

Pemodelan Struktur Kecepatan Seismik Gelombang P (V_p), Kecepatan Seismik Gelombang S (V_s) dan V_p/V_s Pada Daerah Vulkanik Kabupaten Tanggamus Berdasarkan Tomografi Seismik Menggunakan Data *Microearthquake* (Meq) Desember 1992 – Februari 1993

Insanul Kamil ^a, Cahli Suhendi ^b, Suharno ^c

^a Institut Teknologi Sumatera

^b Institut Teknologi Sumatera

^c Universitas Lampung

* E-mail: insaanulkamil@gmail.com

Abstract: *The geological structure of fracture is one of the parameters that control the geothermal system. When a fracture is generate it will produce a small earthquake or commonly known as micro-earthquake. In this research the micro-earthquake data used is the result of a recording that lasts for approximately 2 months in the early exploration phase of the Tanggamus volcanic area. The micro-earthquake data was processed to determine the hypocenter position. Subsequently the earthquake data will be determined the 3-D Model of seismic velocity structure consisting of P wave velocity (V_p), S wave velocity (V_s) and V_p/V_s ratio based on inversion tomography. However, before that the 1-D velocity model used should be localized so that the global 1-D velocity model (ak135) needs to be updated using Velest. Seismic tomography begins with the forward modeling of ray tracing using the pseudo-bending method to calculate the travel time that subsequently becomes an input in the forward modeling process using an iterative damped least square method. The results of the modeling of seismic tomography in the Tanggamus volcanic area indicate the existance of the anomaly from P wave velocity and S wave velocity that relatively lower from the vicinity at a depth of 1.25 km to 2.5 km, UTM-X 450 km to UTM-X 455 km West-East, UTM-Y 9410 km to UTM-Y 9415 km North-South indicated as the reservoir zone. From the data of V_p/V_s ratio gives a relatively higher value about 1.7 to 1.9 which provides information that the reservoir on the volcanic Tanggamus area is water saturated.*

Keywords: *geothermal, micro-earthquakes, inverse modeling, seismic tomography.*

Abstrak: Struktur geologi berupa rekahan merupakan salah satu parameter yang mengontrol sistem panas bumi. Ketika rekahan terbentuk akan menghasilkan gempa kecil atau biasa dikenal sebagai gempa mikro. Pada penelitian ini data gempa mikro yang digunakan merupakan hasil dari perakaman yang berlangsung selama kurang lebih 2 bulan pada tahap eksplorasi awal di daerah vulkanik Kabupaten Tanggamus. Data gempa mikro tersebut diolah untuk menentukan posisi hiposenter. Selanjutnya data gempa tersebut akan ditentukan model struktur kecepatan seismik 3-D yang terdiri dari kecepatan gelombang P (V_p), kecepatan gelombang S (V_s) dan rasio V_p/V_s berdasarkan inversi tomografi. Akan tetapi sebelum itu model kecepatan 1-D yang digunakan harus bersifat lokal sehingga model kecepatan 1-D global (ak135) perlu diperbaharui dengan menggunakan Velest. Tomografi seismik dimulai dengan pemodelan kedepan berupa penjejakan sinar menggunakan metode *pseudo bending* untuk menghitung waktu tempuh kalkulasi yang selanjutnya menjadi *input* dalam proses pemodelan kebelakang menggunakan metode *iterative damped least square*. Hasil dari pemodelan tomografi seismik pada daerah vulkanik Kabupaten Tanggamus menunjukkan adanya anomali kecepatan gelombang P dan kecepatan gelombang S yang relatif lebih rendah dari sekitarnya pada kedalaman 1,25 km hingga 2,5 km, UTM-X 450 km hingga UTM-X 455 km arah Barat-Timur dan UTM-Y 9410 km hingga UTM-Y 9415 km arah Utara-Selatan yang diindikasikan sebagai zona reservoir. Dari data nilai rasio V_p/V_s memberikan nilai yang relatif lebih tinggi sekitar 1,7 hingga 1,9 yang memberikan informasi bahwa reservoir pada daerah vulkanik Kabupaten Tanggamus bersifat *watersaturated*.

Kata Kunci : panas bumi, gempa mikro, pemodelan kebelakang, tomografi seismik.

Pendahuluan

Secara tektonik Indonesia berada pada daerah pertemuan 3 lempeng tektonik besar yang memberikan dampak salah satunya banyak terbentuknya gunung api di Indonesia. Kondisi tersebut memberikan keuntungan di bidang energi panas bumi seperti halnya Tanggamus

vulkanik area yang merupakan lapangan panas bumi yang pada tahun 1992 masih dalam tahapan eksplorasi. Energi panas bumi merupakan energi yang tersimpan dalam bentuk fluida panas pada keadaan geologi tertentu yang terdapat pada kedalaman beberapa kilometer di bawah permukaan bumi yang dapat dijadikan sebagai pembangkit listrik. Eksplorasi panas bumi di daerah vulkanik Kabupaten Tanggamus berlangsung sejak

tahun 1991 hingga tahun 1997. Pada tahun 1992 telah dilakukan eksplorasi panas bumi dengan memanfaatkan perekaman gempa mikro (*Microearthquake* atau MEQ) selama kurang lebih dua bulan dengan jumlah kejadian sebanyak 52 kejadian. Data MEQ akan digunakan untuk mencitrakan struktur kecepatan 3-D gelombang seismik berdasarkan data waktu tiba gelombang di stasiun perekaman. Kecepatan gelombang seismik merupakan salah satu parameter fisis yang sangat baik untuk menggambarkan karakteristik medium bawah permukaan (Suantika, 2008). Maka perlu dilakukannya tomografi seismik untuk mendapatkan persebaran kecepatan gelombang seismik bawah permukaan di sekitar area panas bumi yang nantinya dapat digunakan untuk mengidentifikasi kondisi reservoir suatu area panas bumi.

Kondisi reservoir suatu area panas bumi sangat penting untuk diidentifikasi agar dapat memaksimalkan potensi dan pemanfaatan dari energi panas bumi yang berada di area tersebut (Maulida, 2016). Dengan menganalisis sebaran hiposenter dan kecepatan gelombang seismik bawah permukaan diharapkan dapat membantu dalam proses eksplorasi maupun eksploitasi di bidang panas bumi itu sendiri.

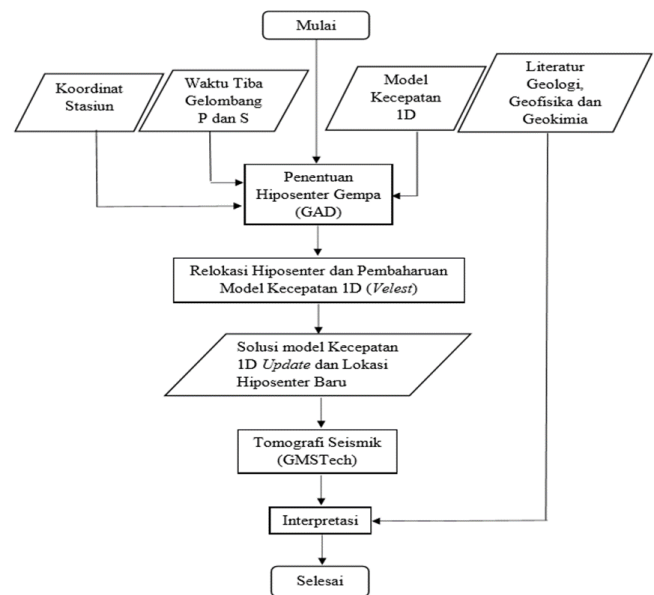
Metodologi

Pada penelitian ini, terdapat beberapa data yang menjadi masukan awal pada tahapan penelitian yang terdiri dari data katalog waktu tiba gelombang P dan gelombang S sebanyak 52 kejadian, koordinat stasiun dengan jumlah stasiun sebanyak 9 stasiun dan model kecepatan 1-D yang didapatkan dari model kecepatan referensi global ak135.

Tabel 1. Model kecepatan 1-D referensi ak 135

Depth (Km)	Vp (Km/s)	Vs (Km/s)
-2.0	5.80	3.46
20.0	5.80	3.46
27.0	6.50	3.85
35.0	6.50	3.85
56.0	8.04	4.48
77.0	8.04	4.49
>77.0	8.05	4.50

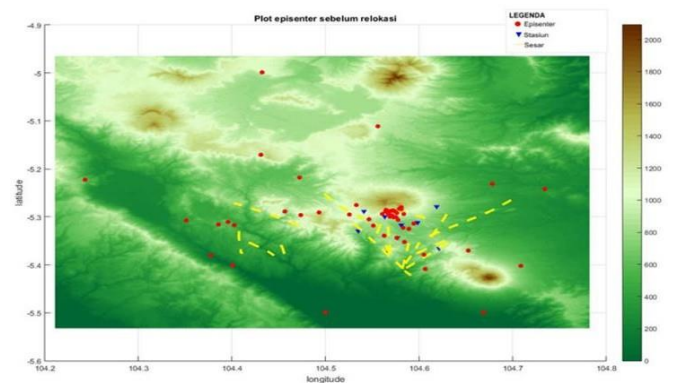
Menurut Suharno dkk (2011) Geologi di daerah vulkanik Kabupaten Tanggamus didominasi oleh produk vulkanik kuarter dan tersier dimana *Alluvium* ditemukan dibagian baratdaya, sedangkan batuan alterasi ditemukan di bagian tengah dan bagian barat daya daerah penelitian. Sebagian besar geologi permukaan telah mengalami pelapukan dan batuan alterasi yang intensitif terjadi di bagian tengah daerah penelitian, yaitu di sekitar Pekon Pagaram.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Hasil dan Pembahasan

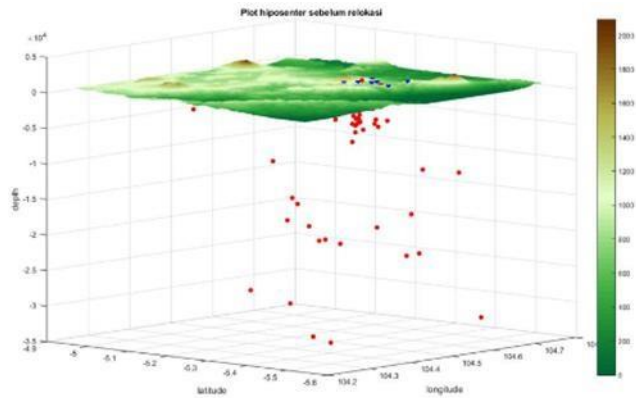
Penentuan hiposenter dilakukan dengan memanfaatkan 52 event gempa yang merupakan data katalog waktu tiba gelombang P dan gelombang S serta koordinat stasiun pengamat yang berjumlah 9 stasiun. Gambar 2 merupakan persebaran episenter gempa mikro pada daerah vulkanik Kabupaten Tanggamus yang dihitung menggunakan metode Geiger.



Gambar 2. Distribusi episenter gempa mikro pada daerah vulkanik Kabupaten Tanggamus menggunakan metode Geiger.

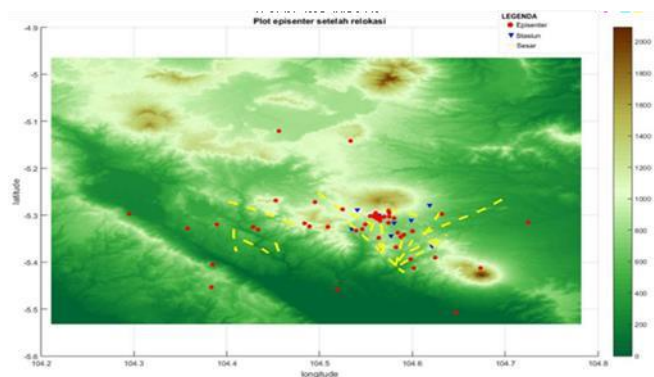
Dari data waktu tiba gelombang P dan S, model kecepatan global, dan koordinat stasiun, dilakukan penentuan hiposenter gempa menggunakan metode Geiger dengan perangkat lunak Geiger Adaptive Damping (GAD) (Nishi, 2005). Posisi hiposenter, distribusi sesar lokal (Suharno, 2013) dan data topografi

selanjutnya diPlot menggunakan MATLAB seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3



Gambar 3. Penampang 3-D distribusi hiposenter gempa mikro pada daerah vulkanik Kabupaten Tanggamus menggunakan metode Geiger.

Berdasarkan hasil penentuan hiposenter dengan menggunakan metode Geiger, didapatkan kedalaman hiposenter dengan posisi hiposenter terdalam berada pada kedalaman 33 km. *Event* gempa yang memiliki kedalaman 33 km tersebut memiliki magnitudo sebesar 1,6. Secara umum, gempa mikro yang terjadi dipengaruhi oleh sesar-sesar lokal yang terdapat di daerah vulkanik Kabupaten Tanggamus yang terlihat dari posisi hiposenter yang secara umum berkumpul di sekitar area sesar lokal. Hal tersebut mengindikasikan adanya rekahan atau zona-zona lemah.

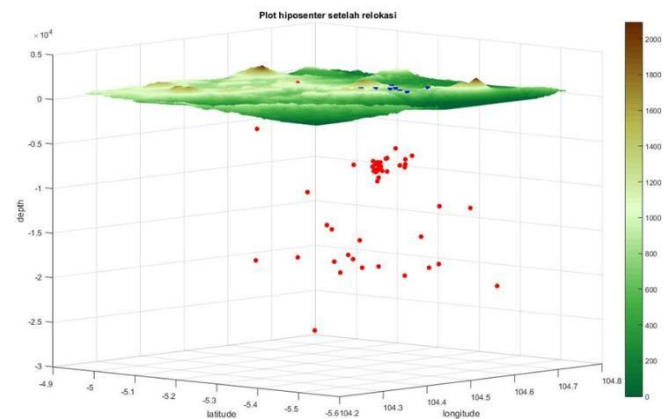


Gambar 4. Distribusi episenter gempa mikro pada daerah vulkanik Kabupaten Tanggamus sesudah relokasi.

Hasil inversi tomografi sangat bergantung dengan model kecepatan awal. Untuk dihasilkan solusi inversi tomografi yang mendekati model sebenarnya maka diperlukan model kecepatan lokal yang dapat dihasilkan dengan memperbaharui model kecepatan global berdasarkan kejadian gempa yang berada di sekitar area penelitian. Untuk itu metode *joint hypocenter determination* (JHD) dengan menggunakan aplikasi

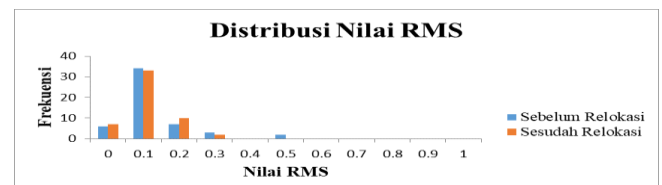
Velest dapat digunakan untuk menghasilkan model kecepatan lokal dengan memperbaharui model kecepatan global yang secara simultan merelokasi hiposenter.

Setelah dilakukan relokasi dan pembaharuan model kecepatan 1-D menggunakan perangkat lunak Velest (Kissling, 1995) selanjutnya dilakukan *Plotting* menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk melihat persebaran hiposenter dan episenter *event* gempa tersebut seperti yang terlihat pada Gambar 4 dan Gambar 5 *Plotting* yang dilakukan juga menggunakan data koordinat sesar lokal beserta topografi daerah vulkanik Kabupaten Tanggamus.



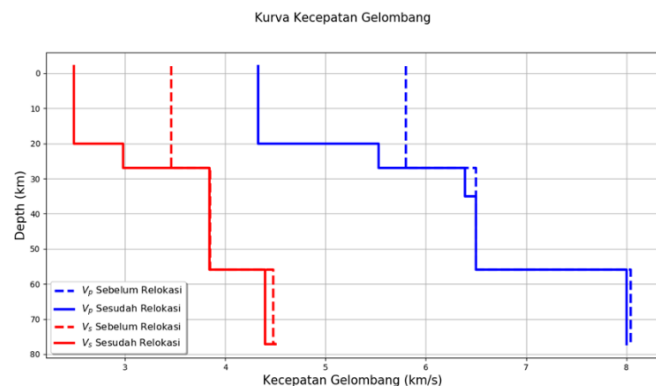
Gambar 5. Penampang 3-D distribusi hiposenter gempa mikro pada daerah vulkanik Kabupaten Tanggamus setelah relokasi.

Berdasarkan hasil relokasi yang dilakukan, terlihat bahwa posisi hiposenter yang didapatkan mengalami perbedaan jika dibandingkan pada saat sebelum dilakukannya relokasi. Terlihat juga bahwa kedalaman hiposenter yang dihasilkan setelah relokasi menjadi lebih dangkal dimana posisi hiposenter yang terdalam hanya berada pada kedalaman 25 km. Jika dilihat dari *cross section* distribusi hiposenter vertikal Barat-Timur maupun vertikal Utara-Selatan, terdapat beberapa *event* yang mengalami peningkatan kedalaman ketika setelah dilakukannya relokasi dimana pada sebelum dilakukannya relokasi, *event-event* tersebut berada pada rentang kedalaman 0 km hingga 0,8 km. Sedangkan ketika setelah dilakukannya relokasi *event-event* tersebut memiliki rentang kedalaman 0,5 km hingga 0,1 km.



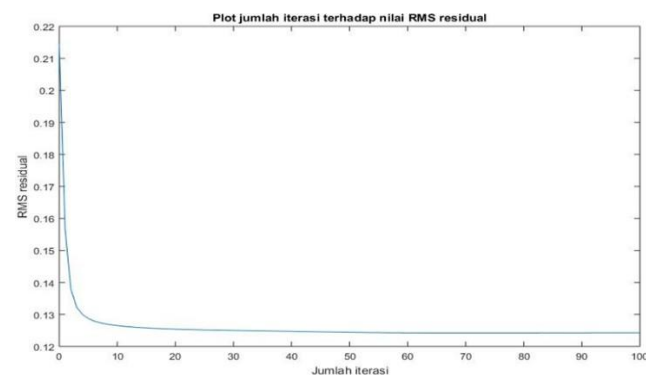
Gambar 6. Distribusi Nilai RMS Residual Error Sebelum dan Sesudah Relokasi.

Berdasarkan Gambar 6 terlihat bahwa terjadi penurunan nilai RMS residual setelah dilakukan relokasi dan pembaharuan model kecepatan 1-D. Sebelum dilakukannya relokasi, nilai RMS memiliki rentang nilai 0 detik hingga 0,5 detik, sedangkan setelah dilakukan relokasi nilai RMS memiliki rentang nilai 0 detik hingga 0,3 detik.



Gambar 7. Kurva kecepatan gelombang P (Vp) dan Gelombang S (Vs) sebelum dan setelah dilakukan relokasi.

Berdasarkan Gambar 7 terlihat perbedaan nilai kecepatan gelombang P (Vp) dan nilai kecepatan gelombang S (Vs) mengalami perbedaan pada saat sebelum dilakukan relokasi dan sesudah dilakukan relokasi. Pembaharuan pada model kecepatan gelombang P dan gelombang S terlihat cukup signifikan pada kedalaman 0 km hingga 20 km dimana pembaharuan kecepatan gelombang P terjadi penurunan sebesar -25% dari nilai awalnya sedangkan pembaharuan kecepatan gelombang S terjadi penurunan sebesar -28% dari nilai awalnya. Pada tahapan relokasi hiposenter dilakukan pembaharuan nilai model kecepatan. Nilai model kecepatan akan mengalami pembaharuan secara iteratif hingga terjadinya kekonvergenan.



Gambar 8. Plot RMS residual terhadap jumlah iterasi pada saat relokasi.

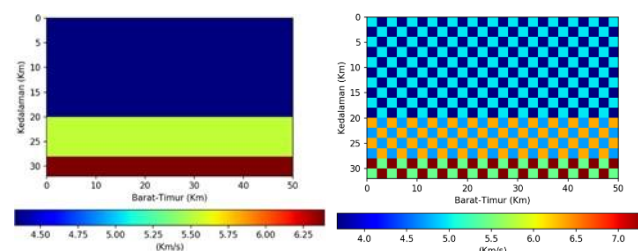
Pada penelitian ini untuk memperbaharui nilai model kecepatan pada saat relokasi hiposenter, parameter iterasi yang diatur sebanyak 100 kali namun setelah iterasi yang ke-6 tidak terjadi perubahan yang signifikan pada nilai RMS residual seperti yang terlihat pada Gambar 8 dimana dapat dilihat bahwa nilai RMS residual sudah konvergen.

Tabel 2. Model kecepatan 1-D daerah vulkanik Kabupaten Tanggamus.

Depth (Km)	Vp (Km/s)	Vs (Km/s)
-2.0	4.33	2.49
20.0	5.53	2.98
27.0	6.39	3.84
35.0	6.50	3.84
56.0	8.00	4.40
77.0	8.00	4.40
>77.0	8.00	4.40

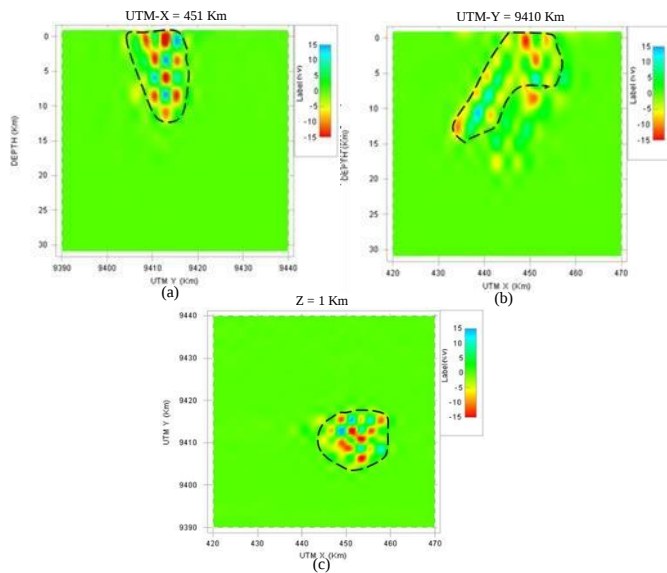
Nilai kecepatan gelombang P (Vp) dan nilai kecepatan gelombang S (Vs) yang telah mengalami pembaharuan seperti yang terlihat pada Tabel 2 yang kemudian akan dijadikan *input* parameter pada saat dilakukan tomografi.

Pada penelitian ini, dilakukan uji resolusi atau yang dikenal dengan *Checkerboard Resolution Test* (CRT) untuk mengetahui blok-blok yang teresolusi dengan baik sehingga dapat mempermudah untuk melakukan interpretasi. Model kecepatan pada CRT yang digunakan pada penelitian ini didapatkan dari hasil perkalian anomali nilai *velocity* awal dengan perturbasi sebesar +15% dan -15% berselang-seling sehingga menyerupai model papan catur.



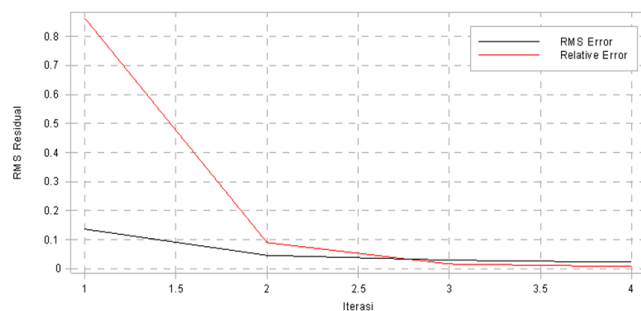
Gambar 9. Model Kecepatan Awal dan Model Kecepatan *Checkerboard Resolution Test*.

Kemudian dilakukan *forward modelling* untuk memperoleh nilai waktu tempuh gelombang P dan gelombang S sintetik. Data waktu tempuh gelombang P dan gelombang S sintetik tersebut kemudian digunakan sebagai data observasi untuk selanjutnya dijadikan masukan pada proses inversi tomografi menggunakan GMSTech (Rohaman dkk, 2017) Akhirnya tomogram yang diperoleh akan menunjukkan pola papan catur pada zona atau area yang teresolusi dengan baik.



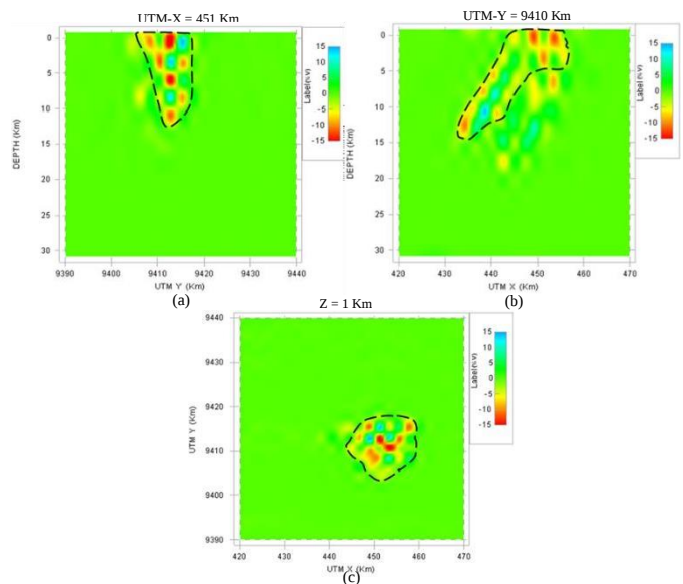
Gambar 10. Tomogram slice (a) vertikal arah Barat-Timur, (b) vertikal arah Utara-Selatan, dan (c) horizontal *checkerboard* gelombang P.

Terlihat pada Gambar 10(a) bahwa blok-blok yang teresolusi dengan baik berada pada rentang UTM-Y 9405 km hingga UTM-Y 9420 km dan pada kedalaman 0 km hingga 12 km. Terlihat juga pada Gambar 10(b) bahwa blok-blok yang teresolusi dengan baik berada pada rentang UTM-X 430 km hingga UTM-X 455 km dan pada kedalaman 0 km hingga 15 km. Pada Gambar 10(c) memperlihatkan blok-blok yang teresolusi dengan baik berada pada rentang UTM-X 442 km hingga UTM-X 460 km dan UTM-Y 9402 km hingga UTM-Y 9418 km pada kedalaman 1 km. Blok-blok yang teresolusi dengan baik merupakan blok-blok yang dilalui oleh banyak sinar.



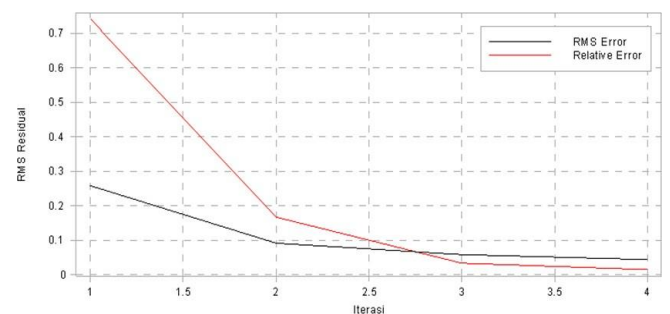
Gambar 11. Plot nilai RMS error terhadap jumlah iterasi pada proses *checkerboard* gelombang P.

Pada proses inversi yang dilakukan, nilai RMS *error* yang dihasilkan pada iterasi pertama sebesar 0,13 detik. Proses iterasi dalam inversi yang dilakukan berhenti pada nilai RMS *error* sebesar 0,02 detik yang diperlihatkan oleh Gambar 11 dimana nilai RMS *error* sudah konvergen pada nilai 0,02 detik.



Gambar 12. Tomogram slice (a) vertikal arah Barat-Timur, (b) vertikal arah Utara-Selatan, dan (c) horizontal *checkerboard* gelombang S.

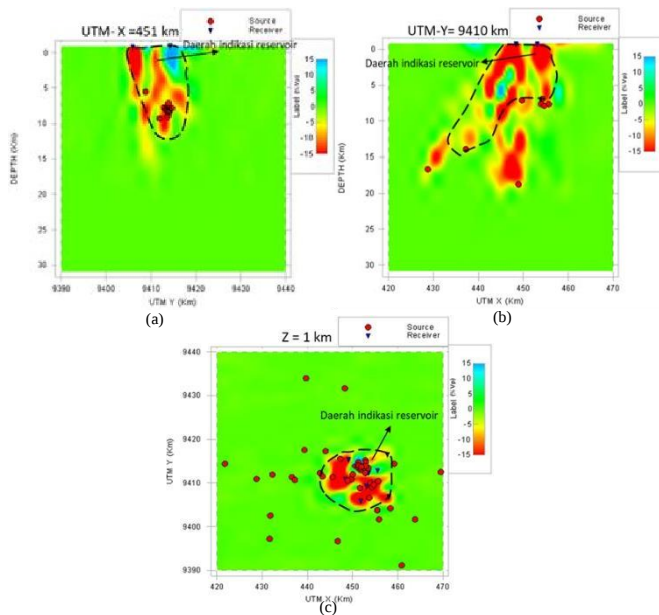
Uji resolusi juga dilakukan dengan memanfaatkan data gelombang S dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 12. Terlihat pada Gambar 12(a) bahwa blok-blok yang teresolusi dengan baik berada pada rentang UTM-Y 9405 km hingga UTM-Y 9420 km. Terlihat juga pada Gambar 12(b) bahwa blok-blok yang teresolusi dengan baik berada pada rentang UTM-X 430 km hingga UTM-X 455 km. Gambar 12(c) memperlihatkan blok-blok yang teresolusi dengan baik berada pada rentang UTM-X 445 km hingga UTM-X 460 km dan UTM-Y 9402 km hingga UTM-Y 9418 km pada kedalaman 1 km. Dapat terlihat pada Gambar 12 bahwa daerah yang teresolusi berdasarkan hasil CRT yang memanfaatkan data gelombang P dengan hasil CRT yang memanfaatkan data gelombang S relatif sama.



Gambar 13. Plot nilai RMS error terhadap jumlah iterasi pada proses *checkerboard* gelombang S.

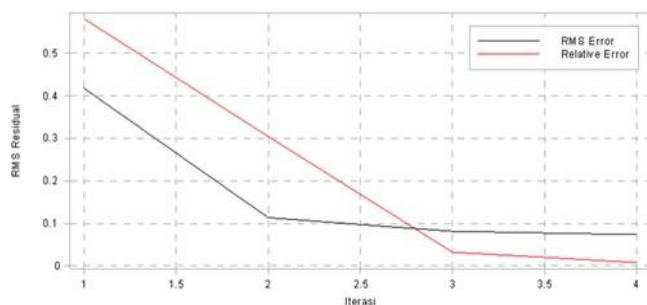
Pada proses inversi yang dilakukan, nilai RMS *error* yang dihasilkan pada iterasi pertama sebesar 0,26 detik. Proses iterasi dalam inversi yang dilakukan berhenti pada nilai RMS *error* sebesar 0,05 detik yang

diperlihatkan oleh Gambar 13 dimana nilai *RMS error* sudah konvergen pada nilai 0,05 detik.



Gambar 14. Tomogram slice (a) vertikal arah Barat-Timur, (b) vertikal arah Utara-Selatan, dan (c) horizontal inversi tomografi gelombang P.

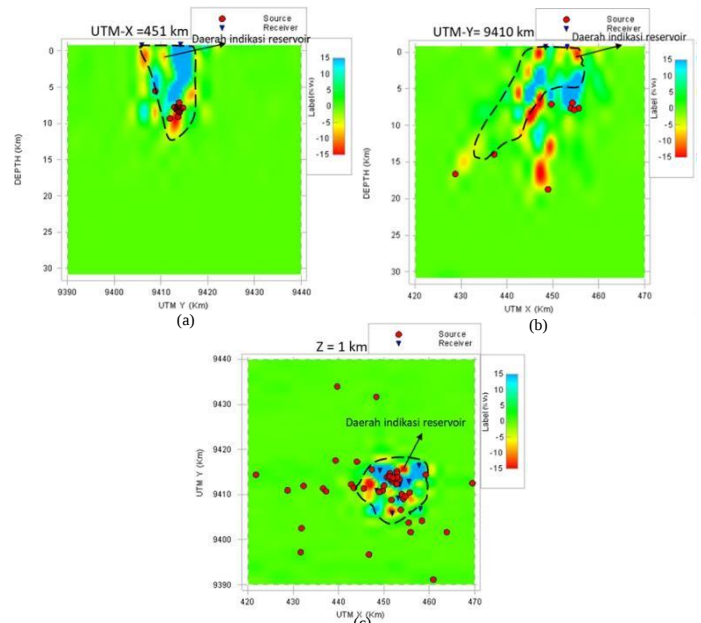
Dari hasil inversi tomografi struktur kecepatan gelombang P, anomali kecepatan rendah sangat mendominasi dan muncul pada elevasi +1 km di atas MSL hingga -10 km, namun yang menjadi target pada penelitian ini adalah daerah-daerah pada kedalaman 0 hingga 2,5 km yang diindikasikan sebagai daerah reservoir. Selain itu daerah tersebut juga teresolusi dengan baik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14 ditandai oleh garis putus-putus. Anomali kecepatan rendah ini berkisar antara -5% hingga -15 % yang relatif lebih rendah dibandingkan daerah sekitarnya.



Gambar 15. Plot nilai *RMS error* terhadap jumlah iterasi pada proses inversi tomografi gelombang P.

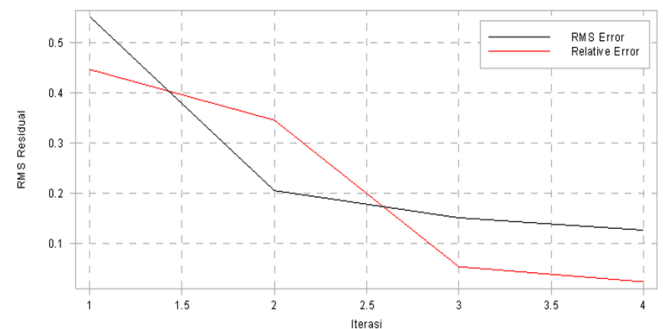
Dari proses inversi yang dilakukan pada data lapangan untuk menentukan model struktur kecepatan gelombang P, nilai *RMS error* yang dihasilkan pada iterasi pertama sebesar 0,42 detik. Proses iterasi dalam inversi

yang dilakukan berhenti pada nilai *RMS error* sebesar 0,08 detik yang terlihat pada Gambar 15 dimana nilai *RMS error* yang dihasilkan sudah konvergen pada nilai 0,08 detik.



Gambar 16. Tomogram slice (a) vertikal arah Barat-Timur, (b) vertikal arah Utara-Selatan, dan (c) horizontal inversi tomografi gelombang S.

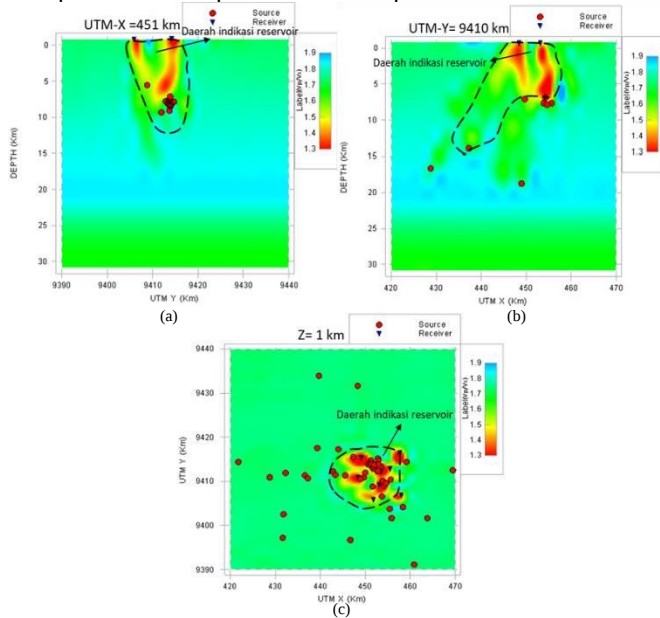
Berdasarkan hasil inversi tomografi pada struktur kecepatan gelombang S, anomali kecepatan tinggi cukup mendominasi dan muncul pada elevasi +1 km di atas MSL hingga -8 km dan terdapat juga daerah-daerah yang memiliki anomali kecepatan rendah yang muncul pada kedalaman 0 km hingga 13 km. Anomali kecepatan tinggi yang terlihat dari hasil tomogram berkisar antara +10% hingga +15% yang relatif lebih tinggi dibandingkan di daerah sekitarnya, sedangkan anomali kecepatan rendah yang terlihat berkisar antara -5% hingga -15% yang relatif lebih rendah dibandingkan daerah di sekitarnya seperti yang terlihat pada Gambar 16.



Gambar 17. Plot nilai *RMS error* terhadap jumlah iterasi pada proses inversi tomografi gelombang S.

Daerah yang menjadi fokus pada penelitian ini berada pada kedalaman 0 km hingga 2,5 km yang diindikasikan sebagai daerah yang mengandung reservoir dan secara umum daerah tersebut juga masih termasuk ke dalam daerah yang memiliki resolusi yang baik.

Berdasarkan hasil proses inversi yang dilakukan pada data lapangan untuk menentukan struktur kecepatan gelombang S, nilai *RMS error* yang dihasilkan pada iterasi pertama sebesar 0,54 detik. Terlihat pada Gambar 17 yang menunjukkan nilai *RMS error* sudah mencapai titik konvergen pada nilai *RMS error* akhir sebesar 0,12 detik dan proses iterasi pada inversi ini pun diberhentikan.



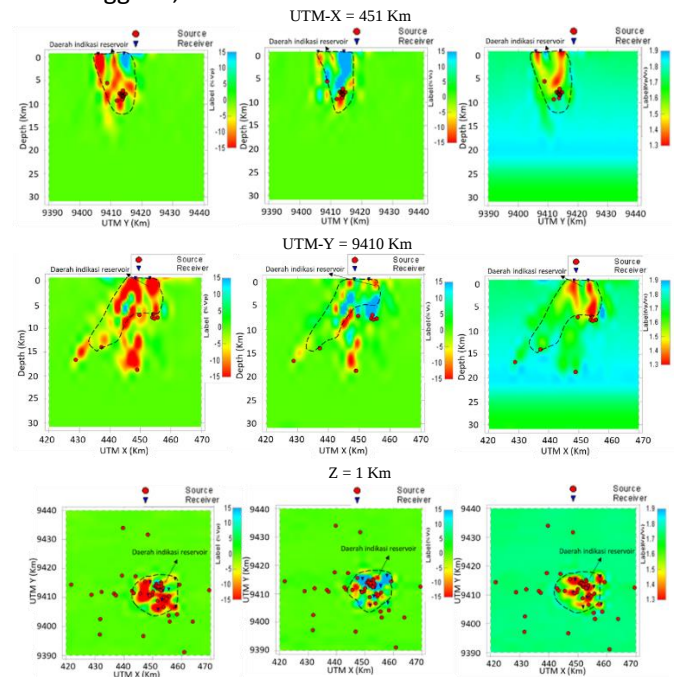
Gambar 18. Tomogram slice (a) vertikal arah Barat-Timur, (b) vertikal arah Utara-Selatan, dan (c) horizontal inversi tomografi Vp/Vs.

Dari hasil proses inversi yang dilakukan pada data lapangan untuk menentukan model struktur kecepatan gelombang P dan juga model struktur kecepatan gelombang S, maka selanjutnya dilakukan perhitungan nilai rasio Vp/Vs. Nilai rasio Vp/Vs didapatkan dari hasil pembagian antara model struktur kecepatan gelombang P dengan model struktur kecepatan gelombang S.

Berdasarkan tomogram Vp/Vs yang ditunjukkan pada Gambar 18 terdapat anomali Vp/Vs rendah yang cukup mendominasi dengan rentang nilai 1,6 hingga 1,3 pada elevasi +1 km di atas MSL hingga -8 km dan juga terdapat anomali Vp/Vs tinggi yang berada pada elevasi +1 km di atas MSL hingga -10 km dengan rentang nilai 1,7 hingga 1,9 seperti pada struktur kecepatan gelombang P dan struktur kecepatan gelombang S, nilai Vp/Vs yang didapatkan terfokus pada kedalaman 0 km yang menjadi daerah terindikasi adanya reservoir.

Pada Gambar 18 juga terlihat daerah yang teresolusi dengan baik yang ditandai dengan garis hitam putus-putus.

Berdasarkan hasil inversi tomografi, anomali kecepatan rendah muncul pada elevasi +1 km di atas MSL hingga -10 km dengan nilai perturbasi berkisar antara -5% hingga -15% pada struktur kecepatan gelombang P dan struktur kecepatan gelombang S. Begitu pula dengan anomali rendah yang terdapat pada nilai rasio Vp/Vs dengan rentang nilai antara 1,6 hingga 1,3 dan terdapat pada elevasi +1 km di atas MSL hingga -8 km. Sedangkan anomali kecepatan tinggi muncul pada elevasi +1 km di atas MSL hingga -8 km dengan nilai perturbasi berkisar antara +10% hingga +15% pada struktur kecepatan gelombang P dan stuktur kecepatan gelombang S serta terdapat juga anomali tinggi pada nilai rasio Vp/Vs yaitu berkisar antara 1,7 hingga 1,9 pada elevasi +1 km di atas MSL hingga -2,5 km.



Gambar 19. Tomogram slice vertikal arah Barat-Timur, vertikal arah Utara-Selatan, dan horizontal inversi tomografi Vp, Vs dan rasio Vp/Vs.

Di dalam sistem panas bumi, keberadaan zona yang memiliki temperatur tinggi di lapisan bawah permukaan akan memberikan pengaruh yang bervariasi terhadap nilai kecepatan gelombang P (V_p) dan kecepatan gelombang S (V_s). Dalam keadaan *gas saturated rock* nilai kecepatan gelombang P dan kecepatan gelombang S akan mengalami penurunan, dimana nilai kecepatan gelombang P akan lebih mengalami penurunan secara

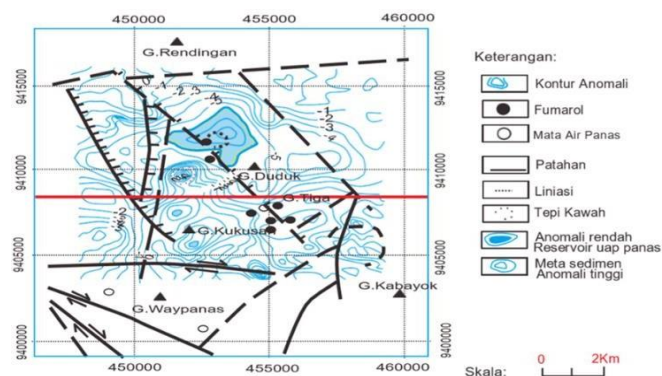
signifikan dibandingkan nilai kecepatan gelombang S sehingga nilai rasio V_p/V_s yang dihasilkan akan relatif lebih rendah (Wang dkk, 1990).

Tabel 3. Pola Anomali V_p , V_s , V_p/V_s (Natania dkk, 2018).

No.	V_p	V_s	V_p/V_s	Interpretasi
1	Rendah	Rendah	Rendah	Zona saturasi uap
2	Rendah	Rendah	Tinggi	Zona saturasi air
3	Tinggi	Tinggi	Rendah	Clay cap
4	Rendah	Tinggi	Rendah	Bidang retakan

Sedangkan pada keadaan *water saturated rock* nilai kecepatan gelombang P dan kecepatan gelombang S akan mengalami penurunan, dimana penurunan pada nilai kecepatan gelombang P relatif lebih rendah dibandingkan dengan penurunan pada nilai kecepatan gelombang S sehingga nilai rasio V_p/V_s yang dihasilkan akan relatif tinggi (Wang dkk, 1990). Penjelasan pola anomali lainnya dapat dilihat pada Tabel 3 dimana tabel interpretasi terhadap pola anomali mengacu pada penelitian Londolo dan Sudo (2002), Gunasekera dkk. (2003) dan Wang dkk. (1990).

Berdasarkan penjelasan tersebut maka pada kedalaman 0 km hingga 2,5 km dimana terdapat penurunan pada nilai perturbasi kecepatan gelombang P dan gelombang S sebesar -5% hingga -15 % dan nilai rasio V_p/V_s yang relatif tinggi yaitu sebesar 1,7 hingga 1,9 maka dapat diinterpretasikan sebagai zona yang berasosiasi dengan *water saturated rock*. Lapisan anomali yang berupa batuan yang tersaturasi oleh air tersebut dapat diindikasikan sebagai reservoir pada daerah vulkanik Kabupaten Tanggamus. Penelitian sebelumnya yang didasarkan pada data geokimia menyatakan bahwa reservoir pada area penelitian termasuk ke dalam reservoir dominasi air (Yorinaldi, 2000). Lapisan yang diindikasikan sebagai zona reservoir ini berada pada UTM-X 450 km hingga UTM-X 455 km arah Barat-Timur dan UTM-Y 9410 km hingga UTM-Y 9415 km arah Utara-Selatan dengan kedalaman 0 km hingga 2,5 km dari MSL.



Gambar 20. Peta deliniasi reservoir pada daerah vulkanik Kabupaten Tanggamus berdasarkan data *magnetotelluric* (Panjaitan, 2010).

Dugaan tentang reservoir tersebut sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa reservoir pada daerah vulkanik Kabupaten Tanggamus berada pada UTM-X 451 km hingga UTM-X 454 km arah Barat-Timur dan UTM-Y 9410 km hingga UTM-Y 9414 km arah Utara-Selatan dengan kedalaman 1,25 hingga 2,5 km dari MSL yang terlihat pada Gambar 20. Sedangkan adanya anomali tinggi pada kecepatan gelombang S dan diikuti oleh anomali rendah pada kecepatan gelombang P dan nilai rasio V_p/V_s untuk di sekitar daerah reservoir dapat diidentifikasi sebagai bidang retakan.

Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil penentuan posisi hiposenter persebaran lokasi *event* gempa mikro pada daerah vulkanik Kabupaten Tanggamus terdapat di sekitar sesar-sesar lokal yang mengindikasikan bahwa salah satu penyebab gempa mikro berasal dari aktivitas sesar-sesar lokal.
2. Setelah dilakukannya relokasi hiposenter yang secara simultan juga memperbaharui model kecepatan 1-D menunjukkan adanya perbedaan posisi hiposenter dimana posisi hiposenter terdalam menjadi lebih dangkal dan beberapa hiposenter yang mengumpul menjadi lebih dalam setelah dilakukannya relokasi, begitu juga dengan model kecepatan dimana terlihat perbedaan yang cukup signifikan pada kedalaman kurang dari 20km setelah dilakukannya perbaharuan model kecepatan 1-D.
3. Didapatkan lapisan dengan anomali kecepatan yang relatif lebih rendah pada gelombang P dan gelombang S dan anomali nilai rasio yang relatif lebih tinggi pada kedalaman 0 km hingga 2,5 km, UTM-X 450 km hingga UTM-X 455 km arah Barat-Timur dan UTM-Y 9410 km hingga UTM-Y 9415 km arah Utara-Selatan yang diindikasikan sebagai zona reservoir bersifat *water saturated*. Terdapat juga anomali kecepatan yang relatif tinggi pada kecepatan gelombang S di area yang sama yang diduga sebagai bidang retakan.

Ucapan Terimakasih

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas berkah rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan penelitian ini. Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing Bapak Prof. Drs. Ir. Suharno, Ph.D., IPU., ASEAN.Eng dan Bapak Cahli Suhendi, S.Si., M.T serta semua pihak yang terlibat yang tidak mungkin penulis sebutkan satu persatu yang telah memberikan arahan dan bimbingan selama ini.

Daftar Pustaka

- Gunasekara, R.C., Foulger, G.R., dan Julian, B.R., "Reservoir depletion at The Geysers geothermal area, California, shown by fourdimensional seismic tomography," J. Geophys. Res., Vol. 109, No. B3, 2134, 2003.
- Kissling, E., "Program Velest User's Guide Short Introduction," Institute of Geophysics. ETH Zuerich. Zurich, 1995.
- Londono, J.M, dan Sudo, Y., "Velocity structure and a seismic model for Nevado del Ruiz Volcano (Colombia)," J. Volcano. Geotherm. Res. 119, 61-87, 2002.
- Maulida, N. H., "Inversi Tomografi dan Sebaran Poisson's Ratio Gempa Mikro Pada Lapangan Panas bumi Brady's Hot Spring, Nevada," skripsi. Fakultas Teknik Universitas Lampung. Bandar Lampung, 2016.
- Natania, K. A., Sahara, D. P., Nugraha, A.D dan Ramadhan, I., "Aplikasi Metode Tomografi Double Difference Untuk Menentukan Struktur Kecepatan Gelombang Seismik 3D Lapangan Panas Bumi GoLF," Jurnal Geofisika Vol.16, No. 01 pp. 27-33, 2018.
- Nishi, K., "Hypocenter Calculation Software GAD (Geiger's method with Adaptive Damping)" GAD Manual Guide, 2005.
- Panjaitan, S., "Geologi Daerah Panas Bumi Ulubelu Tanggamus, Lampung Utara Berdasarkan Analisis Metode Magnetotellurik (MT)," JSDG Vol. 20 No. 2, 2010.
- Rohaman, M., Suhendi, C., Ry, Rexha V., Prabowo, Billy S, Widiyantoro, S., Nugraha, Andri D., Yudistira, T., Mujihardi, B., "The Preliminary Results of GMSTech: A Software Development for Microseismic Characterization," IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2017.
- Suantika, G. Puspasari, Trevi J. dan Widiyantoro, S., "Pencitraan Tomografi Atenuasi Seismik Tiga-Dimensi Gunung Guntur Menggunakan Metode Rasio Spektra," ISSN 1411-3082. Bandung, 2008.
- Suharno, "Eksplorasi Geothermal," Bandar Lampung: Penerbit Lembaga Penelitian Universitas Lampung, 2013.
- Suharno, Wahyudi dan Mulyatno, B.S., "Sistem Sesar dan Litologi Sekitar Sistem Panasbumi Ulubelu," Bandar Lampung: Asosiasi Panas bumi Indonesia (API), 2011.
- Wang,Z., M.L. Batze, dan A. M. Nur., "Effect of different pore fluids on seismic velocities in rock," Can. J. Explor. Geophys., Vol. 26 NOS. 1 & 2, hal 104-112, 1990.
- Yorinaldi, Mulyadi, Wintolo, D dan Utami, P., "Model Tentatif Daerah Prospek Panasbumi Ulubelu Kabupaten Lampung Selatan, Propinsi Lampung Berdasarkan Data Magnetotelluric dan DC- Resistivity," Proceeding of Indonesian Association of Geologists, Bandung, 2000.