

ANALISIS DIAGRAM POLAR DAN TENSOR FASE UNTUK PEMODELAN 2D TE MODE DAN TM MODE DATA MAGNETOTELLURIK SAN PABLO BAY, CALIFORNIA, USA

Dorlensa Sitorus¹, Selvi Misnia Irawati^{1*}, Andri Yadi Paembonan¹

¹Teknik Geofisika Institut Teknologi Sumatera Utara

e-mail : selvi.irawati@tg.itera.ac.id

Abstrak. Daerah San Pablo Bay California mempunyai patahan utama yaitu patahan Rodgers Creek yang diperkirakan memiliki keberlanjutan pada patahan Hayward di bawah permukaan San Pablo Bay yang dapat mengakibatkan bencana alam seperti gempa bumi. Penelitian ini bertujuan untuk memahami dimensionalitas dan arah *geoelectrical strike* melalui analisis diagram polar dan tensor fase, serta pemodelan 2D TE mode dan TM. Penelitian ini juga bertujuan dalam mengidentifikasi struktur bawah permukaan di wilayah San Pablo Bay, California, USA, dengan menggunakan metode magnetotellurik (MT). Terdapat 14 titik pengukuran data MT yang digunakan. Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa di daerah penelitian terdapat dimensionalitas 2D dengan arah *geoelectrical strike* dari barat daya ke timur laut sebesar N50°E. Berdasarkan penampang resistivitas 2D pada TE mode dan TM mode, struktur utama Rodgers Creek teridentifikasi di titik SP12. Struktur ini mencapai kedalaman 1250 m pada TE mode serta 1700 m pada TM mode di bawah permukaan Teluk San Pablo Bay yang terdiri dari batuan sedimen kuartar. Selain itu, juga terdapat struktur minor pada titik SP01 - SP02, SP06 - SP07, dan SP09, dengan kedalaman antara 100 - 500 m.

Kata Kunci: Dimensionalitas; *Geoelectrical Strike*; Magnetotellurik; Resistivitas

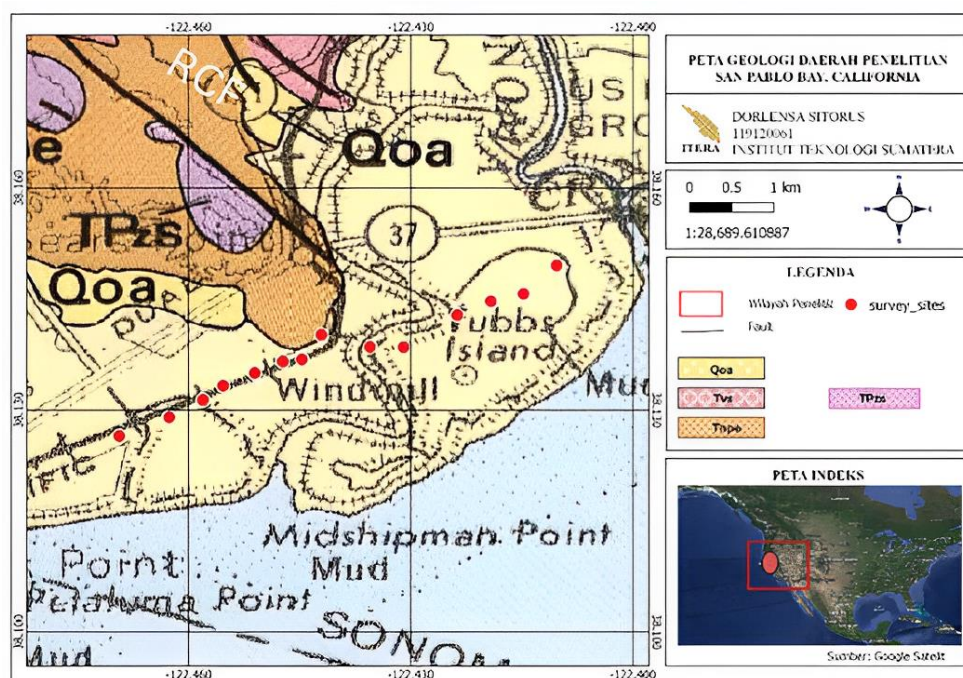
Abstract.. The San Pablo Bay area of California has a major fault, the Rodgers Creek fault, which is thought to have continuity on the Hayward fault in the subsurface of San Pablo Bay, which can lead to natural disasters such as earthquakes. This study aims to understand the dimensionality and direction of *geoelectrical strikes* through polar diagram and phase tensor analysis, as well as 2D modeling of TE and TM modes. This research also aims to identify subsurface structures in the San Pablo Bay region, California, USA, using the magnetotelluric (MT) method. There are 14 MT data measurement points used. The results of data processing show that the study area has 2D dimensionality with a *geoelectrical strike* direction from southwest to northeast of N50°E. Based on the 2D resistivity cross section in TE mode and TM mode, the main structure of Rodgers Creek is identified at point SP12. This structure reaches a depth of 1250 m in TE mode and 1700 m in TM mode below the surface of San Pablo Bay, consisting of Quaternary sedimentary rocks. Minor structures were also identified at points SP01 - SP02, SP06 - SP07, and SP09, with depths between 100 - 500 m.

Keywords: Dimensionality; *Geoelectrical Strike*; Magnetotelluric; Resistivity

PENDAHULUAN

Pada daerah San Fransisco mempunyai Teluk di bagian San Pablo Bay, yang merupakan pusat ekonomi dan kebudayaan di wilayah utara negara California, USA. Secara umum, wilayah ini didominasi oleh batuan dari zaman kuarter, seperti yang terlihat pada peta geologi daerah penelitian (Gambar 1). Ditemukan Formasi Qoa (endapan alluvial seperti kerikil, pasir, lanau, dan lempung) atau sering disebut dengan sedimen kuarter (*Quaternary Sediments*), Formasi Tvs (batuan vulkanik, abu, basalt silika, andesit, aliran dasit, dan riolit), Formasi Tnpe (lempung, lanau, dan batu lumpur) atau disebut batuan sedimen tersier atas (*Upper Tertiary Sediments Rocks*), dan Formasi Tpzs (batuan sedimen, batuan beku, dan batuan vulkanik) atau batuan tersier vulkanik (*Tertiary Volcanics*).

Daerah ini juga dipengaruhi oleh keberadaan patahan Rodgers Creek, yang diyakini punya kelanjutan pada patahan Hayward.



Gambar 1. Peta Geologi Daerah Penelitian (Chin Jhon L. et al. 1993)

Patahan Rodgers Creek berada sekitar 6 km di timur patahan Hayward dan memiliki kemiringan yang curam ke arah timur. Potensi terjadinya gempa bumi di sepanjang patahan Hayward yang dapat meluas ke arah utara melalui patahan Rodgers Creek atau sebaliknya, sangat bertumpu pada geometri hubungan kedua patahan di bawah San Pablo. Daerah patahan Hayward-Rodgers Creek diduga sebagai salah satu yang paling mungkin mengalami gempa bumi dengan magnitudo lebih dari 6,7 dalam 30 tahun mendatang (Field et al., 2014).

Berdasarkan Studi Ponce et al. (2016), gempa bumi besar selanjutnya yang berpotensi memengaruhi lebih dari 7 juta penduduk di daerah San Francisco Bay kemungkinan besar akan dipicu oleh patahan Hayward-Rodgers Creek. Penelitian Watt et al. (2016) menyajikan bahwa penafsiran geofisika dengan pemodelan kinematik mengindikasikan bahwa patahan Hayward dan Rodgers Creek terkait secara langsung, yang dapat mengakibatkan gempa bumi besar ($M=7,4$). Gempa bumi tersebut dapat menimbulkan banyak kerugian seperti kerusakan luas, hilangnya nyawa, hingga dampak ekonomi global yang signifikan.

Dalam studi ini, dilakukan analisis dimensionalitas dan arah geoelektrikal dengan memanfaatkan diagram polar dan tensor fase. Penggunaan diagram polar memanfaatkan impedansi yang dapat mengalami distorsi. Oleh karena itu, dilakukan analisis tambahan dengan tensor fase, yang menetapkan dimensionalitas dengan memperhitungkan perbedaan antara nilai fase maksimum dan fase minimum. Pendekatan ini memungkinkan untuk menggambarkan arah utama dari struktur di daerah penelitian tanpa distorsi yang mungkin terjadi (Pranata, et al., 2017). Oleh karena itu, riset ini dilaksanakan untuk menganalisis data magnetotellurik dengan

tujuan menentukan dimensionalitas dan arah *geoelectrikal strike*. Analisis dilakukan berdasarkan diagram polar dan tensor fase untuk identifikasi struktur bawah permukaan di San Pablo Bay, California. Selain itu, dilakukan pemodelan 2D dengan TE mode dan TM mode untuk menggambarkan struktur secara lebih mendetail.

Berdasarkan studi literatur, Ponce et al. (2016) melakukan penelitian di San Pablo Bay, California dengan menggunakan survei gabungan magnetik dan gravitasi. Sasaran penelitian ini yaitu untuk menginvestigasi struktur geologi di bawah permukaan untuk lebih memahami kerangka geologi serta potensial bahaya gempa bumi di Teluk San Francisco Bay. Kemudian pada tahun 2020 Peacock et al. (2020) melakukan pengukuran magnetotellurik dengan tujuan menyediakan data magnetotellurik di daerah San Pablo Bay California. Namun, belum pernah dilakukan pembahasan lanjut yang menggambarkan kondisi bawah permukaan di daerah tersebut menggunakan pengolahan magnetotellurik.

METODOLOGI

Metode Magnetotellurik

Magnetotellurik adalah metode geofisika pasif yang menggunakan gelombang elektromagnetik alam untuk mengukur sifat fisik permukaan bumi, terutama resistivitasnya. Rentang panjang gelombang sinyal elektromagnetik yang digunakan dalam metode ini adalah antara $10^{-5} - 10^4$ Hz (Vozoff, 1990).

Informasi mengenai resistivitas medium dalam data magnetotellurik dapat diperoleh melalui penerapan konsep dasar metode ini yang berdasarkan pada penyelesaian persamaan Maxwell. Persamaan Maxwell mencakup Hukum Faraday untuk induksi elektromagnetik, Hukum Ampere untuk medan magnetik yang dihasilkan oleh arus listrik, Hukum Gauss untuk fluks medan listrik, dan Hukum Coulomb yang berkaitan dengan medan listrik akibat muatan. Dengan memahami dan menganalisis persamaan-persamaan ini, kita dapat menggambarkan resistivitas dari medium bawah permukaan, yang menjadi fokus utama dalam studi magnetotellurik, seperti yang dituliskan pada persamaan (1) hingga (4) (Telford, et al., 1990).

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (4)$$

dengan :

E : medan listrik (V/m)

B : induksi magnetik (w/m²)

H : medan magnet (A/m)

J : rapat arus (A/m²)

D : perpindahan listrik (C/m²)

Tensor Impedansi

Pengukuran magnetotellurik melibatkan pengamatan variasi medan listrik (E) serta medan magnet (H) yang bergerak secara ortogonal di permukaan bumi. Kemudian, komponen-komponen yang ortogonal ini dihubungkan melalui tensor impedansi (Z). Tensor impedansi ini berperan sebagai fungsi transfer dalam magnetotellurik yang menggambarkan sifat-sifat bawah permukaan dan memberikan informasi tentang resistivitas di dalamnya. Secara matematis, dalam metode magnetotellurik, persamaan yang digunakan untuk menemukan tensor impedansi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} E_x &= Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y \\ E_y &= Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \rightarrow E = ZH \quad (6)$$

Tensor impedansi (Z) digunakan dalam konteks magnetotellurik, dan bentuk persamaannya bergantung pada dimensionalitas medium yang sedang dipelajari. Resistivitas semu dan kurva fase (M) terhadap sumbu (x) dan (y) dapat dihitung menggunakan persamaan-persamaan berikut:

$$\rho_{app} = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z|^2 \quad (7)$$

$$\phi_{xy} = \tan^{-1} \left[\frac{Im(Z_{xy})}{Re(Z_{xy})} \right]; \phi_{yx} = \tan^{-1} \left[\frac{Im(Z_{yx})}{Re(Z_{yx})} \right] \quad (8)$$

Kedalaman Penetrasi (*Skin Depth*)

Skin depth adalah kedalaman di mana amplitudo medan elektromagnetik telah meluruh sebesar 37% dari nilai awalnya. Kedalaman penetrasi ini mencakup rentang kedalaman di bawah permukaan bumi yang dapat dicapai oleh gelombang elektromagnetik. Ketika medan elektromagnetik menembus lapisan konduktif, energinya akan melemah atau teratenuasi, yang menyebabkan jarak yang dapat ditempuh oleh medan elektromagnetik berkurang seiring dengan meningkatnya nilai konduktivitas bahan tersebut (Grandis, 2013). Estimasi kedalaman *skin depth* adalah pendekatan yang hanya berlaku dalam situasi di mana mediumnya homogen. Secara umum, estimasi kedalaman investigasi menggunakan *skin depth* cenderung terlalu besar atau sering disebut sebagai *overestimate*. Oleh karena itu, seringkali digunakan pendekatan kedalaman efektif, yang merupakan *skin depth* dibagi dengan $\sqrt{2}$, pada persamaan 10 :

$$\delta = 503,3 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \approx 500 \sqrt{\rho\tau} \quad (9)$$

$$\frac{\delta}{2} = 350 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \approx 350 \sqrt{\rho\tau} \quad (10)$$

Seperti halnya metode geofisika lain, metode magnetotellurik juga melibatkan serangkaian langkah pekerjaan yang dimulai dari pengambilan data di lapangan, pengolahan data, analisis data, pemodelan, hingga interpretasi hasil. Data magnetotellurik yang didapatkan dari pengukuran di lapangan sering kali terpengaruh oleh *noise* atau distorsi, yang dapat memudahkan skala dimensionalitas semestinya dari struktur bawah permukaan. Hal ini dapat menyebabkan kesalahan dalam proses interpretasi hasil. Tahap analisis data sangat penting karena dapat mengurangi efek dari *noise* dan distorsi galvanik yang mungkin disebabkan oleh perbedaan topografi yang signifikan saat pengumpulan data di lapangan (Caldwell et al., 2004).

Diagram Polar

Diagram Polar digunakan dalam analisis data magnetotellurik untuk menentukan dimensionalitas dari data tersebut. Jika diagram polar menunjukkan bentuk lingkaran, ini mengindikasikan bahwa data magnetotellurik memiliki dimensionalitas 1D. Jika diagram polar berbentuk ellips, ini menunjukkan bahwa data magnetotellurik memiliki dimensionalitas 2D. Sedangkan jika diagram polar tidak berbentuk ellips (misalnya berbentuk menjauhi bentuk ellips), ini menunjukkan bahwa data magnetotellurik memiliki dimensionalitas 3D. (Pranata, et al., 2017).

Tensor Fase

Tensor fase adalah perbandingan antara bagian riil dan bagian imajiner dari tensor impedansi dalam metode magnetotellurik (Caldwell et al., 2004). Tensor fase terdiri dari empat komponen riil ϕ_{xx} , ϕ_{xy} , ϕ_{yx} , ϕ_{yy} dan empat parameter terkait, sudut α , ϕ_{max} , ϕ_{min} , β . Sudut β merupakan parameter yang

digunakan untuk mendapatkan informasi mengenai dimensi spasial dari data magnetotellurik. Sudut β merupakan parameter yang digunakan untuk mendapatkan informasi mengenai dimensi spasial dari data magnetotellurik. Sudut ini mengindikasikan kemiringan spektrum daya impedansi antara medan listrik serta medan magnet pada domain frekuensi. Dengan menganalisis sudut β , peneliti dapat menafsirkan apakah struktur bawah permukaan yang diamati memiliki dimensionalitas 1D, 2D, atau 3D (Niasari, 2015).

TE Mode (*Transverse Electric*) dan TM Mode (*Transverse Magnetic*)

TE Mode dalam magnetotellurik adalah kondisi di mana komponen medan listrik (*E-field*) sejajar dengan sumbu utama dari struktur yang diamati. Dalam TE Mode, arus listrik yang dihasilkan tidak melintasi batas antara bidang dengan nilai resistivitas yang berbeda secara langsung. TM Mode dalam magnetotellurik mengacu pada kondisi di mana komponen medan magnet (*H-field*) sejajar dengan sumbu utama dari struktur yang diamati. Dalam TM mode, arus listrik yang diinduksi biasanya melintasi batas antara bidang dengan nilai resistivitas yang berbeda, yang memengaruhi bagaimana respons medan elektromagnetik terdeteksi oleh peralatan pengukuran (Niasari, 2015).

Inversi Nonlinear Conjugate Gradient (NLCG)

Proses pemodelan inversi dalam penelitian ini, digunakan metode inversi *Nonlinear Conjugate Gradient* (NLCG). Inversi NLCG digunakan untuk mempermudah fungsi objektif dalam pemodelan resistivitas dari data magnetotellurik yang diamati, dengan menerapkan teknik pemulusan (*smoothing*) pada model yang dihasilkan (Rodi and Mackie, 2001). Dalam penggunaan algoritma *Nonlinear Conjugate Gradient* (NLCG) untuk menyelesaikan masalah, tujuan utamanya adalah untuk menemukan penyelesaian model yang mengurangi fungsi objektif ψ , dapat ditemukan seperti berikut:

$$\psi(m, \tau) = \psi d + \tau \psi m \rightarrow \min \quad (11)$$

$$\psi(m) = \left(\begin{array}{c} (d - mF)^T V^{-1} \\ (d - mF) \end{array} \right) + \tau m^T L^T L m \quad (12)$$

dengan:

d : himpunan data dalam bentuk vektor

F : mewakili fungsi matematis *forward modelling*

m : parameter model

V : matriks kovariansi *error*

τ : parameter *Tau*

L : operator linear.

Pada persamaan (11) suku pertama mewakili nilai deviasi data (*misfit*), sedangkan suku keduanya untuk mengevaluasi sejauh mana model dapat diterima dalam konteks kehalusan parsial (Ramadhan et al., 2011).

Proses Pengolahan Data

Data pada riset ini adalah data dari sumber sekunder dari 14 stasiun magnetotellurik (MT). Data ini dikumpulkan dalam rentang dua hari, yaitu 07-08 Oktober 2015, dan dipublikasikan di USGS (*United States Geological Survey*) USA pada 10 April 2020 (Peacock, et al., 2020). Setelah didapatkan data edi file, dilakukan analisis diagram polar menggunakan *software WingLink* dan analisis tensor fase menggunakan *code py* atau *ipynb* sehingga diperoleh dimensionalitas dan arah *geoelectrical strike*. Analisis *geoelectrical strike* dilakukan dengan memisahkan antar periode tinggi, sedang, rendah, dan gabungan periode secara keseluruhan. Dari hasil gabungan periode keseluruhan selanjutnya akan digunakan untuk merotasi data magnetotellurik.

Pengolahan hingga memperoleh model pada magnetotellurik data didapat dengan menggunakan pemodelan 2D, di mana variasi resistivitas dipertimbangkan terhadap kedalaman dan jarak horizontal

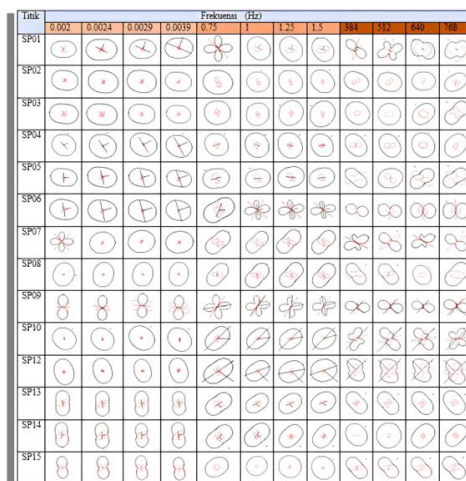
(Wibowo, 2013). Dalam proses pemodelan dalam penelitian ini, digunakan inversi 2D menggunakan perangkat lunak *WingLink* dengan metode *Non-Linear Conjugate Gradient* (NLCG). Pemodelan 2D mengacu pada dua mode utama, yaitu TE mode (*Transverse Electric*) dan TM mode (*Transverse Magnetic*), yang memiliki karakteristik polarisasi yang berbeda. Perbedaan ini memberikan informasi yang unik, sehingga dalam penelitian ini dilakukan pemodelan 2D pada TE mode, TM mode, dan TE-TM mode.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Data Magnetotellurik

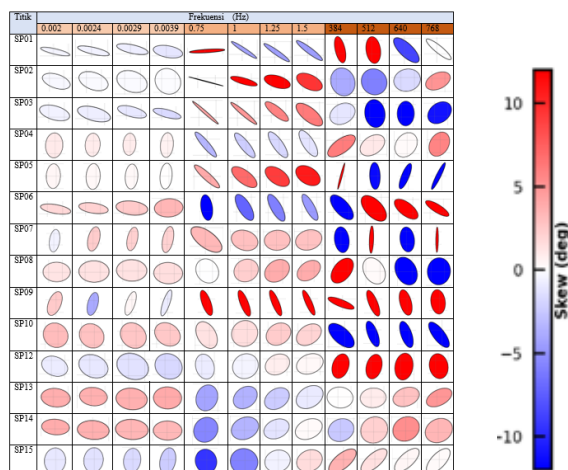
Pada penelitian ini didapatkan dimensionalitas berdasarkan diagram polar dan tensor fase yang ditinjau dari frekuensi rendah (0,002 Hz; 0,0024 Hz; 0,0029 Hz; 0,0039 Hz), frekuensi sedang (0,75 Hz; 1 Hz; 1,25 Hz; 1.5 Hz) dan frekuensi tinggi (384 Hz; 512 Hz; 640 Hz; 786 Hz) di 14 titik data magnetotellurik. Frekuensi memiliki hubungan yang berbanding terbalik dengan kedalaman, sehingga berdasarkan rentang frekuensi yang digunakan dapat diketahui dimensionalitas pada kedalaman dangkal atau frekuensi tinggi, kedalaman sedang atau frekuensi sedang, dan kedalaman dalam pada frekuensi rendah.

Gambar 2 merupakan analisis dimensionalitas berdasarkan diagram polar. Berdasarkan hasil dimensionalitas yang didapatkan dari diagram polar, dimensionalitas di daerah penelitian didominasi oleh data magnetotellurik jenis 2D (berbentuk ellipsis). Pada kedalaman dangkal atau frekuensi tinggi jenis dimensionalitas data adalah 3D. Semakin ke dalam atau pada frekuensi rendah dimensionalitas di daerah penelitian menunjukkan data 2D.



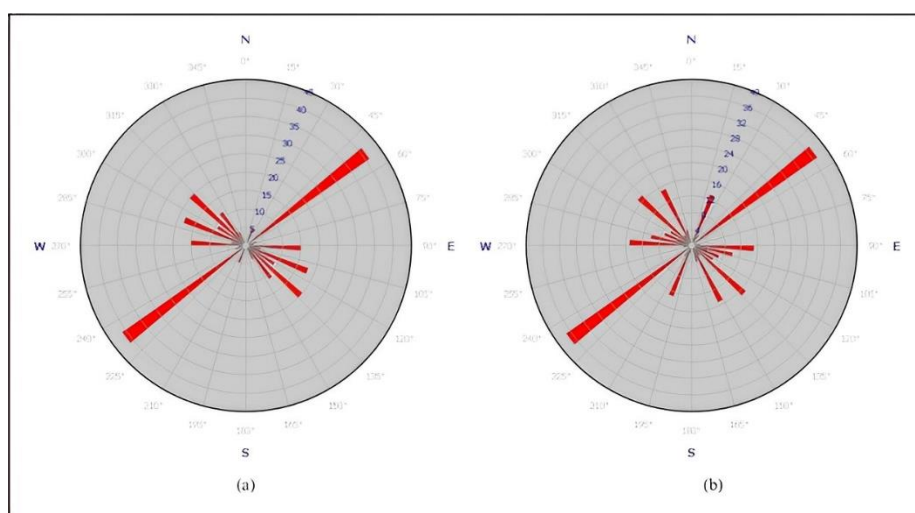
Gambar 2. Analisis Dimensionalitas menggunakan Diagram Polar

Karena penggunaan diagram polar menggunakan impedansi, kemungkinan adanya distorsi masih ada. Oleh karena itu, dilakukan analisis tambahan menggunakan tensor fase. Tensor fase memperhitungkan perbedaan antara nilai maksimum dan minimum dari fase untuk menentukan dimensionalitas, yang membantu menggambarkan arah dominan dari struktur area studi tersebut tanpa adanya distorsi (Pranata et al., 2017). Berdasarkan tensor fase, yaitu pada Gambar 3 sama dengan diagram polar pada tensor fase juga menunjukkan dimensionalitas di daerah San Pablo didominasi oleh data 2D yang semakin ke dalam atau frekuensi rendah dimensionalitasnya adalah 2D dan pada permukaan atau kedalaman dangkal yaitu bentuk 3D (ellipsis asimetris, nilai skew >3 dan <-3).



Gambar 3. Analisis Dimensionalitas menggunakan Tensor Fase

Geoelectrical strike yang dihasilkan menggunakan diagram polar dan fase tensor akan ditampilkan dalam bentuk diagram rose, yaitu pada Gambar 4. Pada Gambar 4 (a) merupakan analisis arah *geoelectrical strike* diagram polar semua frekuensi, yaitu frekuensi rendah, sedang hingga frekuensi tinggi. Gambar 4 (b) merupakan analisis arah geoelektrikal tensor fase semua frekuensi, yaitu frekuensi rendah, sedang hingga frekuensi tinggi. Diketahui berdasarkan analisis data magnetotellurik arah *geoelectrical strike* daerah penelitian menggunakan diagram polar dan tensor fase adalah N50°E Barat Daya – Timur Laut. Berdasarkan informasi geologi daerah penelitian dari Chin John L. et al. (1993) diketahui arah *geological strike* yaitu arah Barat Daya – Timur Laut. Oleh karena itu, hasil arah *geoelectrical strike* pada penelitian ini sesuai dengan arah *geological strike* pada daerah penelitian, sehingga selanjutnya hasil *geoelectrical strike* yang diperoleh sebesar N50°E digunakan untuk merotasi data magnetotellurik agar sejajar dengan arah *strike* regional. Rotasi data dilakukan untuk meminimalisir kesalahan dalam interpretasi.



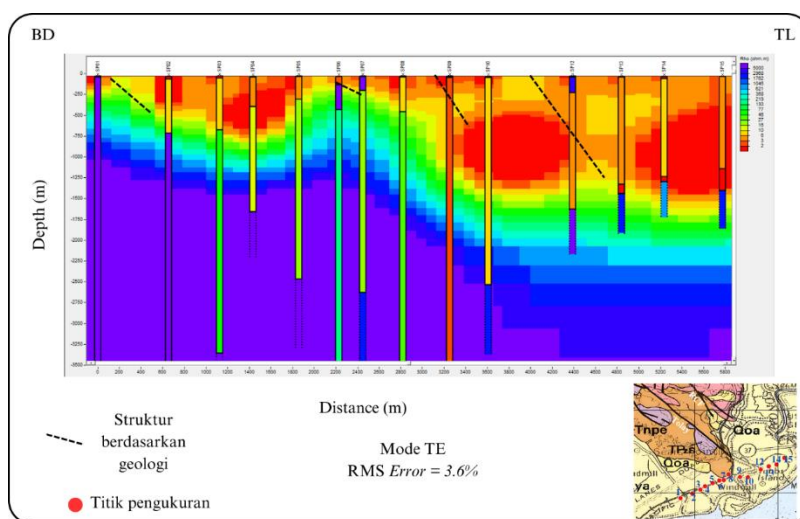
Gambar 4. Arah *Geoelectrical Strike* Gabungan (A) Diagram Polar Semua Frekuensi; (B) Tensor Fase Semua Frekuensi

Pemodelan Magnetotellurik

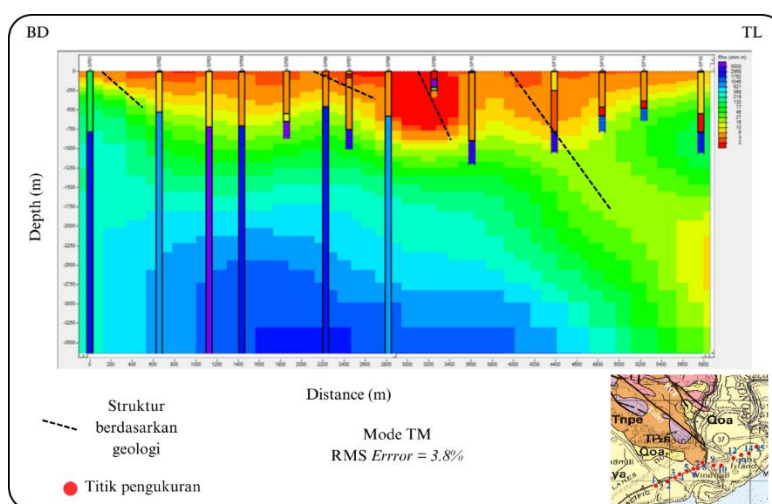
Setelah selesai dalam analisis data magnetotellurik, selanjutnya adalah pemodelan 2D menggunakan inversi NLCG. Pada penelitian terdiri dari 14 titik pengukuran SP01, SP02, SP03, SP04, SP05, SP06, SP07, SP08, SP10, SP11, SP12, SP13, dan SP15, yang dibuat dalam 1 lintasan berarah (BD) barat daya – (TL) timur laut. Pada pemodelan data, dilakukan inversi 1D *Bostick* untuk mempermudah interpretasi awal untuk memperkirakan variasi resistivitas terhadap kedalaman, yang kemudian di *overlay* dengan pemodelan 2D

sebagai hasil yang lebih akurat, yang ditampilkan menggunakan TE mode, TM mode dan TE-TM mode dengan menggunakan *software WingLink*.

Parameter yang perlu diatur yaitu *tau*, *alpha*, dan *betha*. *Tau* adalah faktor yang mengatur atau menjelaskan nilai *RMS error* dengan tingkat kekerasan dalam hasil inversi (Rusmala, 2020). *Alpha* merupakan *smoothing* secara horizontal sedangkan *betha* merupakan *smoothing* secara vertikal. Pemilihan nilai *Tau* dikorelasikan dengan keadaan geologi daerah penelitian sehingga *Tau* yang digunakan sebesar 5, nilai *alpha* 1, dan *betha* 3. Nilai *RMS error* yang dihasilkan pada pemodelan TE mode sebesar 3,6% dengan *roughness* sebesar 1132,7 dapat dilihat pada Gambar 5 dan TM mode sebesar 3,8% dengan *roughness* 423,6 dilihat pada Gambar 6. Semakin kecil nilai *RMS error* semakin kecil pula nilai *roughness* yang diperoleh. Dilakukan Iterasi pada data untuk mendapatkan pemodelan yang konvergen. Konvergensi berarti bahwa nilai *RMS error* menjadi kecil dan tidak mengalami peningkatan lebih lanjut, yang menunjukkan bahwa pemodelan tersebut cocok dengan geologi di daerah penelitian. Pada penelitian ini iterasi yang menghasilkan pemodelan yang konvergen yaitu sebanyak 100 iterasi. Pada hasil pemodelan inversi memiliki kedalaman 3500 m dan panjang lintasan 600 m.



Gambar 5. Pemodelan Inversi 2D TE mode

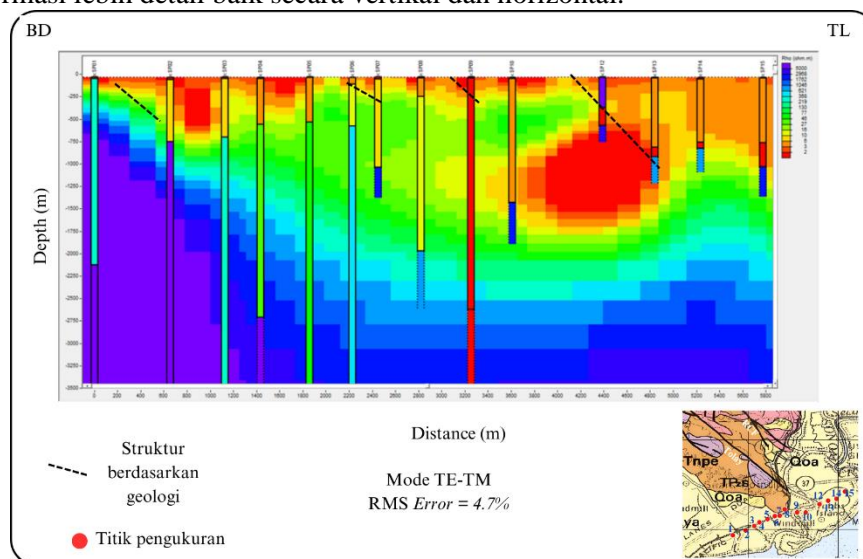


Gambar 6. Pemodelan Inversi 2D TM Mode

Pada hasil inversi 2D pada Gambar 5, Gambar 6, dan Gambar 7, menghasilkan sebaran resistivitas pada penampang berkisar 2 – 5000 Ohm.m. Resistivitas rendah diberi warna merah, sementara resistivitas tinggi diberi warna ungu. Pada penampang terdapat garis vertikal dimana itu merupakan hasil dari inversi 1D Bostick menggunakan mode yang sama pada penelitian ini.

Berdasarkan hasil pemodelan pada TE mode (Gambar 5) diperoleh hasil penampang yang detail ke arah horizontal atau secara lateral dan kurang baik ke arah vertikal atau secara kedalaman, sedangkan pada TM Mode (Gambar 6) diperoleh hasil penampang yang lebih detail ke arah kedalaman atau vertikal namun kurang

detail secara lateral atau horizontal. Hasil inversi 2D TE-TM mode, yaitu Gambar 7 merupakan hasil pemodelan 2D kombinasi dari TE mode dan TM mode (mode invarian) dengan *RMS error* sebesar 4,7 % memberikan informasi lebih detail baik secara vertikal dan horizontal.



Gambar 7. Pemodelan Inversi 2D TE-TM Mode

Berdasarkan peta geologi daerah penelitian batuan pada daerah penelitian terdiri dari Formasi Qoa (endapan alluvial seperti kerikil, pasir, lanau, dan lempung) atau disebut dengan sedimen kuarter (*Quaternary Sediments*), Formasi Tvs (batuan vulkanik, abu, basalt silika, andesit, aliran dasit, dan riolit), Formasi Tnpe (lempung, lanau, dan batu lumpur) atau disebut batuan sedimen tersier atas (*Upper Tertiary Sediments Rocks*), dan Formasi Tpzs (batuan sedimen, batuan beku, dan batuan vulkanik) atau batuan tersier vulkanik (*Tertiary Volcanics*). Untuk nilai resistivitas seperti pada Tabel 1.

Dalam mengidentifikasi struktur bawah permukaan, dapat dilihat dari kontras resistivitasnya.

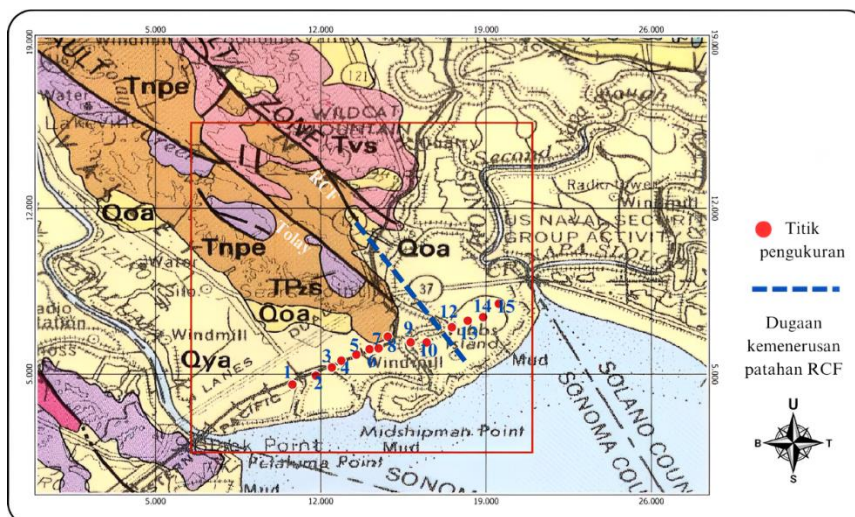
Tabel 1. Nilai Resistivitas Batuan

Batuan	Resistivitas (Ohm.m)	Sumber
<i>Quaternary Sediments</i>	2 - 219	Telford dkk., 1990; Liopsis dkk., 2007
<i>Upper Tertiary Sediments Rocks</i>	220 - 1762	Telford dkk., 1990; Liopsis dkk., 2007
<i>Tertiary Volcanics</i>	>1762	Telford dkk., 1990; Liopsis dkk., 2007

Struktur dapat diidentifikasi dengan adanya kontras resistivitas, konfirmasi geologi daerah penelitian, dan juga dikonfirmasi dengan penelitian sebelumnya. Berdasarkan pada TE mode dan TM mode penulis mengidentifikasi struktur dibawah permukaan tepatnya pada titik SP12 yang berasosiasi dengan formasi sedimen kuarter dengan resistivitas 2 – 219 Ohm.m yang memiliki kedalaman 1250 m pada TE mode serta 1700 m pada TM mode, begitu juga pada TE-TM mode pada kedalaman 1250 m yang diduga ini merupakan terusan patahan Rodgers Creek.

Menurut Watt et al. (2016) patahan Rodgers Creek adalah sesar mendatar bergerak kanan atau *right lateral strike slip fault* yang terkubur dalam endapan aliran aluvium muda (Qoa), yang merupakan bagian dari sedimen kuarter. Patahan Rodgers Creek bercabang menjadi dua patahan dan mengalami penerusan ke arah patahan Hayward. Patahan tersebut terbentuk dari retakan gempa bumi di masa lalu, dimana Rodgers Creek ini tersimpan di sejumlah saluran air di sebelah utara Santa Rosa (Watt et al., 2016).

Oleh karena itu, dapat diinterpretasi bahwa di lokasi penelitian terdapat adanya dugaan kemenerusan patahan Rodgers Creek seperti yang ditampilkan pada Gambar 8 tepatnya di bawah titik SP12, yang dapat diidentifikasi dengan keberadaan garis putus berwarna biru.



Gambar 8. Dugaan Kemenerusan Patahan Rodgers Creek

Dalam pemodelan 2D yang berarah barat daya – timur laut, juga teridentifikasi struktur di bawah titik SP01-SP02, SP06-SP07, dan SP09, yang kemungkinan merupakan struktur minor di daerah penelitian ini. Struktur minor ini diperkirakan mempunyai kedalaman sekitar ~100 - 500 m.

PENUTUP

Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan analisis diagram polar dan tensor fase didapatkan bahwa dimensionalitas di wilayah penelitian terdapat data magnetotellurik 2D dan 3D dan didominasi oleh data magnetotellurik 2D kemudian arah *geoelectrical strike* daerah penelitian yang sesuai dengan geologi wilayah penelitian yaitu barat daya - timur laut sebesar $N50^{\circ}E$.

Di titik SP12, struktur utama Rodgers Creek teridentifikasi dengan kemenerusan hingga kedalaman 1250 m dalam TE mode dan 1700 m dalam TM mode di bawah permukaan San Pablo Bay. Struktur ini terdiri dari batuan sedimen kuarter yang cenderung memiliki resistivitas rendah. Sementara itu, di titik SP01-SP02, SP06-SP07, dan SP09, teridentifikasi struktur minor dengan kedalaman sekitar 100-500 m di daerah San Pablo Bay, California.

Berdasarkan penelitian ini, perbandingan pada TE mode dan TM mode terhadap dari pemodelan magnetotellurik untuk mengidentifikasi struktur, dapat disimpulkan bahwa pengolahan dalam TE mode sangat efektif untuk mengidentifikasi struktur yang dangkal, sementara pengolahan dalam TM mode lebih baik dalam mengidentifikasi struktur yang lebih dalam. Saran penulis, untuk mengetahui dugaan kelanjutan Rodgers Creek, penelitian lebih lanjut dapat dilakukan menggunakan metode magnetotellurik di daerah patahan Hayward.

DAFTAR PUSTAKA

- Caldwell, T. G., Bibby, H. M. and Brown, C. (2004) 'The magnetotelluric phase tensor', *Geophysical Journal International*, 158(2), pp. 457–469. doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02281.x.
- Chin John L., Jared R Morrow, C. Robin Ross, and H. E. C. (1993) 'Geologic Maps of Upper Cenozoic Deposits in Central California-USGS_I-1943_1-prnt.pdf'.
- Field, E. H. et al. (2014) 'Uniform California Earthquake Rupture Forecast, version 3 (UCERF3) -The time-independent model', *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(3), pp. 1122–1180. doi: 10.1785/0120130164.
- Grandis, H. (2013) *Metoda Magnetotellurik*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Liopsis, J. L., Smith, E. W. & North, A. R. E. (2007). Geophysical Surveys For Assesings Levee Foundation Conditions, Sacramento River Levees, Sacramento, CA. *US Army Corps Of Engineer, Engineer Research and Development*

Center, Volume ERDC/GSL TR-07-21, p. 11.

- Niasari, S. W. (2015). *Magnetotelluric Investigation of the Sipoholon Geothermal Field, Indonesia*. Berlin: Universitas Berlin.
- Peacock, J.R., Magnetotelluric data from San Pablo bay, California:U.S. Geological Survey data release, <https://doi.org/10.5066/P96T27UM>.
- Ponce, B. D. A., Denton, K. M. and Watt, J. T. (2016) *Marine Magnetic Survey and Onshore Gravity and Magnetic Survey , San Pablo Bay , Northern California*.
- Pranata, E., Irawati, S. M. and Niasari, S. W. (2017) '*Magnetotelluric data analysis using swift skew, bahr skew, polar diagram, and phase tensor: A case study in Yellowstone, US*', *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences: Part A*, 54(3), pp. 311–317.
- Ramadhan, Akram, Lantu, Syamsuddin, Taqodama, I. and Taqodama, I. (2011) *PEMODELAN SISTEM PANAS BUMI BERDASARKAN DATA MAGNETOTELLURIK MODE TE DAN TM*. Bandung.
- Rodi, W. and Mackie, R. L. (2001) '*Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion*', *Geophysics*, 66(1), pp. 174–187. doi: 10.1190/1.1444893.
- Rusmala, G., Rasimeng, S. and Paembonan, A. Y. (2020) '*Identifikasi struktur bawah permukaan berdasarkan data mt (magnetotelluric) : studi kasus di daerah san luis valley, colorado, usa tugas akhir*', pp. 1–8.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. and Sheriff, R. E. (1990) *Applied geophysics. 2nd edition, Applied geophysics. 2nd edition*.
- Vozoff, K. (1990) '*Magnetotellurics:Principle and practice*', *Earth Planet.Sci*, 9(4), pp. 151–154. doi: 10.1258/135626203765947842.
- Watt, J. *et al.* (2016) '*Missing link between the Hayward and Rodgers Creek faults*', *Science Advances*, 2(10), pp. 1–9. doi: 10.1126/sciadv.1601441.
- Wibowo, M. G. A. W. (2013) '*PENDEKATAN INVERSI 1D UNTUK MENGURANGI EFEK GALVANIC PADA MODEL 2D MAGNETOTELLURIK DAERAH PANASBUMI DANAU RANAU*'.
