



Analisis Mekanisme Sumber Gempa Mikro di Lapangan Panas Bumi Wayang Windu, Kecamatan Pangalengan, Kabupaten Bandung, Jawa Barat untuk Prediksi Zona Permeabilitas

Rhamadhana Sultan^{1*}, Ruhmi Sulaehani²

¹ Program Studi Teknik Sistem Energi, Fakultas Teknologi dan Produksi Industri, Institut Teknologi Bacharuddin Jusuf Habibie, Parepare 91122, Indonesia.

² Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi dan Produksi Industri, Institut Teknologi Bacharuddin Jusuf Habibie, Parepare 91122, Indonesia.

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i2.1806>

Article Info:

Received : 24 April 2026
Revised : 30 April 2026
Accepted : 08 Mei 2026
Published : 13 Mei 2026

Correspondence:

Rhamadhana Sultan

Phone: +6282215217768

Abstract: Microearthquakes in producing geothermal fields, such as the Wayang Windu geothermal field, are valuable for monitoring subsurface and reservoir conditions. This study analyzes micro seismic data recorded by seismometer stations to determine focal mechanisms and fault orientations, aiming to predict permeability zones. Moment tensor inversion was performed using the ISOLA program (MATLAB-GUI), applying a linear least-squares method based on Green's functions and P-wave arrival times from three-component seismometers. Reliable inversion results are indicated by variance reduction values approaching unity. The results reveal both double-couple (DC) and non-DC components, including Compensated Linear Vector Dipole (CLVD) mechanisms. Non-DC sources are associated with fluid injection and increased pore pressure, while DC components indicate shear faulting. Focal mechanism solutions (beach ball diagrams) show that faults in the production area are predominantly oblique, with dips ranging from 30° to 90°, whereas the injection area is dominated by reverse faults with dips of 20° to 85°. These findings suggest that permeability zones are present in both production and injection areas, as supported by hypocenter distribution and fault orientations. Fluid movement is interpreted to trend northward, with permeability enhancement linked to fluid injection that elevates pore pressure and promotes fracture opening.

Keywords: Micro Earthquakes; Focal Mechanism; Double-Couple; Non-Dc; Moment Tensor; Permeability.

Citation: Sultan, R., & Ruhmi, S. (2026). Analisis Mekanisme Sumber Gempa Mikro di Lapangan Panas Bumi Wayang Windu, Kecamatan Pangalengan, Kabupaten Bandung, Jawa Barat untuk Prediksi Zona Permeabilitas. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(2), 1264–1272. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i2.1806>

Pendahuluan

Lapangan panas bumi Wayang Windu berada sekitar 40 km sebelah selatan kota Bandung, Jawa Barat. Pembangunan Wayang Windu Unit 1 (113,5MW) selesai pada 1999, sejak 2000 telah berproduksi dengan kapasitas penuh dan mencapai ketersediaan listrik rata-rata lebih dari 98%. Pada masa awal pengoperasiannya, Wayang Windu Unit 1 merupakan turbin geothermal terbesar di dunia. Pada 2 Maret 2009, Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral (ESDM) meresmikan

pengoperasian Wayang Windu Unit 2 yang memiliki kapasitas turbin tunggal sebesar 117 MW (starenergygeothermal, 2020). Lokasi penelitian merupakan lapangan panas bumi Wayang Windu yang berada di Kecamatan Pangalengan, Kabupaten Bandung, Jawa Barat dengan letak geografis berada pada 107°34'00" – 107°40'00" BT dan 7°07'00" – 7°15'00" LS. Lapangan panas bumi Wayang Windu berada di daerah kubah lava kecil yaitu gunung Wayang dan Gunung Windu dimana menurut Hochstein dan

Sudarman (2008) belum pernah terjadi erupsi pada gunung Wayang dan gunung Windu.

Wilayah Prospek Panas Bumi di Daerah Wayang-Windu terkonsentrasi di timur daerah penelitian. Konsentrasi ini berada di sekitar Gunung Wayang-Windu, Bedil, Gambung, Puncak Besar, dan Kaldera Malabar. Terdapat pula beberapa konsentrasi tidak dominan di selatan dan tenggara daerah penelitian. Meskipun konsentrasi ini tidak dominan dan tidak terdapat manifestasi mata air panas, wilayah ini tetap masuk dalam bagian dari wilayah prospek karena dapat dijadikan sebagai zona *recharge* air panas bumi di daerah Wayang-Windu (Pramadhani, F., Rokhmatulloh, & Supriatna, 2021). Manifestasi lapangan panas bumi Wayang Windu keluar melalui rekahan-rekahan terbuka akibat struktur geologi. Sebagian besar mata air

panas berjenis air bikarbonat dengan pH netral dengan kandungan asam sulfat 5% - 65% dan memiliki temperatur hingga 66°C. Fumarola kaya akan sulfat dengan pH 1,6 s.d. 2,77 dan temperatur 56°C hingga 93°C (Abrenica dkk, 2010). Manifestasi ini dapat ditemukan di beberapa tempat, antara lain Kawah Wayang pada 107°38'13,5" BT dan 7°12'22,9" LS, Kawah Burung 2 pada 107°38'8,32" BT dan 7°9'50" LS, serta Kawah Burung 3 berada pada 107°38'8,05" BT dan 7°9'54,18" LS (Oktaviany, 2017). Menurut Purnanto dan Purwakusumah (2015) bahwa tinjauan eksplorasi awal dari berbagai sumber yaitu oleh Hochstein dan Sudarman (2008), Bogie dkk. (2008), dan Mulyadi dan Ashat (2011) menunjukkan bahwa survei geologi, geokimia dan geofisika awal telah dilakukan oleh Pertamina pada tahun 1981.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Berdasarkan struktur regional di lapangan panas bumi Wayang Windu di sebelah selatan memiliki pola sesar dengan dip yang curam ($>80^\circ$) dan strike dari 30° - 40° , dan 330° - 340° . Lokasi sumur berada di struktur yang *permeable* dengan mengikuti tren regional 40° . Struktur di lapangan panas bumi wayang windu memiliki kecenderungan yang serupa dengan sesar regional, maka kemungkinan struktur-struktur yang berada di lapangan adalah sesar mendatar (*strike-slip fault*). Sesar *strike-slip* cenderung memiliki permeabilitas yang lebih rendah dibanding sesar normal (Bogie dkk., 2008).

Lapangan Wayang Windu merupakan zona peralihan antara sistem yang didominasi air dan sistem yang didominasi uap (Bogie dkk., 2008 dalam Amalia,

2017). Ke arah selatan, ketebalan sistem dominasi uap semakin berkurang dan posisinya semakin dalam. Berdasarkan kajian mineralogi, zona dominasi uap tersebut terbentuk dari reservoir yang awalnya didominasi air pada kedalaman sekitar 1700 meter (Amalia, 2017). Analisis nilai temperatur dari data temperatur terukur sumur dapat mengindikasikan keberadaan zona reservoir pada sumur produksi (Arrizki, 2017).

Lapangan panas bumi ini telah dieksploitasi sehingga dampak dari eksplorasi adalah terjadi gempa mikro disekitar lapangan akibat aktivitas produksi maupun injeksi. Gempa mikro yang terjadi selama masa produksi dan injeksi digunakan untuk pemantauan

lapangan panas bumi seperti untuk mengetahui kondisi aktual di reservoir. Untuk mengetahui perubahan kondisi reservoir dilakukan pemantauan aktivitas gempa mikro dengan metode mekanisme sumber gempa. Mekanisme sumber gempa dilakukan untuk mengetahui penyebab terjadinya gempa mikro dan kaitannya dengan kondisi reservoir terkini dengan adanya penurunan produksi akibat eksploitasi secara terus-menerus (Sultan, 2018).

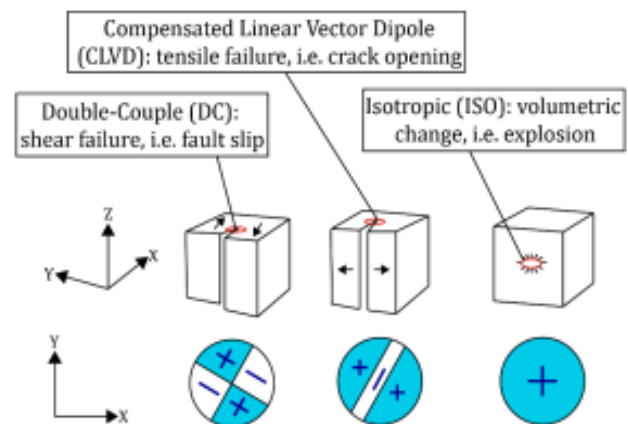
Lapangan panas bumi Wayang Windu hingga saat ini masih berproduksi dan pemantauan mikroseismik masih terus dilakukan sehingga perlu dilakukan penelitian secara berkelanjutan mengenai perkembangan dari kondisi reservoir di WKP menggunakan metode mekanisme sumber gempa. Menurut Bogie dkk. (2008), reservoir bagian selatan memiliki struktur yang satu pola dengan struktur regional. Struktur regional berjenis sesar geser yang memiliki permeabilitas lebih rendah dari sesar normal. Reservoir bagian utara memiliki sesar normal. Permeabilitas di reservoir dalam berasosiasi dengan kombinasi sesar dengan kontak batuan intrusi sedangkan reservoir dangkal berkorelasi dengan sesar yang terlihat di permukaan (UGI, 2002 dalam Vilanti, 2015). Permeabilitas reservoir terdistribusi secara diskrit dan tidak menerus di zona patahan (Vilanti, 2015).

Gempa bumi paling dapat dijelaskan oleh momen tensor DC yang mewakili gaya yang setara dengan sesar geser (*shear faulting*) pada patahan planar dalam media isotropik. Namun, beberapa penelitian mengungkapkan bahwa sumber seismik juga dapat dijelaskan oleh *moment tensor non double-couple (non-DC)*. Menurut Julian et al., (1998) dan Miller et al (1998) non-DC dapat menunjukkan bagian-bagian *strain volumetric* (dilatasi atau kompaksi) dalam mekanisme patahan. Komponen non-DC dapat dikaitkan dengan sumber akibat aktivitas eksploitasi komersil seperti pada produksi yaitu misalnya runtuhnya rongga pada area tambang (Rudajev & Šílený, 1985; Šílený & Milev, 2006), pada saat injeksi yang menyebabkan terjadinya tegangan tarik (*tensile faulting*) pada area geotermal atau vulkanik (Ross et al., 1996; Julian et al., 1997), akibat shear faulting pada sesar non-planar (Sipkin, 1986), atau pada sesar yang memiliki kemiringan (*slip*) yang menyebabkan adanya pembukaan (Vavryčuk, 2001, 2011).

Inversi momen tensor menggunakan metode *full-waveform* dimana data terekam oleh semua komponen

pada tiap stasiun seismometer dan dilakukan inversi untuk menghitung seismik momen tensor. Data terdiri dari kontribusi dari sumber dan penjalaran dimana efek penjalaran dapat dihilangkan dengan memodelkan propagasi gelombang seismik antara sumber dan lokasi penerima seakurat mungkin dengan menghasilkan fungsi green. Fungsi green adalah respon perpindahan yang terekam di penerima ketika gaya impuls atau fungsi momen diterapkan pada posisi sumber di bumi sebagai respon medium (Eyre et al., 2015).

Mekanisme fokus atau solusi bidang patahan menggambarkan orientasi dari fault dan slip pada patahan relatif terhadap sistem koordinat geografis. Mekanisme fokal adalah parameter yang paling penting untuk menentukan setelah lokasi dan besar magnitude diketahui dan digunakan untuk menentukan geometri aktual dari patahan serta menyimpulkan gaya sesar dan *rezim stress* suatu wilayah tertentu (Havskov, Ottemoller, 2010).

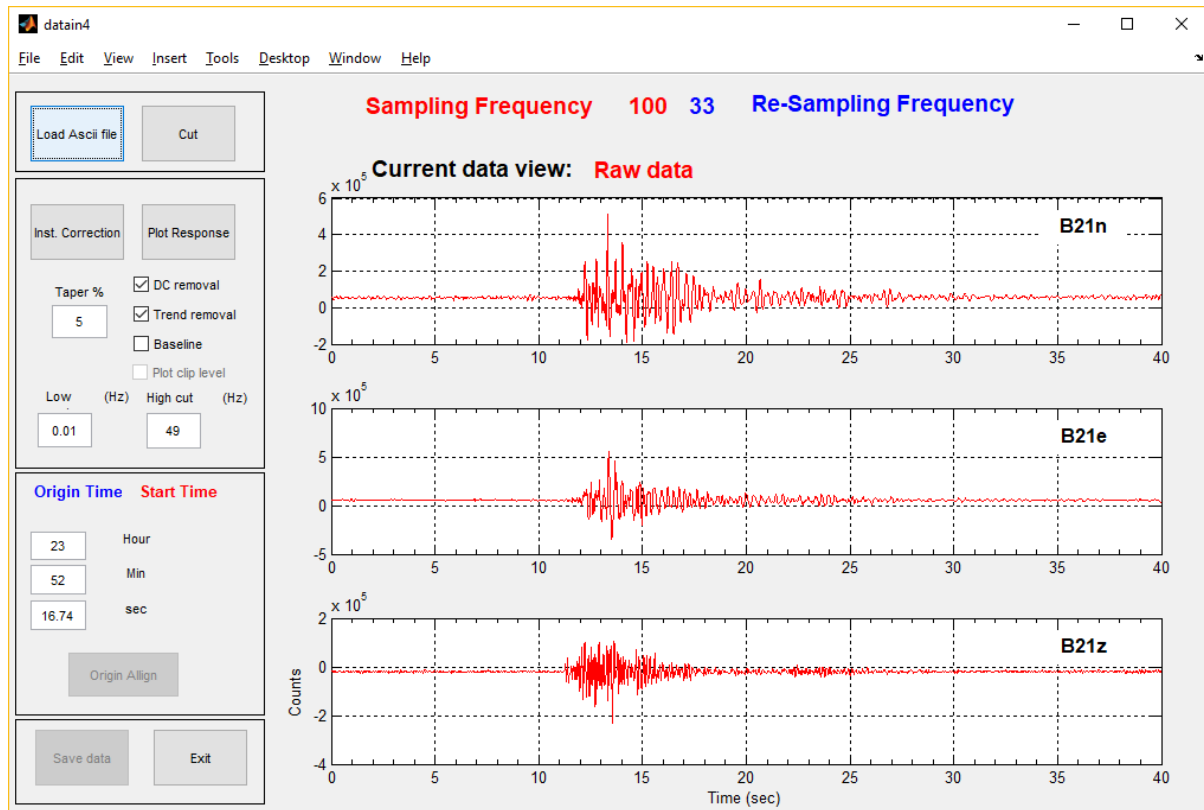


Gambar 2. Mekanisme patahan yang direpresentasikan oleh diagram bola fokus (adaptasi oleh Baig and Urbancic, 2010)

Metode

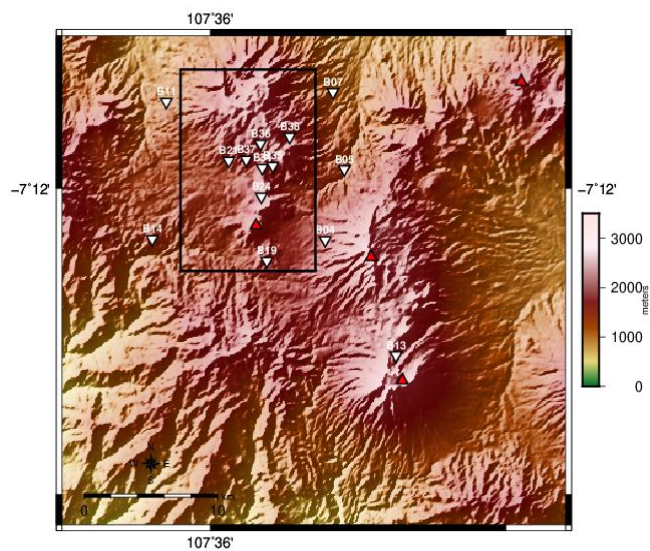
Lapangan panas bumi Wayang Windu telah melakukan pemantauan mikroseismik menggunakan data dari aktivitas gempa mikro yang terjadi selama masa eksploitasi. Pemantauan tersebut bertujuan untuk mengetahui kondisi aktual di reservoir.

Data yang diperoleh berupa raw data berformat *mseed* yang perlu diubah menjadi format *sac* untuk dapat dilakukan pengolahan data pada *software* ISOLA-GUI (Gambar 3).



Gambar 3. Contoh preparation data

Lokasi stasiun perekaman disekitar WKP (Gambar 4) merupakan seismometer berjenis *broad band* yaitu Sensor *Nanometrics Trillium Compact*. Jenis seismometer tersebut diperlukan untuk koreksi instrumen dengan membuat file *pole* dan *zero* untuk digunakan pada saat pengolahan data.

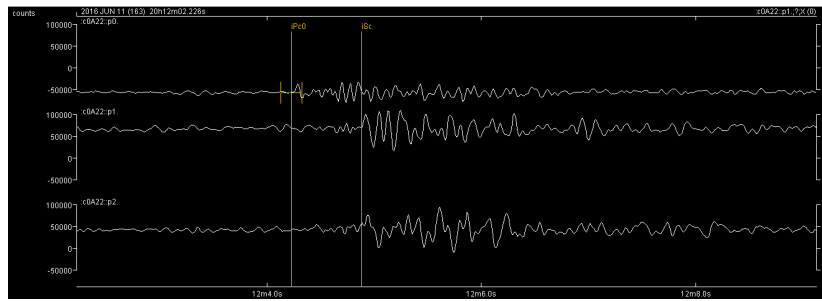


Gambar 4. Lokasi stasiun perekaman dengan simbol segitiga putih adalah titik stasiun perekaman.

ISOLA-GUI digunakan untuk menjelaskan mekanisme fokal dari momen tensor gempa sehingga dapat diketahui nilai eigen dan vektor eigen. Vektor eigen menghasilkan nilai strike, di dan rake sedangkan nilai eigen menghasilkan besaran momen M_0 dan dekomposisi momen tensor menjadi tiga bagian yaitu *double-couple* (DC), *Compensated Linear Vector Dipole* (CLVD), dan *Voluminial* (VOL) yang merupakan komponen dari *full-moment tensor*.

Data yang dianalisis pada penelitian ini merupakan data gempa mikro yang terekam pada tanggal 1 Januari hingga 30 Juni 2016 dengan jumlah seismometer yang dipasang di lapangan panas bumi Wayang Windu sebanyak 15 seismometer. Data yang diperoleh berasal GFZ dan *Star Energy* yaitu berupa data mentah *full-waveform* 3 komponen.

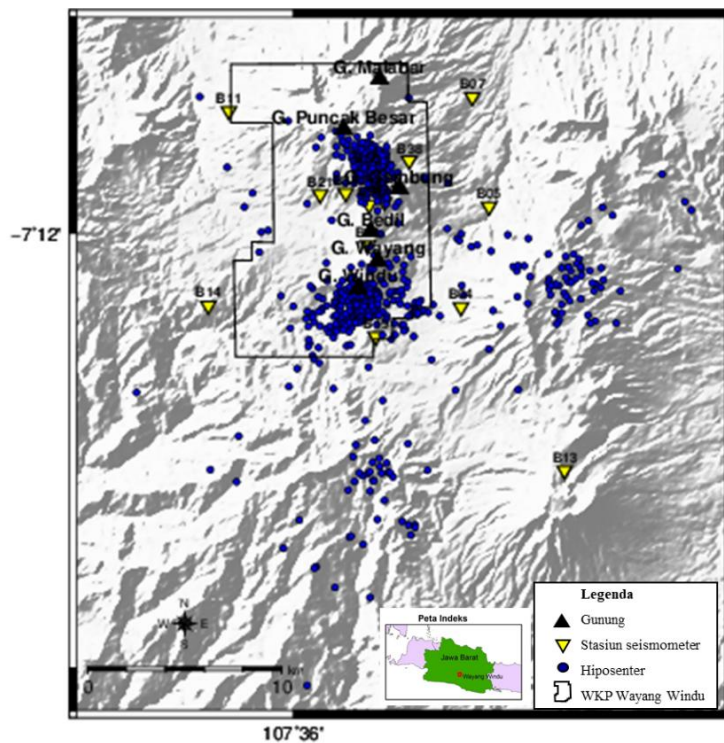
Tahapan dalam pengolahan data adalah mengidentifikasi event yaitu *picking* gelombang primer dan gelombang sekunder pada perangkat lunak SeisGram2K80 untuk menentukan lokasi hiposenter kemudian dilakukan penentuan mekanisme sumber gempa (*Focal Mechanism*) menggunakan program ISOLA pada MATLAB-GUI dengan metode inversi momen tensor *full-waveform*. Jarak hiposenter dihitung berdasarkan posisi hiposenter yang telah didapatkan dan kecepatan gelombang P (V_p) (Hidayati, 2011).



Gambar 5. Contoh picking gelombang P dan S pada SeisGram2K

Distribusi hiposenter dari gempa mikro pada wkp wayang windu diperoleh sebanyak 744 event yang tersebar disekitar areaWKP Wayang Windu dan juga tersebar di luar batas WKP (Gambar 4). Hiposenter yang tersebar di sekitar area wkp wayang windu memiliki

pola dimana hiposenter tersebar terpusat di area produksi bagian utara dan area injeksi bagian selatan. Distribusi lokasi hiposenter berdasarkan kedalaman dominan berada pada kedalaman yang dangkal yaitu rata-rata berada pada kedalaman 2 – 3 km dpl.



Gambar 6. Peta distribusi lokasi hiposenter pada WKP Wayang Windu

Dari lokasi hiposenter tersebut juga digunakan untuk memilih event untuk dilakukan analisis mekanisme sumber gempanya. Pemilihan event untuk analisis mekanisme sumber didasarkan pada beberapa parameter yaitu salah satunya berdasarkan letak hiposenter yang dekat dekan struktur dan lokasi sumur di dua kluster yaitu pada area produksi dan injeksi. Parameter lainnya adalah berdasarkan kedalaman hiposenter yang apabila dilakukan *cross section* berdasarkan kedalaman maka terlihat suatu pola pada hiposenter sebelah selatan yaitu sebaran hiposenter yang semakin dangkal kearah utara (lihat Gambar 5). Berdasarkan parameter-parameter tersebut maka event

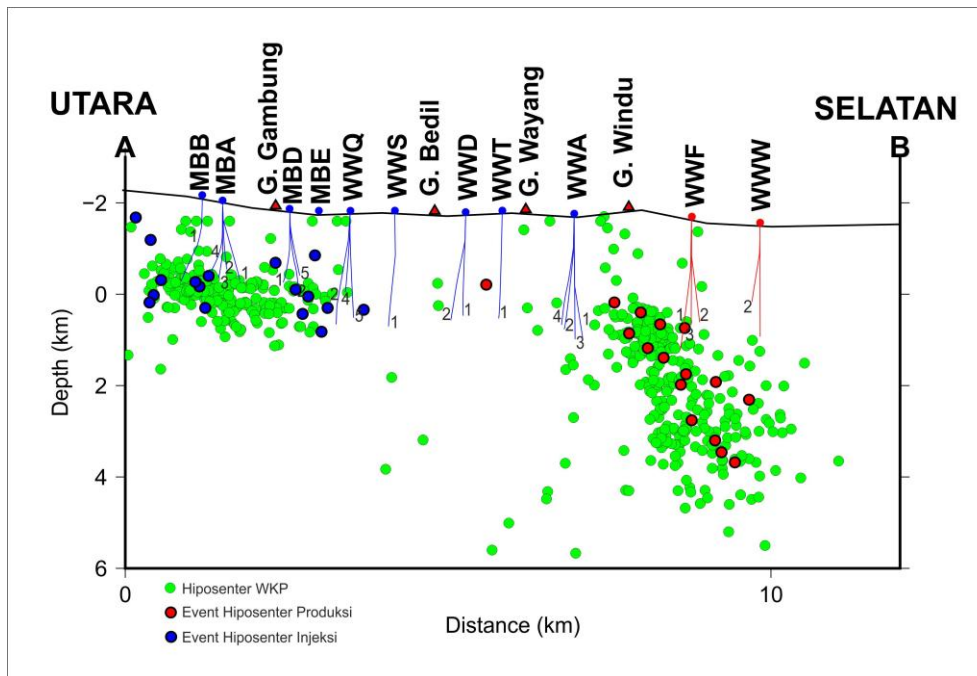
yang digunakan untuk analisis mekanisme sumber berjumlah 34 event.

Mekanisme fokus (*focal mechanism*) dan momen tensor (*moment tensor*), yang dikenal sebagai mekanisme sumber gempa, mampu menggambarkan karakteristik patahan serta arah pergeseran relatif terhadap sistem koordinat geografis. Penentuan mekanisme ini merupakan parameter yang paling penting setelah diperoleh informasi mengenai lokasi (episenter) dan kekuatan (magnitudo) gempa (Handayani, 2025).

Penentuan mekanisme sumber gempa dilakukan dengan metode inversi moment tensor menggunakan data seismik *full-waveform*. *Software* yang digunakan

untuk menentukan mekanisme sumber adalah *ISOLated Asperities* atau ISOLA (<http://seismo.geology.upatras.gr>) yang menggunakan data *seismic full-waveform* sebagai data input awal.

Inversi momen tensor merupakan metode untuk menentukan karakteristik sumber gempa berdasarkan data gelombang yang direkam dengan memanfaatkan model struktur Bumi (Jinyin Hu, 2023).



Gambar 7. Distribusi hiposenter berdasarkan kedalaman dari penampang AB

Hasil dari inversi momen tensor pada ISOLA berupa nilai orientasi bidang patahan (*strike, dip, dan rake*) yang dapat ditampilkan dalam bentuk bola fokus dan komponen DC, ISO, dan CLVD sebagai tipe sumber penyebab terjadinya gempa dan adanya perubahan volum akibat fluida.

**Hasil dan Diskusi
Inversi Momen Tensor**

Berdasarkan distribusi hiposenter, zona dengan permeabilitas tinggi teridentifikasi berada di bagian utara dan selatan WKP Wayang Windu. Kedua zona tersebut berkaitan langsung dengan aktivitas produksi dan injeksi fluida panas bumi. Area utara didominasi oleh aktivitas produksi sehingga menunjukkan konsentrasi kejadian mikroseismik yang cukup tinggi. Sementara itu, area selatan berasosiasi dengan aktivitas injeksi yang juga memicu munculnya sebaran hiposenter. Pola distribusi hiposenter menunjukkan adanya jalur rekahan yang berperan sebagai media aliran fluida di dalam reservoir. Keberadaan rekahan tersebut mengindikasikan tingkat permeabilitas yang baik pada kedua area tersebut. Berdasarkan pusat persebarannya, distribusi hiposenter kemudian dibagi menjadi dua kluster utama. Kluster pertama berada di area produksi bagian utara, sedangkan kluster kedua berada di area injeksi bagian selatan. Pengelompokan ini

dilakukan untuk mempermudah interpretasi karakteristik reservoir panas bumi di masing-masing zona. Dengan adanya pembagian kluster tersebut, hubungan antara aktivitas operasional dan respons mikroseismik reservoir dapat dianalisis secara lebih detail.

Pada solusi momen tensor diperoleh nilai berupa *strike, dip, rake* sebagai penggambaran dari orientasi bidang patahan, dan persentase komponen DC dan Non-DC (ISO dan CLVD) sebagai penggambaran untuk mengetahui tipe sumber gempa yang terjadi. Hasil dari inversi momen tensor adalah solusi momen tensor yang dapat ditampilkan dengan diagram bola fokus dan diagram tipe sumber oleh Hudson (1989) dengan representasi dari nilai orientasi bidang patahan dan nilai momen tensor. Hasil dari pemetaan event mikroseismik pada kedua diagram tersebut dapat menunjukkan zona permeabilitas dan penyebab terbentuknya area yang permeabel sebagai parameter untuk mengkarakterisasi zona permeabilitas.

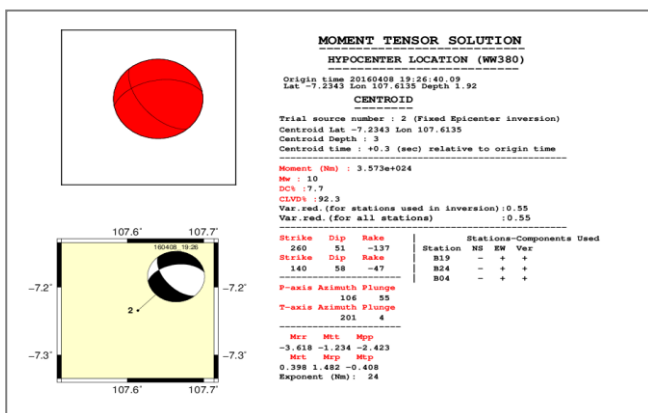
Penggambaran beach ball diperoleh dari hasil inversi dari 6 komponen momen tensor. Hasil dari tahap inversi menghasilkan solusi momen tensor berupa nilai *strike, dip, dan rake* serta nilai 6 momen tensor yang direpresentasi oleh komponen DC, ISO, dan CLVD. Solusi momen tensor kemudian diplot hingga menghasilkan tampilan mekanisme fokus gempa

berupa diagram bola fokus yang menggambarkan orientasi / arah gerak patahan dan mekanisme sumber.

Tabel 1. Nilai hasil inversi momen tensor

No	Event	Strike	Dip	Rake	ISO	DC	CLVD	VR
1	5	109	18	98	35.1	18.8	46.1	47
2	13	20	85	-176	4.4	90.6	5.1	40
3	15	57	32	-87	34.2	44.0	21.2	54
4	30	236	47	149	47.2	30.6	22.2	20
5	59	280	64	-50	13.0	74.7	12.3	36
6	83	341	88	173	9.0	81.0	10.0	17
7	92	31	36	-44	6.9	59.6	33.5	32
8	98	264	48	68	4.8	72.1	23.1	57
9	108	71	27	165	35.9	12.1	52.1	24
10	111	249	33	-57	7.9	21.9	70.3	45
11	112	236	33	-152	0.7	71.5	27.8	84
12	134	268	84	170	15.3	45.6	39.1	48
13	196	131	67	147	50.5	28.9	20.6	72
14	200	249	58	24	22.1	59.7	18.2	50
15	215	59	68	148	33.3	37.6	29.0	20
16	275	129	62	-11	5.6	65.0	29.4	75
17	277	171	88	-155	30.4	17.4	52.3	38
18	291	18	36	-22	56.8	27.8	15.4	60
19	337	164	21	138	48.3	33.9	17.8	53
20	380	260	51	-137	51.5	7.7	40.8	55
21	394	116	72	169	51.9	33.8	14.3	26
22	401	89	47	84	28.2	30.1	41.8	56
23	447	121	62	149	62.3	11.0	26.7	23
24	463	9	90	171	5.4	89.0	5.6	40
25	471	124	69	-32	35.3	41.2	23.5	66
26	517	327	86	-111	26.8	42.9	30.3	21
27	582	347	77	-125	28.7	31.5	39.7	51
28	611	125	69	-13	24.7	48.7	26.6	64
29	643	240	85	24	40.6	38.2	21.2	52
30	671	163	85	175	2.8	96.4	0.8	66
31	676	258	56	-9	22.1	55.5	22.4	59
32	684	150	88	180	0.3	98.7	1.0	38
33	733	239	38	-126	12.7	63.8	23.6	42
34	734	65	72	85	66.5	20.6	12.9	75

Pada tahap ini juga dapat dilihat nilai VR yang menunjukkan kecocokan gelombang observasi dan sintesis yang mereprestasikan akurasi hasil inversi. Gambar 6. merupakan hasil inversi momen tensor event 380 berupa plot solusi momen tensor berupa display bola fokus dari parameter-parameter momen tensor yaitu *strike, dip, slip*, P dan T axis, dan nilai enam momen tensor ($M_{xx}, M_{yy}, M_{zz}, M_{xy}, M_{xz}, M_{yz}$).



Gambar 8. Diagram bola fokus hasil inversi momen tensor

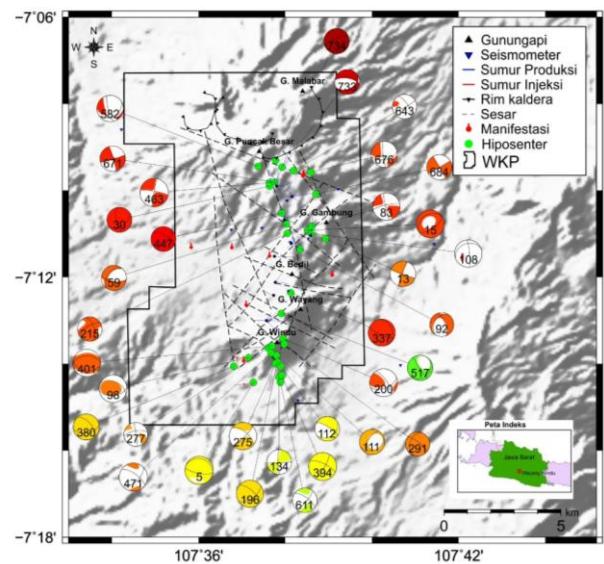
Zona Permeabilitas

Pada WKP Wayang Windu telah diketahui bahwa zona permeabilitas berada di sebelah utara dan di sebelah selatan dengan dibuktikan dengan adanya sumur pemboran yaitu sumur-sumur produksi disebelah utara dan 2 sumur injeksi disebelah selatan.

Hal tersebut sesuai dengan distribusi lokasi hiposenter dari data mikroseismik tahun 2016 menunjukkan adanya zona permeabilitas yang tersebar terpusat di dua area yaitu pada area produksi dan area injeksi dengan kuantitas yang lebih banyak berada pada area produksi.

Berdasarkan kuantitas dan distribusi hiposenter tersebut menunjukkan bahwa aktivitas produksi yaitu ekstraksi fluida geotermal menjadi salah satu penyebab utama terjadinya gempa mikro. Gempa mikro yang terjadi akibat aktivitas geotermal dapat menyebabkan perubahan tekanan pori di reservoir akibat pengambilan fluida. Perubahan tekanan pori dapat menyebabkan rekahan dapat membuka dan menutup yang menandakan ciri dari permeabilitas baik atau buruk. Oleh karena itu, berdasarkan analisis distribusi hiposenter, zona permeabilitas dapat diketahui dengan melihat kuantitas dari event mikroseismik yang ditandai dengan sebaran dan kedalaman hiposenter.

Penggambaran solusi momen tensor dengan diagram bola fokus pada masing-masing event dapat dilihat pada Gambar 7 dimana diagram bola fokus mereprestasikan jenis sesar yang terjadi.



Gambar 9. Peta sebaran mekanisme fokus gempa.

Berdasarkan analisis solusi momen tensor berdasarkan orientasi bidang patahan yang digambarkan oleh diagram bola fokus pada 34 event (Gambar 9) diketahui bahwa event mikroseismik yang diamati dibagian utara merupakan dominan sesar mendatar (*strike-slip*) dan sebagian kecil merupakan

sesar normal. Sedangkan event mikroseismik dibagian selatan dominan berada pada sesar mendatar dan sesar naik (*thrust fault*).

Karakterisasi zona permeabilitas dalam ditentukan dengan menggunakan beberapa parameter – parameter yang diperoleh dari inversi momen tensor, diantaranya yaitu:

1. Orientasi bidang patahan dari nilai *strike*, *dip*, *rake* dan *P-T axis*.
2. Dekomposisi momen tensor menjadi komponen DC dan non-DC (ISO dan CLVD).
3. Orientasi bidang patahan dapat menunjukkan permeabilitas dibawah permukaan yaitu dengan melihat arah *strike* dan *dip* suatu patahan dari solusi momen tensor dengan membaginya menjadi jenis sesar yaitu sesar mendatar (*strike-slip*), sesar normal, dan sesar *reverse/thrust*.

Kesimpulan

Proses yang dapat menjelaskan terjadinya gempa bumi di WKP Wayang Windu adalah gempa yang bersifat eksplosif atau implusif sebagai parameter perubahan volumetrik. Rongga dibawah permukaan dapat membuka dan menutup akibat injeksi dan penarikan fluida. Lofgren (1981) mengemukakan bahwa kehilangan fluida dalam volume besar diketahui menyebabkan kontraksi volumetrik yang besar. Sedangkan kontraksi volumetrik dalam arah vertikal dapat menyebabkan penurunan permukaan, sedangkan dalam arah horizontal yang dapat terjadi adalah rekahan yang membuka. Rongga yang runtuh menyebabkan gempa bumi yang dihasilkan dari kehilangan fluida yang menyebabkan runtuhnya pori yang mendukung rongga.

Zona permeabilitas ditentukan dari lokasi dan kedalaman hiposenter yang berada terpusat di sebelah utara dan selatan yang merupakan area produksi dan injeksi. Kedalaman hiposenter yang dangkal di sebelah utara menandakan bahwa event gempa bersumber dari aktivitas produksi sedangkan kedalaman hiposenter yang lebih dalam disebelah selatan dan memiliki pola seperti kedalaman hiposenter yang semakin dangkal mendekati area produksi di utara menandakan bahwa zona permeabilitas di sebelah selatan menjadi jalur fluida naik mendekati reservoir bagian utara.

Karakteristik zona permeabilitas di WKP Wayang Windu adalah bahwa gempa mikro yang terjadi adalah sumber gempa non-DC akibat dari aktivitas geotermal seperti perubahan volumetrik akibat pengambilan fluida di reservoir akan menyebabkan perubahan tekanan pori dan keruntuhan rongga akibat kehilangan fluida. Pengambilan dan injeksi fluida dapat menyebabkan gempa yang bersifat eksplosif dan implusif. Gempa yang bersifat eksplosif akan

menyebabkan rekahan membuka dan menandakan permeabilitas yang baik yang berada di sebelah utara WKP yaitu disekitar sumur produksi unit-2 yaitu MBB. Sedangkan gempa yang bersifat implusif akan menyebabkan rekahan menutup dan menandakan permeabilitas yang buruk yang berada di sekitar sumur produksi unit-1 yaitu MBD dan WWQ dan juga berada di sebelah selatan yaitu disekitar gunung windu, sumur injeksi dan struktur minor horst graben.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada dosen pembimbing kami atas dedikasinya dalam membimbing sehingga peneliti dapat menyelesaikan penelitian ini serta data dari GFZ dan Star Energy.

Referensi

- Abrenica, B. A., Harijoko, A., Kusuma, I., & Bogie, I. (2010). Characteristics of hydrothermal alteration in part of the northern vapor-dominated reservoir of the Wayang Windu geothermal field, West Java. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010*. Bogie, I., Kusumah, Y.I., Wisnandary., (2008): Overview of the Wayang Windu Geothermal Field, West Java, Indonesia, Amsterdam : Elsevier Scientific Publishing Company, p. 347-365.
- Amalia, L., Syafri, I., Patonah, A., & Auza, A. (2017). Alterasi hidrotermal sumur LA wilayah kerja panas bumi Wayang Windu Pangalengan Jawa Barat. *Padjadjaran Geoscience Journal*, 1(3), 230-236.
- Baig, A. M., & Urbancic, T. I. (2010). Microseismic moment tensors: A path to understanding frac growth. *The Leading Edge*, 29(3), 320-324.
- Bogie, I., Kusumah, Y.I., Wisnandary., (2008): Overview of the Wayang Windu Geothermal Field, West Java, Indonesia, Amsterdam : Elsevier Scientific Publishing Company, p. 347-365.
- Eyre, T. S., van der Baan, M., & Eaton, D. W. (2015). Resolving the moment tensor of induced seismicity. *Geophysical Journal International*, 201(3), 1682-1701.
- Handayani, T., Wijayanto, Saputro, A. H., Zulkifley, M. A., & Djuhana, D. (2025). Focal Mechanism and Moment Tensor Determination for Tsunami Early Warning Systems: A Literature Study (2018-2024). *IEEE Access*, 13, 140933-140972. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3594776>
- Havskov, J., dan Ottemoller, L. (2010) : *Routine Data Processing in Earthquake Seismology*, Springer Science: New York.
- Hidayati, S., Suparman, Y., & Loeqman, A. (2011). Focal Mechanism and Parameter of Volcano-Tectonic Earthquake Source, in Mount Guntur, West Java. *Indonesian Journal on Geoscience*, 6(1), 1-11.

- <https://doi.org/10.17014/ijog.6.1.1-11>
- Hochstein, M.P. and Sudarman, S. (2008): History of Geothermal Exploration in Indonesia from 1970 to 2000, *Geothermics*, 37, 220-266.
- Julian, B. R., Foulger, G. R., & Monastero, F. C. (1997). Non-double-couple earthquakes at The Geysers geothermal area, California. *Geophysical Research Letters*, 24(8), 945-948.
- Julian, B. R., Miller, A. D., & Foulger, G. R. (1998). Non-double-couple earthquakes 1. Theory. *Reviews of Geophysics*, 36(4), 525-549. <https://doi.org/10.1029/98RG00716>
- Jinyin Hu, Thanh-Son Phạm, Hrvoje Tkalčić, Seismic moment tensor inversion with theory errors from 2-D Earth structure: implications for the 2009-2017 DPRK nuclear blasts/ (2023). *Geophysical Journal International*, Volume 235, Issue 3, December 2023, Pages 2035-2054, <https://doi.org/10.1093/gji/ggad348>
- Miller, A. D., Julian, B. R., & Foulger, G. R. (1998). Three-dimensional seismic structure and moment tensors of non-double-couple earthquakes at the Hengill-Grensdalur volcanic complex, Iceland. *Geophysical Journal International*, 133(2), 309-325. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1998.00492.x>
- Mulyadi and Ashat, A., (2011): Reservoir Modelling of the Northern Vapor-Dominated Two-Phase Zone of the Wayang Windu Geothermal Field, Java, Indonesia, *Proceedings, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California
- Oktaviani, Vina., dkk (2017) : Estimasi Temperatur Bawah Permukaan Berdasarkan Kehadiran Mineral Alterasi pada Sumur "X" Lapangan Panas Bumi Wayang Windu Pangalengan Kabupaten Bandung Provinsi Jawa Barat, *Buletin Sumber Daya Geologi* Volume 12 Nomor 2-2017.
- Purnanto, M. H., Purwakusumah, A. (2015): Fifteen Years (Mid-Life Time) of Wayang Windu Geothermal Power Station Unit-1: An Operational Review, *Proceedings World Geothermal Congress 2015*.
- Pramadhani, F., Rokhmatulloh, & Supriatna. (2021). Potensi Panas Bumi Berdasarkan Karakteristik Fisik Wilayah (Studi Kasus : Daerah Wayang-Windu, Kabupaten Bandung, Propinsi Jawa Barat dan Daerah Gunung Endut, Kabupaten Lebak, Propinsi Banten). *Jurnal Geosains Terapan*, 1(1), 18. Diambil dari <https://geosainsterapan.id/index.php/id/article/view/4>
- Ross, A., Foulger, G. R., & Julian, B. R. (1996). Non-double-couple earthquake mechanisms at The Geysers geothermal area. *Geophysical Research Letters*, 23(8), 877-880.
- Rudajev, V., & Šílený, J. (1985). Seismic moment tensor inversion of induced seismic events. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 29, 149-156.
- Šílený, J., & Milev, A. (2006). Seismic moment tensor resolution of mining-induced seismic events. *Pure and Applied Geophysics*, 163, 1495-1513.
- Sudarman, S., Pijianto, R., dan Bdiarjo, B. (1986): The Gunung Wayang-Windu Geothermal Area In West Java, *Proceedings Indonesian Petroleum Association-Fifteenth Annual Convention*, p.141-153.
- Sultan, Rhamadhana., Rachmat Sule, Mohammad., Hendriyana, Andri., Supendi, Pepen. (2018). Analysis of Focal Mechanism for Determine Fault Plane Orientation Using The Moment Tensor Inversion Case Study : West Java Geothermal Field. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Volume 318, The 2nd Southeast Asian Conference on Geophysics. doi: 10.1088/1755-1315/318/1/012036
- Vavryčuk, V. (2011). Tensile earthquakes: Theory, modeling, and inversion. *Journal of Geophysical Research*, 116, B12320.
- Vilanti, Nevi Nurviani (2015) : Analisis Sumber Mekanisme Fokus untuk Penentuan Zona Permeabilitas Lapangan Panas Bumi Wayang Windu, (Unpublished master thesis), Institut Teknologi Bandung.