala listrik dan harmonik-nya (50, 60, 150 dan 180 Hz atau konfigurasi lain). Khusus kanal elektrik dilengkapi pula dengan pengkompensasi SP (*self-potential*).

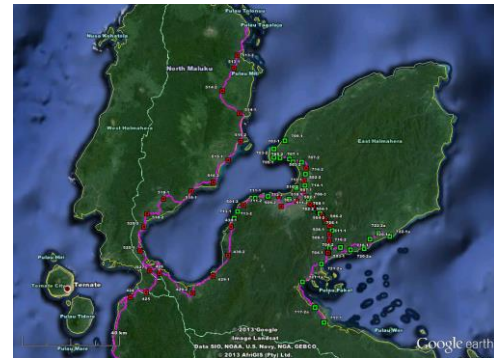
Band - pass filter pada bagian digital berguna untuk memilah sinyal kedalam 3 rentang frekuensi (LF, MF dan HF masing-masing untuk low, medium dan high frequency bands) yang saling tumpang-tindih. Hal ini dimaksudkan untuk menerapkan amplifikasi dengan gain yang sesuai dengan karakteristik sinyal pada masing-masing jangkah frekuensi. Sebelum direkam dalam bentuk numerik (digital), sinyal analog didigitasi dengan frekuensi pencuplikan (*sampling frekuensi*) yang sesuai dengan rentang frekuensinya agar tidak terjadi *aliasing* pada saat rekonstruksi sinyal tersebut untuk mendapatkan informasi yang dikandungnya. Oleh karena itu biasanya digunakan frekuensi pencuplikan 2 sampai 4 kali frekuensi yang paling besar.

Setelah melalui *Analog to Digital (A/D) converter*, data direkam dalam media penyimpanan data seperti pita magnetik atau *magneto-optic disk* dengan menggunakan

representasi 16 bit (*binary digit*) atau lebih untuk menjamin ketelitian. Media penyimpanan yang umum digunakan berupa CF (*compact flash*) Card. Unit penerima dilengkapi pula dengan alat monitor sinyal yang dapat secara langsung/*real time* mengontrol kualitas data yang direkam. Biasanya dihubungkan secara *online* dengan Laptop. Hal ini dimaksudkan untuk menghindari perekaman data yang banyak mengandung noise seperti pada saat adanya badai magnetik, dan gangguan lokal.

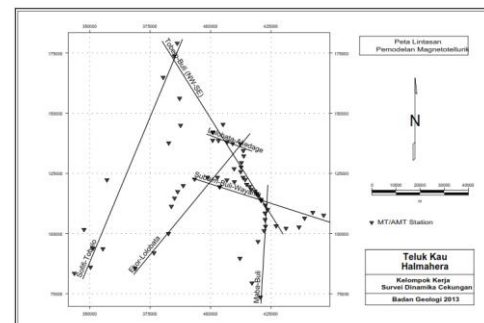
HASIL

Titik stasiun pengukuran MT/AMT ditampilkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Peta lokasi Pengukuran MT/AMT

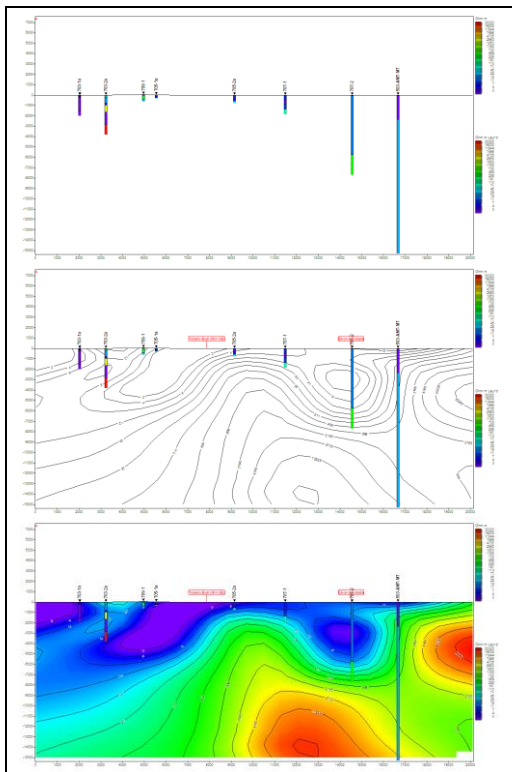
Terdapat enam lintasan pemodelan seperti ditunjukkan Gambar 13. Dari tiap lintasan dibuat model penampang 1D, 2D (*contoured*) dan 2D (*coloured*). Model penampang yang akan dibahas dalam makalah ini hanya lintasan pemodelan B dari Lolobata ke Akedaga, sepanjang 20 km. Hasil pemodelan Lintasan B ditunjukkan dalam Gambar 14.



Gambar 13. Lintasan Pemodelan MT/AMT.

Hasil pengukuran MT/AMT ditampilkan menggunakan teknik pemodelan. Teknik pemodelan ada dua

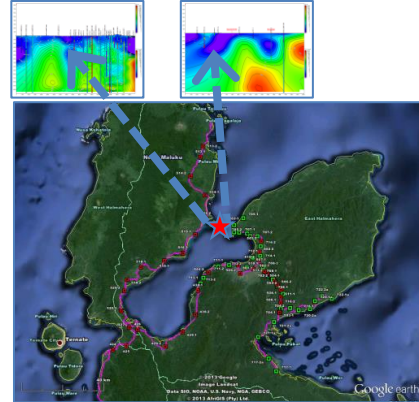
macam. Pertama, *Forward modelling* (Pemodelan ke depan); dilakukan dengan menghitung respons dari suatu model untuk dibandingkan dengan data impedansi (tahanan-jenis semu dan fasa) pengamatan. Dengan cara *trial and error* dapat diperoleh suatu model yang responsnya paling cocok dengan data, sehingga model tersebut dapat dianggap mewakili kondisi bawah permukaan. Kedua *Inverse modelling* (pemodelan ke belakang), memungkinkan kita memperoleh parameter model langsung dari data. Metoda inversi Bostick (Jones, 1983) merupakan cara yang cepat dan mudah untuk memperkirakan variasi tahanan-jenis terhadap kedalaman secara langsung dari kurva sounding tahanan-jenis semu. Metode ini diturunkan dari hubungan analitik antara tahanan-jenis, frekuensi dan kedalaman investigasi atau *skin depth*.



Gambar 14 Line Pemodelan MT/AMT

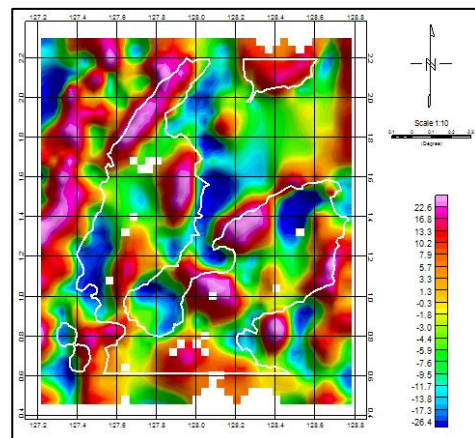
Model yang paling sederhana adalah model 1-D dimana tahanan-jenis bervariasi hanya terhadap kedalaman $\rho(z)$. Profil tahanan-jenis 1-D beberapa titik amat dalam satu lintasan dapat digunakan sebagai model awal untuk pemodelan 2-D. Penyelesaian persamaan yang berlaku untuk medan listrik dan medan magnet pada kasus ini menggunakan metoda beda hingga (*finite difference*) / elemen hingga (*finite element*).

Distribusi nilai tahanan jenis rendah (warna ungu-biru) berasosiasi dengan batuan sedimen. Sedangkan nilai tahanan jenis tinggi (warna merah-kuning) berasosiasi dengan batuan dasar (*basement*). Tebal batuan sedimen di bagian barat antara 2100 hingga 3000 meter, di bagian timur 3000 hingga 4000 meter. bahkan mencapai hingga 7000 meter di lokasi tertentu.



Gambar 15. Posisi Cekungan Sedimen berdasarkan nilai tahanan jenis MT/AMT.

Posisi cekungan sedimen hasil MT/AMT dikonfirmasi juga dengan peta anomaly residual gravity pada Gambar 16.

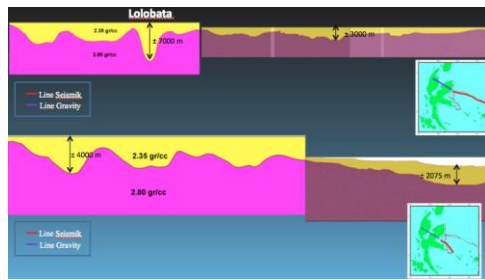


Gambar 16. Peta Anomali Residual Gravity

Hasil penampang gravity ini digabungkan juga dengan penampang seismik pada gambar 17. Tebal sedimen diperkirakan berdasarkan gravity dan seismik ini sekitar 4000 meter bahkan ada yang mencapai 7000 meter.

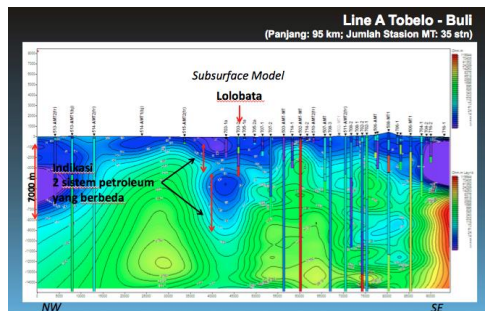
Pemodelan A Tobelo – Buli pada Gambar 18 menunjukkan distribusi tahanan jenis rendah yang berasosiasi dengan batuan sedimen. Indikasi rembesan minyak bumi di daerah Lolobata dari informasi penduduk local bisa jadi benar adanya, walaupun pada

saat survei lapangan, tim tidak berhasil menemukan rembesan tersebut.



Gambar 17. Lintasan Seismik sekitar Halmahera

Gambar 18 menunjukkan hasil pemodelan bawah permukaan di lintasan A Tobelo – Buli dengan panjang lintasan 95 km, dan jumlah MT station 35 buah. Hasil interpretasi menunjukkan indikasi adanya dua sistem petroleum yang berbeda.



Gambar 18. Line MT dan rembesan minyak di Lolobata.

SIMPULAN

Penampang bawah permukaan dari pengukuran magnetotellurik menunjukan distribusi tahanan-jenis (*resistivity*) dari batuan di bawah permukaan. Nilai *resistivity* tinggi biasanya berasosiasi dengan batuan dasar (*basement*). Nilai *resistivity* rendah biasanya berasosiasi dengan batuan sedimen.

Subsurface model dari pengukuran MT dapat memberikan informasi diantaranya: konfigurasi batuan dasar (*basement*), ketebalan cekungan sedimen.

Hasil pengukuran Magnetotellurik di Teluk Kau dapat memberikan gambaran bawah permukaan untuk memperkirakan letak dan potensi sumber daya migas serta mendukung kegiatan eksplorasi khususnya di Kawasan Timur Indonesia.

Untuk lanjutan penelitian disarankan pengukuran MT skala detail (spacing 250-500 m), di lokasi yang diduga prospek.

DAFTAR PUSTAKA

Apandi, T. & D. Sudana (1980) - Geologic map of the Ternate Quadrangle, North Maluku, 1: 250,000. GRDC, Bandung.

Avram, Y. (2012), An Introduction to MT, AMT, and Phoenix Geophysics Receivers. MT Course and Training for PSG, Toronto, Canada.

Cagniard, L.; 1953, *Basic Theory of Magnetotelluric for Geophysical Prospecting*, Geophysics 18, 3 – 53.

Christopherson, K. R., 1991, “*Applications of Magnetotelluric to Petroleum Exploration in Papua New Guinea: A model for Frontier Areas*”, Geophysics, 56, 21-27.

Jones, A.G., 1983, *On the equivalence of the "Niblett" & "Bostick" transformation in the magnetotelluric method*, J. Geophys., 53, 72 - 73.

Pellerin, L., Hohmann, G.W., 1990, *Transient electromagnetic inversion: A remedy for magnetotelluric static shifts*, Geophysics, 55, 1242 - 1250.

Ranganayaki, R.P., 1984, *An interpretive analysis of magnetotelluric data*, Geophysics, 49, 1730 - 1748.

Sapiie, B., Wagimin, N., Adyagharini, A.C. and Pamunpuni, A.; *Geology and Tectonic Evolution of Bird Head Region Papua, Indonesia: Implication for Hydrocarbon Exploration in The Eastern Indonesia*. AAPG International Convention and Exhibition, Singapore, 16-19 September 2012

Sternberg, B.K., Washburne, J.C., Pellerin, L., 1988: *Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings*, Geophysics, 53, 1459 - 1468.

Supriatna, S. (1980)- Geologic map of the Morotai Quadrangle, North Maluku. Geol. Res. Dev. Centre, Bandung, p.

Unsworth M.J, (University of Alberta), 2005, “*New Developments in*

- Conventional Hydrocarbon Exploration with EM Methods*, CSEG recorder.
- Vozoff, K., 1972, *The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins*, Geophysics, 37, 98-141.
- Vozoff, K., 1991, *The magnetotelluric method*, in *Electromagnetic methods in applied geophysics*, Vol. 2 *Application*, M.N. Nabighian (ed.), SEG Publishing.