

Studi Seismik Tomografi Waktu Tempuh Untuk Identifikasi Zona Lemah dengan Menggunakan Konsep Ray Tracing Berdasarkan Algoritma Dijkstra

Wiji Raharjo^{(1,a)*}, Indriati Retno Palupi^(1,b), dan Intan Paramita Haty^(2,c)

⁽¹⁾Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta, Sleman, Yogyakarta, Indonesia, 55283

⁽²⁾ Jurusan Teknik Geologi, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta, Sleman, Yogyakarta, Indonesia, 55283

Email : ^(a*)wiji.raharjo@upnyk.ac.id, ^(b)inder13101986@gmail.com, ^(c)intanparamitahaty@yahoo.com

Diterima (17 Juni 2022), Direvisi (16 Juli 2022)

Abstract. Tomography is a popular method in describing the subsurface based on P and S waves parameter of the seismic wave. It can show the low velocity zone or the weak zone that usually associated with the structure or fluid evidence. However, it needs some informations about the hypocenter and stations location, and the initial velocity model as the geological model. Based on the information, then ray path on each grid/block in the research area is calculated along from the hypocenter to the each station. Ray path concept is based on the Snell Law, Fermat and Huygens principle where the wave will be dispersioned when it faces to the different medium and it will choose the medium with the fastest travel time. Then by the inversion process, the tomogram can be resulted. Dijkstra Algorithm is choosen as the basic mathematical equation for the ray path calculation because it is easy and use in some digital platform. This algorithm is provened can result the good tomogram where it can be showed the structure of the geological model.

Keywords: Tomography, Hypocenter, Weak Zone, Inversion, Dijkstra Algorithm.

Abstrak. Metode Tomografi saat ini banyak digunakan untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan bumi berdasarkan parameter kecepatan gelombang P atau S yang biasa terdapat pada gelombang seismik. Tomografi dapat menggambarkan daerah yang memiliki zona kecepatan rendah atau zona lemah yang biasanya berasosiasi dengan keberadaan struktur atau fluida. Metode ini membutuhkan beberapa informasi seperti lokasi pusat getaran dalam hal ini adalah hiposenter atau pusat gempa, lokasi stasiun pencatat gempa dan inisial model kecepatan yang dianggap sebagai model geologi. Dari informasi tersebut kemudian dihitung *ray path* atau panjang gelombang seismik yang melewati daerah penelitian dari hiposenter ke stasiun. Konsep *ray path* mengacu pada Hukum Snellius, Asas Fermat dan Hukum Huygens, dimana gelombang akan mengalami pembelokan ketika melewati medium dengan kerapatan massa yang berbeda dan gelombang selalu mencari jalan dengan waktu tempuh tercepat yang merupakan sifat alami gelombang untuk kemudian diproses dengan metode inversi dan menghasilkan tomogram. Algoritma Dijkstra dipilih sebagai dasar perhitungan matematika untuk menghitung besarnya *ray path* karena metode ini cukup mudah dan banyak digunakan pada beberapa platform digital saat ini. Dengan menggunakan algoritma ini, terbukti dapat menghasilkan tomogram atau gambaran bawah permukaan bumi yang baik pada model geologi dimana struktur-struktur yang ada pada model geologi terpilih dapat tergambarkan dengan baik.

Kata kunci: Tomografi, Hiposenter, Zona Lemah, Inversi, Algoritma Dijkstra.

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara dengan potensi bencana alam yang cukup besar. Letaknya yang berada di antara lempeng Eurasia, Indo Australia dan Pasifik yang merupakan lempengan yang aktif bergerak menjadikan Indonesia rawan akan bencana gempa bumi dan erupsi gunung berapi. Tercatat beberapa gempa besar pernah terjadi di Indonesia diantaranya gempa Aceh tahun 2004, Yogyakarta tahun 2006 dan yang terbaru adalah gempa Lombok dan Palu pada tahun 2018. Masing-masing gempa tersebut diakibatkan oleh sumber gempa yang berbeda-beda dengan karakteristik yang berbeda pula. Gempa Aceh dengan magnitudo terbesar dan menyebabkan tsunami memiliki lokasi pusat gempa atau hiposenter di zona subduksi yang berada di sebelah barat pulau Sumatera. Sedangkan ketiga gempa lainnya yaitu bersumber dari pergerakan sesar atau patahan seperti sesar Opak di Yogyakarta, sesar Flores di Lombok dan sesar Palu Koro di Palu. Khusus untuk gempa Palu bahkan mengakibatkan tsunami yang disertai dengan peristiwa likuifaksi walaupun mekanisme sumber gempa tersebut yaitu *striks slip* secara keilmuan memiliki probabilitas yang kecil untuk terjadinya tsunami.

Identifikasi sumber-sumber gempa bumi seperti analisa terhadap zona subduksi, patahan, sesar dan kekar menjadi salah satu cara untuk memetakan zona bahaya gempa bumi di suatu wilayah. Identifikasi tersebut bisa didapatkan dari berbagai cara diantaranya dengan mengidentifikasi gambaran bawah permukaan bumi dan deskripsi litologi daerah setempat

menggunakan gelombang seismik. Gelombang seismik membawa berbagai macam parameter yang menggambarkan kondisi bawah permukaan. Parameter tersebut diantaranya adalah Amplitudo yang menggambarkan energi gelombang dan frekuensi yang lebih lanjut dapat digunakan untuk mengenali jenis-jenis gempa bumi yang pada akhirnya dapat digunakan untuk mengetahui kedalaman sumber getaran dan jenis litologinya [1]. Selain itu, terdapat juga metode seismik tomografi yaitu memberikan gambaran bawah permukaan bumi berupa zona-zona lemah yang biasanya berasosiasi dengan zona kecepatan rendah. Metode ini memanfaatkan informasi berupa model kecepatan awal dari daerah penelitian dan juga waktu tempuh gelombang seismik dari hiposenter ke stasiun pencatat gempa.

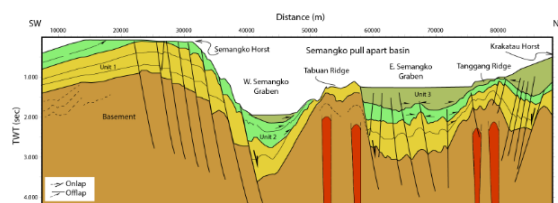
Penelitian ini menggunakan model geologi daerah di sekitar sesar Semangko oleh Susilohadi et al (2009) dalam [2]. Model tersebut menggambarkan struktur dan pengendapan cekungan *pull-apart* Semangko dan Ujung Kulon berdasarkan data-data seismik. Data-data seismik menunjukkan adanya beberapa gambaran diantaranya berupa Horst dan Graben [2]. Kemudian dengan membuat model geologi serupa dan meletakkan beberapa titik yang dianggap sebagai hiposenter dan stasiun pencatat gempa secara *random* serta model kecepatan awal berdasarkan urutan pada Tabel AK 135 [3], [4] peneliti mencoba untuk membuat gambaran model bawah permukaan dengan data *travel time* sintesis. Model akhir adalah berupa zona kecepatan rendah yang berasosiasi dengan zona-zona lemah yang ada di sekitar daerah penelitian. Tujuan dari penelitian ini dapat menghasilkan model geologi bawah

permukaan menggunakan metode tomografi dengan algoritma.

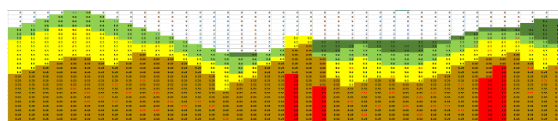
METODOLOGI

Penelitian ini dimulai dengan membuat model geologi berdasarkan Susilohadi et al (2009) dengan inisial model kecepatan Tabel AK 135. Letak hiposenter dan stasiun pencatat gempa dilakukan secara random di sekitar daerah penelitian seperti terlihat pada Gambar 2.

Terdapat 40 hiposenter dan 12 stasiun yang ditempatkan secara *random*. Sementara itu, ukuran grid atau blok yang terdapat pada Gambar 2 diasumsikan berukuran 1 km x 1 km. Pemilihan ukuran grid tersebut didasarkan pada kemudahan perhitungan.



Gambar 1. Gambaran model geologi oleh Susilohadi et al (2009) dalam [2]



Gambar 2. Gambaran Model Geologi berdasarkan Susilohadi (2009) dalam Mukti (2018) [2]. Warna menunjukkan nilai kecepatan P yang digunakan dalam model. Warna hijau tua memiliki nilai kecepatan 5.2 km/s, warna hijau muda memiliki kecepatan 5.8 km/s, warna kuning memiliki kecepatan 6.5 km/s, warna merah memiliki kecepatan 8.05 km/s dan warna merah memiliki kecepatan 2.5 km/s. Letak hiposenter (angka berwarna merah) dan stasiun pencatat gempa (angka berwarna biru di permukaan) ditentukan secara *random*

Metode seismik tomografi waktu tunda menggunakan konsep perhitungan waktu tempuh total dari tiap-tiap hiposenter ke masing-masing stasiun pencatat gempa dengan menggunakan persamaan (1).

$$t = \frac{s}{v} \quad (1)$$

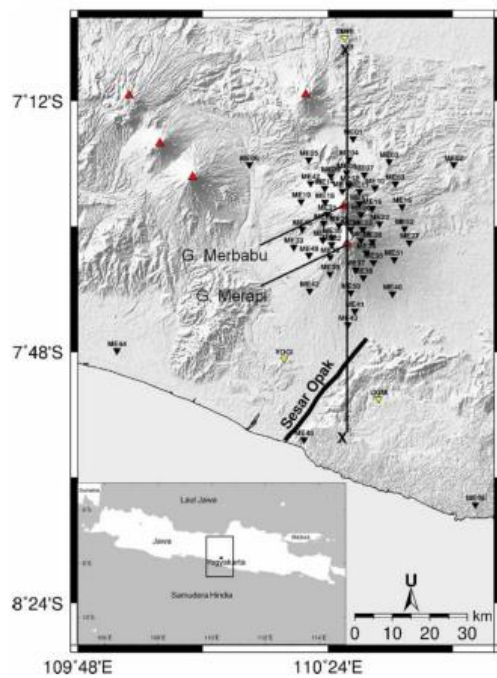
dengan t , s dan v masing-masing adalah waktu tempuh, total jarak antara hiposenter dan stasiun pencatat gempa dan kecepatan medium. Secara fisis jenis medium yang dilewati gelombang gempa dapat mempengaruhi waktu tiba gelombang tersebut dari hiposenter ke stasiun. Medium yang memiliki densitas tinggi akan cenderung memantulkan gelombang yang melewatinya sedangkan medium dengan densitas rendah akan mengabsorpsi energi gelombang sehingga kecepatan gelombang tersebut berkurang. Semakin banyak hiposenter atau stasiun pencatat kegempaan maka akan semakin banyak perhitungan yang dapat dilakukan yang pada akhirnya dapat meningkatkan resolusi hasil tomografi [5].

Penelitian yang dilakukan oleh Ramdhan dkk (2019) menunjukkan gambaran karakteristik magma Gunung Merapi dengan menggunakan tomografi seismik waktu tunda. Penelitian ini menggunakan 464 data gempa yang terjadi di sekitar Gunung Merapi dengan 53 stasiun yang rapat sehingga menghasilkan resolusi yang baik.

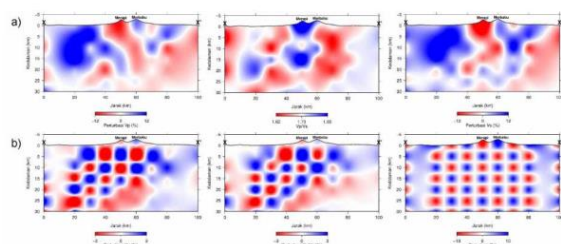
Berdasarkan Gambar 3 diketahui terdapat 53 stasiun yang terdiri dari seismometer jaringan seismik DOMERAPI (segitiga terbalik warna hitam), dan BMKG (segitiga terbalik warna kuning). Sebelum dilakukan proses perhitungan tomografi, terlebih dahulu hiposenter direlokasi untuk

mendapatkan lokasi hiposenter baru yang dekat dengan sumber gempa.

Relokasi hiposenter juga menjadi salah satu upaya untuk meningkatkan resolusi hasil tomografi. Hasil tomografi berupa distribusi gelombang P (Vp), S (Vs) dan Vp/Vs pada penampang berarah utara-selatan yang melewati Gunung Merapi dan Merbabu dapat dilihat pada Gambar 4 [6].

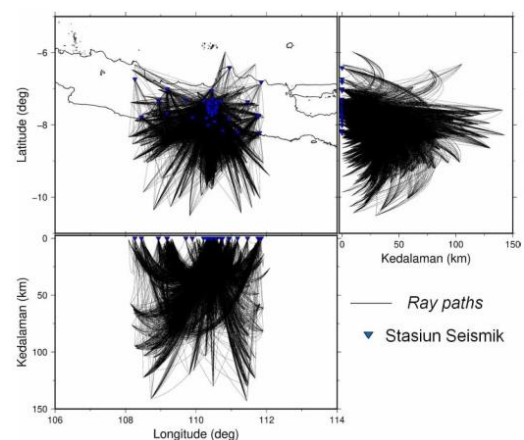


Gambar 3. Stasiun pencatat gempa di sekitar Gunung Merapi [6]



Gambar 4. a) Hasil tomografi Vp (kiri), perbandingan Vp/Vs (tengah) dan Vs (kanan); b) Hasil *Checkerboard test* yang merupakan validasi untuk hasil tomografi yang didapatkan [6]

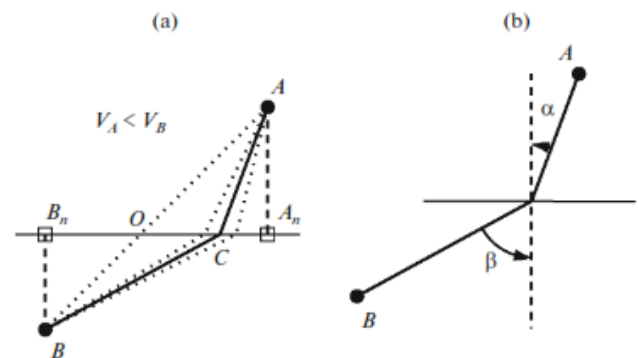
Berdasarkan Gambar 4 a) diketahui bahwa tomografi dapat memberikan gambaran yang cukup baik mengenai persebaran Vp dan Vs di bawah Gunung Merapi. Warna merah menunjukkan nilai Vp dan Vs yang rendah sedangkan warna biru menunjukkan nilai Vp dan Vs yang tinggi. Nilai Vp yang rendah biasanya berasosiasi dengan fluida karena fluida merupakan suatu medium yang memiliki densitas yang cukup rendah. Lebih lanjut ketiganya dapat digunakan untuk mengidentifikasi litologi yang ada di sekitar daerah penelitian dengan melengkapi data berupa nilai tekanan dan suhu. Sedangkan Gambar 4 b) merupakan validasi hasil tomografi dengan menggunakan *checkerboard test* dimana model kecepatan awal dibuat seperti papan catur dengan memberikan presentasi biasanya sekitar +5 % sampai +10% dan -5% sampai -10% pada setiap grid atau bloknya. Jika hasil tomografi menunjukkan pola yang sama (papan catur) di area (grid/blok) yang memiliki banyak *ray paths* gelombang seismik, maka tomografi yang dihasilkan menunjukkan hasil yang baik. Gambaran *ray paths* pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. *Ray paths* di sekitar stasiun DOMERAPI dan BMKG [6]

Secara fisis, gelombang seismik termasuk ke dalam jenis gelombang mekanik, yaitu gelombang yang membutuhkan medium untuk merambat. Gelombang juga akan cenderung melewati medium yang memungkinkannya menempuh waktu terpendek. Pemodelan perambatan gelombang tersebut dalam metode seismik tomografi dikenal sebagai *ray tracing*. Terdapat berbagai metode untuk membuat pola dari *ray tracing* ini yang kesemuanya mengikuti kaidah fisis perambatan gelombang berdasarkan prinsip Huygens dan hukum Snellius. Beberapa ilustrasi dari *ray tracing* ini dapat dilihat pada Gambar 6.

Gambar 6 menunjukkan ilustrasi penjalaran gelombang seismik dari dua medium yaitu medium A dan medium B dimana kecepatan medium A lebih kecil dibandingkan dengan medium B yang berarti bahwa densitas atau kerapatan medium A juga lebih kecil daripada medium B. Berdasarkan Hukum Snellius, ketika gelombang bergerak dari medium yang lebih rapat menuju medium yang kurang rapat, maka gelombang akan dibelokkan menjauhi garis normal (Gambar 6 a) dengan sudut tertentu yang dapat dilihat seperti pada Gambar 6 b [7]. *Ray tracing* selanjutnya dihitung untuk setiap grid dan dibagi dengan model kecepatan awal yang diperoleh dari Tabel AK 135 untuk memperoleh waktu tiba gelombang tersebut dengan menjumlahkannya pada setiap grid/blok yang kemudian dihitung dengan menggunakan persamaan inversi sehingga akan didapatkan hasil akhir tomografi V_p atau V_s .



Gambar 6. Ilustrasi *ray tracing* [7]

Dalam proses inversi, kecepatan merupakan parameter yang akan dimodelkan yang disebut sebagai variabel m , sedangkan variabel jarak merupakan variabel yang akan digunakan dalam proses inversi. Jika keseluruhan jumlah data adalah N , maka persamaan (1) dapat disusun dalam bentuk matrix.

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & 0 \\ 0 & s_{22} & \dots & s_{2M} \\ \vdots & \vdots & \dots & 0 \\ s_{N-1} & 0 & \dots & s_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/v_1 \\ 1/v_2 \\ \vdots \\ 1/v_M \end{bmatrix} \quad (2)$$

dengan M adalah jumlah keseluruhan grid/blok dari area penelitian. Matrix s disebut sebagai matrix Kernell (G) yang berisi tentang jarak *ray path* untuk setiap grid. Tidak semua grid dilewati oleh *ray path* sehingga diberikan angka 0. Sedangkan matrix t merupakan matrix data d . Persamaan (2) selanjutnya dapat ditulis seperti pada persamaan (3)

$$d = Gm \quad (3)$$

Untuk mendapatkan nilai m , dilakukan proses inversi pada persamaan (3) dengan menggunakan persamaan *least square* sehingga didapatkan persamaan inversi seperti pada persamaan (4)

$$m = [G^T G]^{(-1)} G^T d \quad (4)$$

dengan G^T merupakan transpose matrix dari G [8]

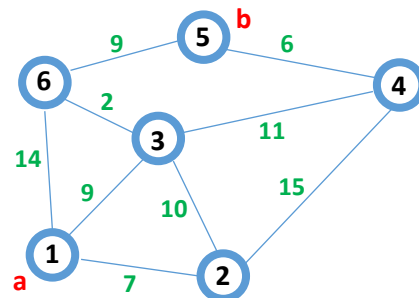
Dalam praktik sebenarnya, *travel time* dapat dieperoleh dengan mengidentifikasi waktu tiba gelombang P dan S dari rekaman seismograf. Untuk itu, penentuan waktu tiba yang presisi dapat menghasilkan tomografi dengan tingkat resolusi yang tinggi. Tetapi bagaimanapun, *ray paths* membawa informasi mengenai kondisi litologi dari medium yang dilewatinya. Untuk mendapatkan hasil yang maksimal, perhitungan inversi dapat dilakukan secara iteratif sehingga hasil tomografi dapat mendekati model bumi yang sesungguhnya [9].

Dari pemaparan diatas, perhitungan *ray tracing* menjadi suatu hal yang penting dalam proses tomografi seismik. Sifat fisis bahwa gelombang cenderung mencari jalan yang memiliki waktu tempuh tercepat dapat dihitung dengan menggunakan algoritma Dijkstra. Algoritma Dijkstra telah banyak digunakan untuk mencari jarak terpendek atau yang memiliki waktu tempuh tercepat dalam berbagai aplikasi, salah satunya *google maps* untuk keperluan rute transportasi. Algoritma Dijkstra sendiri dikembangkan oleh E Dijkstra Oliver pada tahun 1959 [10]. Dijkstra menghitung semua variasi element di antara dua titik (sebut saja titik A dan B). Elemen-elemen tersebut selanjutnya disebut sebagai *vertex* atau *nodes* yang kesemuanya saling terhubung satu sama lain. Semua nodes yang ada kemudian diberikan suatu bobot yang berisikan variabel tertentu seperti jarak, hambatan, dan sebagainya yang akan

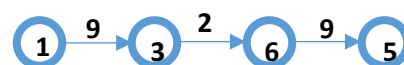
menentukan jarak terpendek yang dapat dilalui dari A ke B [11].

Bobot yang merupakan variabel yang menghubungkan tiap *nodes* dalam algoritma Dijkstra merupakan bilangan yang non negatif. Nilainya tidak harus berupa bilangan bulat sehingga dapat berupa pecahan. Dijkstra menghitung jumlah dari keseluruhan variasi nodes antara titik keberangkatan (A) ke titik tujuan (B) dan kemudian memilih jumlah terkecil sebagai jarak terpendek yang dapat dilalui [12]. Ilustrasi dari algoritma Dijkstra dapat dilihat pada Gambar 7.

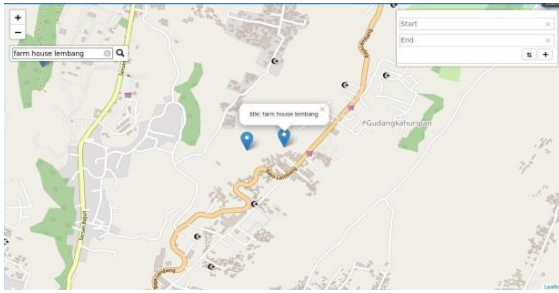
Pada Gambar 7 terdapat 6 *nodes* yang saling berhubungan dan antara satu *node* dan *node* yang lain saling berhubungan dengan bobot tertentu. Dimisalkan seseorang akan menempuh perjalanan dari a ke b yang berarti dari node 1 ke node 5, maka ada beberapa alternatif jalur yang dapat dipilih. Algoritma Dijkstra akan menghitung keseluruhan total bobot dari setiap jalur yang memungkinkan. Pada kasus seperti pada Gambar 7, jarak terpendek dapat ditempuh dengan rute seperti pada Gambar 8.



Gambar 7. Nodes (bulatan) dan bobot yang saling berhubungan [12]



Gambar 8. Jarak terpendek dari kasus pada Gambar 7



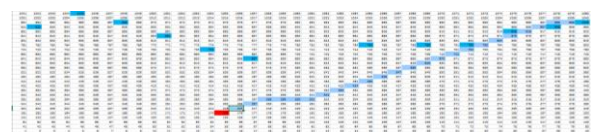
Gambar 10. Algoritma Dijkstra untuk menentukan jarak terpendek tujuan wisata kota Bandung [13]

Jumlah keseluruhan bobot yang dilalui pada Gambar 8 adalah $9+2+9$ atau 20 yang merupakan jumlah bobot terkecil dari semua variasi *nodes* yang ada pada Gambar 7. Selain dapat menghitung rute terpendek, algoritma Dijkstra juga dapat digunakan untuk mengetahui rute terjauh yaitu dengan memilih jumlah bobot yang terbesar diantara semua variasi elemen *nodes* yang digunakan. Salah satu aplikasi algoritma Dijkstra digunakan dalam penelitian yang dilakukan oleh Yuliani dkk [13] dalam menemukan jarak terpendek dari jalur wisata di kota Bandung. Parameter yang digunakan dalam pemberian bobotnya adalah informasi geografis di kota Bandung yaitu letak geografis dari masing-masing tempat wisata tersebut. Kemudian setelah dipilih dua titik yaitu titik keberangkatan dan titik akhir berupa lokasi wisata yang dituju, berdasarkan posisi geografis selanjutnya akan dihitung jarak antara tiap *node* yang mungkin dilalui sehingga didapatkan jarak terpendek yang dapat dilalui [13].

Konsep algoritma Dijkstra kemudian digunakan untuk menemukan jarak terpendek dari hiposenter ke setiap stasiun pencatat gempa. Bobot yang digunakan adalah jarak antar tiap *node* atau jarak antara satu grid/blok ke grid yang lainnya yang

kemudian jumlah bobot terkecil yang akan dipilih sebagai *ray paths* yang kemudian akan menjadi parameter masukan dalam matrix Kernell di proses inversi. Karena bobot yang digunakan hanya jarak antar grid, maka asumsi yang digunakan dalam penelitian ini pada saat proses perhitungan *ray tracing* adalah model geologi yang homogen. Kemudian waktu tiba akan dihitung dengan menjumlahkan *ray tracing* di tiap grid tersebut dengan model kecepatan seperti yang ada di Gambar 2. Salah satu contoh *ray tracing* dengan menggunakan algoritma Dijkstra dapat dilihat pada Gambar 11.

Perhitungan *ray tracing* dengan algoritma Dijkstra, perhitungan waktu tiba sintesis dari hiposenter ke stasiun dan proses inversi sehingga menghasilkan model tomografi seismik dalam penelitian ini seluruhnya dilakukan dengan membuat program dalam bahasa pemrograman Python. Python memiliki modul khusus yang memfasilitasi perhitungan algoritma Dijkstra serta proses inversi yang relatif cepat walaupun dengan jumlah dan ukuran data yang relatif besar serta bahasa pemrogramannya yang relatif mudah.

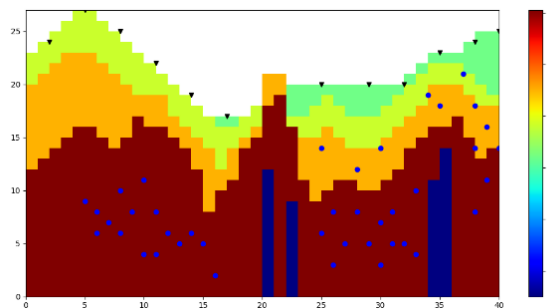


Gambar 11. *Ray tracing* (biru muda) dari hiposenter (merah) ke salah satu stasiun pencatat gempa (biru tua) hasil perhitungan dengan algoritma Dijkstra

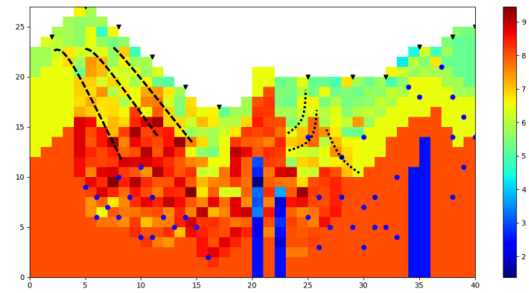
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan model geologi yang dikemukakan oleh Susilohadi (2009) dalam Mukti (2018) [2] dan model inisial awal dari Tabel AK 135, sebanyak 40 hiposenter dan 12 stasiun pencatat gempa ditempatkan secara random seperti yang terlihat pada Gambar 12

Perhitungan *ray tracing* kemudian dilakukan untuk setiap hiposenter ke setiap stasiun pencatat gempa. Pada penelitian ini diasumsikan bahwa hiposenter telah terelokasi dengan baik. Berdasarkan Gambar 12 terlihat bahwa keterangan warna menunjukkan kecepatan gelombang P berdasarkan Tabel AK 135 dalam satuan km/s. Warna biru menunjukkan kecepatan gelombang P yang rendah sedangkan warna merah menunjukkan kecepatan gelombang P yang tinggi.



Gambar 12. Sebaran titik hiposenter (bulatan biru) dan stasiun (segitiga hitam terbalik) ditempatkan secara random pada model geologi



Gambar 13. Hasil Tomografi dari Model Geologi

Kemudian perhitungan *ray path* dilakukan dengan menggunakan Algoritma Dijkstra sehingga diperoleh informasi mengenai grid/blok mana saja yang dilewati dari setiap hiposenter ke setiap stasiun pencatat kegempaan untuk mendapatkan *travel time synthetic*. Bobot yang digunakan untuk perhitungan Algoritma Dijkstra pada penelitian ini adalah jarak antar tiap *node* yang berdekatan. *Travel time synthetic* ini selanjutnya dianggap sebagai waktu kalkulasi. Dalam teori inversi pada Geofisika, selain informasi mengenai waktu kalkulasi juga dibutuhkan informasi mengenai waktu observasi. Untuk mendapatkan waktu observasi, dilakukan penambahan “*noise*” pada waktu kalkulasi dengan menggunakan metode Gaussian *random*. Selanjutnya dilakukan proses inversi dan didapatkan hasil tomografi seperti pada Gambar 13.

Dari 40 hiposenter yang ditempatkan secara acak, 20 diantaranya telah dihitung *travel time* dan telah dilakukan perhitungan inversi. Dapat dilihat bahwa, pada daerah yang telah dilakukan perhitungan inversi didapatkan gambaran tomogram yang berbeda dengan model geologi awal yaitu pada bagian kiri dari Gambar 13. Struktur di bagian kiri tersebut dapat tergambarkan dengan baik yang ditandai oleh adanya garis

putus-putus berwarna hitam. Penarikan struktur didasarkan pada pola tomogram yang dihasilkan. Model geologi yang tadinya bersifat homogen berlapis seperti pada Gambar 12, menampakkan beberapa pola kemenerusan struktur setelah mengalami perhitungan inversi. Sedangkan pada bagian kanan dari Gambar 13, dimana hiposenter pada daerah tersebut belum melalui perhitungan inversi didapatkan hasil yang mirip dengan model geologi awal.

Jika dibandingkan dengan model geologi pada Gambar 1, maka terdapat beberapa kesesuaian pada daerah penelitian yang telah dilakukan perhitungan inversi tomografi. Terdapat beberapa struktur yang bersesuaian diantara keduanya di bagian kiri dan tengah dari model geologi awal walaupun tidak sepenuhnya persis dikarenakan penggunaan dan penempatan data hiposenter dan stasiun yang dilakukan secara random. Penempatan hiposenter yang berada di dekat lokasi sumber gempa seperti patahan perlu lebih diperhatikan sehingga dapat menghasilkan model tomografi yang lebih baik lagi dan lebih sesuai dengan model geologi daerah penelitian.

Untuk menghasilkan gambaran tomografi yang baik juga perlu diperhatikan pemilihan *random noise* yang digunakan untuk menghitung waktu observasi. Pemilihan ini bersifat *trial and error* karena ada beberapa cara atau metode yang dapat digunakan untuk menghitung *random noise*. Pada penelitian ini juga telah didapatkan gambaran tomografi yang baik dengan menggunakan Gaussian *random*. Metode pemilihan *noise* berdasarkan bilangan random bersifat statistik dimana distribusi nilainya memiliki ciri khas tersendiri di tiap perangkat lunak yang digunakan.

KESIMPULAN

Metode tomografi dengan menggunakan algoritma Dijkstra dapat menggambarkan kondisi geologi dengan baik pada model geologi oleh Susilohadi (2009) dalam Mukti (2018) [2]. Kemiripan dengan model awal geologi sebesar 90%. Hasil ini diperoleh dengan penempatan 40 hiposenter dan 12 stasiun pada model geologi yang digunakan, serta penggunaan tabel AK 135 sebagai model kecepatan awal dan Gaussian *random* pada proses perhitungan waktu observasi dapat menghasilkan tomogram yang menunjukkan keberadaan beberapa struktur yang bersesuaian dengan model geologi awal. Algoritma Dijkstra yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan jarak antar *node* untuk mendapatkan jarak dengan waktu tempuh terpendek dari hiposenter ke tiap stasiun pencatat gempa.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim peneliti mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses pembuatan paper ini terutama kepada Bapak Maruf M Mukti dan Bapak Susilohadi sebagai rujukan artikel ilmiah dari model geologi yang kami gunakan untuk membuat model tomografi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Herawati, N. B. Wibowo, and T. F. Niyartama, "Mikrozonasi Multidisaster Daerah Sekitar Waduk Sermo Berbasis Analisis Keputusan Multikriteria Simple Additive Weight (Saw) Berdasarkan Pengukuran

- Mikrotremor,” *J. Dialog Penanggulangan Bencana*, vol. 6, no. 1, pp. 1–11, 2015.
- [2] M. M. Mukti, “Structural Configuration And Depositional History Of The Semangko Pull-Apart Basin In The Southeastern Segment Of Sumatra Fault Zone,” *J. Ris. Geol. dan Pertamb.*, vol. 28, no. 1, pp. 115–128, 2018.
- [3] B. L. N. Kennett, E. R. Engdahl, and R. Buland, “Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times,” *Geophys J Int*, vol. 122, pp. 108–124, 1995.
- [4] B. L. N. Kennett, “Seismological Tables: ak135 (Report),” Canberra, Australia, 2005.
- [5] Reny, A. Taufik, S. Mawaddah, and W. Srigutomo, “Pengaruh Jumlah Shot Terhadap Hasil Penampang Seismik Refraksi Dengan Metode Intercept Time Dan Tomografi Seismik,” 2018.
- [6] M. Ramdhan, S. Kristyawan, A. S. Sembiring, Daryono, and Priyobudi, “Struktur Kecepatan Seismik Di Bawah Gunung Merapi Dan Sekitarnya Berdasarkan Studi Tomografi Seismik Waktu Tempuh,” *J. Ris. Geol. dan Pertamb.*, vol. 29, no. 2, pp. 227–238, 2019.
- [7] I. Y. Chebotareva, “Ray Tracing Methods in Seismic Emission Tomography,” *Phys. Solid Earth*, vol. 54, no. 2, pp. 201–213, 2018.
- [8] V. G. de B. dos Santos and W. M. Figueir, “Seismic Ray Tomography Using L1 Integral Norm,” *Rev. Bras. Geofisica*, vol. 29, no. 2, pp. 347–358, 2011.
- [9] S. K. Suhardja, H. L. Gaol, A. Abdullah, A. D. Nugraha, and Z. Zulfakriza, “Comparison of 3-D Raytracing and Finite Frequency Tomography,” *J. Geosika*, vol. 17, no. 1, pp. 1–9, 2019.
- [10] E. W. Dijkstra, “A note on two problems in connexion with graphs,” *Numer. Math.*, vol. 1, no. 1, pp. 269–271, 1959, doi: 10.1007/BF01386390.
- [11] A. S. ALIJA, “Analysis Of Dijkstra’s And A* Algorithm To Find The Shortest Path (Thesis),” Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, 2015.
- [12] R. D. Gunawan, R. Napianto, R. I. Borman, and I. Hanifah, “Implementation Of Dijkstra’s Algorithm In Determining The Shortest Path (Case Study: Specialist Doctor Search In Bandar Lampung,” *Int. J. Inf. Syst. Comput. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 98–106, 2019.
- [13] S. Yuliani, Rozahi, and E. A. Laksana, “Dijkstra’s Algorithm to Find Shortest Path of Tourist Destination in Bandung,” *Turkish J. Comput. Math. Educ.*, vol. 12, no. 8, pp. 1163–1168, 2021.