

ANALISIS DISTRIBUSI TEGANGAN NORMAL GEMPA BUMI DI WILAYAH SESAR SUMATRA MENGGUNAKAN METODE INVERSI TEGANGAN

Widya Rahmawati, Madlazim

Program Studi Fisika, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya

Email: widya.17030224009@mhs.unesa.ac.id

Abstrak

Sumatra merupakan salah satu wilayah dengan aktivitas tektonik tertinggi di Indonesia. Sumatra dilalui oleh patahan aktif yang membentang sejauh 1900 km sepanjang Bukit Barisan sampai Aceh utara yang disebut sesar Sumatra. Aktivitas tektonik pada daerah rawan gempa dapat diketahui melalui kajian distribusi posisi dan arah tegangan normal gempa bumi bahkan adanya aktivitas tektonik susulan. Tegangan normal dapat memicu maupun menghambat suatu patahan. Untuk mengetahui distribusi posisi dan arah tegangan normal digunakan metode inversi tegangan di wilayah sesar Sumatra dengan memasukkan 54 data sekunder parameter bidang sesar (*strike, dip, rake*) yang diakses bebas melalui laman CMT IRIS *database* gempa bumi ke dalam *software stressinverse*. Hasil yang diperoleh berupa gambar yang menginterpretasikan posisi dan arah tegangan normal gempa bumi yang meliputi diagram lingkaran Mohr, persebaran sumbu P dan T, histogram rasio bentuk, dan arah tegangan utama. Gambar persebaran sumbu P dan T menunjukkan distribusi posisi tegangan normal maksimum (σ_1), intermediate (σ_2), dan minimum (σ_3) pada wilayah sesar Sumatra, sedangkan gambar arah tegangan utama menunjukkan arah tegangan normal pada sesar Sumatra. Tegangan normal maksimum menandakan adanya aktivitas seismik tinggi yang mendominasi sesar Sumatra area utara. Tegangan intermediate mendominasi sekitar sesar Sumatra. Area timur sesar Sumatra didominasi oleh tegangan normal minimum. Nilai histogram rasio bentuk mendekati 0.8 menandakan kesesuaian data terhadap teori Vavryuk dengan nilai rasio minimum 0.7 dan nilai rasio maksimum 1. Kualitas data parameter bidang sesar yang sesuai dengan karakteristik sesar wilayah penelitian sangat mempengaruhi diagram histogram rasio bentuk.

Kata Kunci: tegangan normal, inversi tegangan, diagram lingkaran Mohr, parameter bidang sesar.

Abstract

Sumatra is one of the regions with the highest tectonic activity in Indonesia. Sumatra has passed by an active fault that stretches for 1900 km along the Bukit Barisan to North Aceh is called the Sumatra fault zone. Tectonic activity in earthquake-prone areas can be identified through normal stress studies and even subsequent tectonic activity. Normal stresses can trigger or inhibit a fault. To determine the distribution of the normal stress position and direction, the stress inversion method is used in the Sumatra Fault area by entering 54 secondary data on the fault plane parameters (*strike, dip, rake*) which is freely accessed through the CMT IRIS earthquake database page into *stressinverse* software. The results obtained are images that interpret the position and direction of normal earthquake stresses which include Mohr pie chart, distribution of P and T axis, shape ratio histogram, and principal stress direction. Distribution of P and T axis image shows the distribution of the maximum (σ_1), intermediate (σ_2), and minimum (σ_3) normal stress positions in the study area, while the main stress direction image shows the normal stress direction on the Sumatran fault. The maximum normal stress indicates the presence of high seismic activity that dominates the northern Sumatra fault. The intermediate stress dominates around the Sumatra fault. The eastern area of the Sumatra fault is dominated by the minimum normal stress. The shape ratio histogram value is close to 0.8 indicating the suitability of the data to Vavryuk's theory with a minimum ratio value of 0.7 and a maximum ratio value of 1. The quality of the fault plane parameter data according to the fault characteristics of the study area greatly influences the shape ratio histogram diagram.

Keywords: normal stress, stress inversi, Mohr's circle diagram, fault parameters.

PENDAHULUAN

Negara Indonesia termasuk salah satu negara yang memiliki aktivitas seismik paling aktif di dunia karena dikelilingi oleh tiga lempeng tektonik utama. Wilayah selatan Indonesia terdapat Lempeng Indo-Australia, kemudian Lempeng Eurasia terletak di wilayah utara, dan Lempeng Pasifik berada di wilayah timur (Ibrahim dan Subarjol, 2005). Ketiga lempeng utama tersebut menjadikan Indonesia sebagai wilayah dengan jalur pertemuan lempeng tektonik yang kompleks karena tidak hanya lempeng utama, Indonesia juga dikelilingi oleh sembilan lempeng-lempeng kecil yang saling berinteraksi

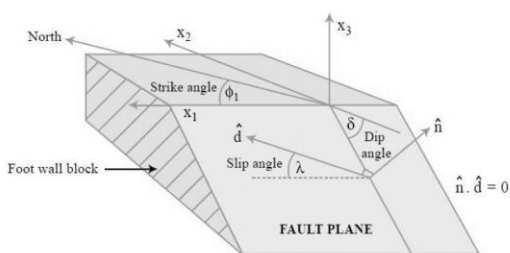
(Bird, 2003). Akibat lempeng-lempeng yang saling berinteraksi satu sama lain menjadikan wilayah Indonesia sebagai wilayah yang rentan terhadap gempa dengan frekuensi kejadian gempa yang cukup tinggi.

Gempa bumi adalah pelepasan energi atau tegangan yang terjadi secara tak terprediksi dari bawah permukaan bumi yang gerakannya dimulai di area terbatas kemudian menyebar ke segala arah (Simanjuntak dan Olymphina 2017). Pelepasan energi terjadi pada batuan yang mengalami tekanan (stress) dan tarikan (strain) secara terus-menerus (Linda *et al.*, 2019). Batuan pada lempeng memiliki batas elastisitas, ketika energi gesekan melebihi elastisitas batuan,

maka akumulasi energi deformasi elastis akan dilepaskan dalam bentuk rambatan gelombang seismik (Vavrycuk, 2015). Salah satu penyebab utama gempa bumi adalah adanya pergerakan pada permukaan sesar (Febyani *et al.*, 2020). Pergerakan sesar berpotensi tinggi menimbulkan gempa yang kerap merusak infrastruktur hingga menelan korban jiwa (Mustafa, 2010).

Sesar (patahan) merupakan rekahan suatu batuan yang mengalami pergeseran satu sama lain (Sammuel *et al.*, 2020). Menurut Madlazim, (2015) sesar memiliki parameter bidang sesar (gambar 1) yang terdiri dari *strike*, *dip*, dan *rake*.

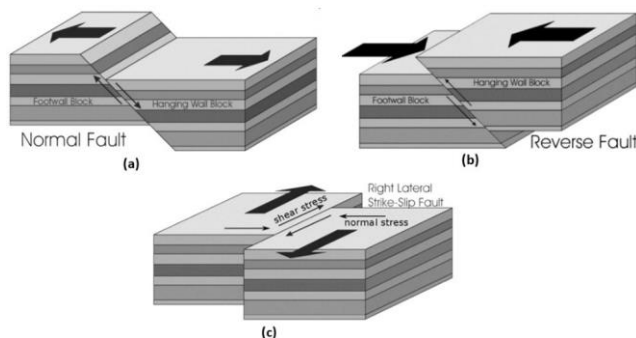
- Strike* adalah sudut yang menentukan arah tegangan diukur dari utara dan searah jarum jam ($0^\circ \leq \Phi \leq 360^\circ$).
- Dip* merupakan sudut yang dibentuk oleh bidang patahan dengan bidang horizontal yang diukur pada bidang vertikal dengan arah tegak lurus dengan bidang patahan ($0^\circ < \delta \leq 90^\circ$).
- Rake* merupakan arah gerakan di seluruh permukaan patahan dengan sudut pergerakan *hanging wall* terhadap *slip* ($-180^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$). Pergerakan *hanging wall* menentukan klasifikasi geometri. Jika bergerak turun maka disebut sesar normal. Jika bergerak naik disebut sesar naik, dan jika bergerak horizontal maka disebut sesar strike-slip.



Gambar 1. Parameter Bidang Sesar (Mubarok, 2017)

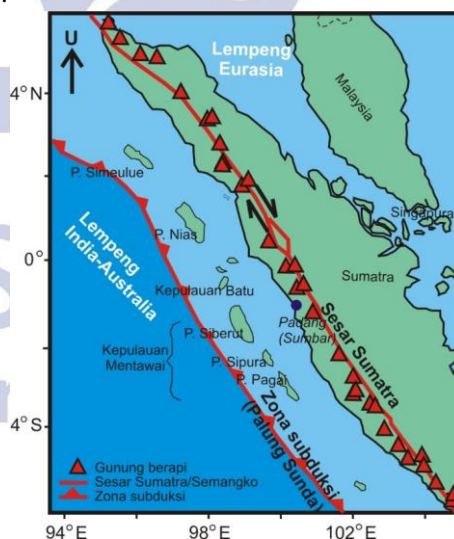
Sesar terdiri dari dua bidang blok yang terpisah yaitu patahan blok bagian atas disebut *hanging wall* dan patahan blok bagian bawah disebut *foot wall* (Sammuel *et al.*, 2020). Berdasarkan arah pergerakannya sesar dapat dibagi menjadi tiga seperti pada gambar 2 (Tamril *et al.*, 2020) yaitu:

- Sesar Normal merupakan kondisi patahan dimana blok bagian atas cenderung lebih turun terhadap blok bagian bawah. Sesar normal terbentuk karena adanya gaya tekan maksimum sehingga *hanging wall* bergerak menuju kebawah.
- Sesar Naik/*thrust*, yaitu kondisi ketika *hanging wall* relatif naik terhadap *foot wall*. Sesar ini terbentuk karena adanya gaya yang saling tekan sehingga salah satu blok yaitu blok bagian atas (*hanging wall*) mengalami pergerakan dan relatif bergerak ke atas.
- Sesar Strike-slip/*Wrench*, yaitu kondisi dimana pergerakan antara *hanging wall* dan *foot wall* bergerak secara horizontal.



Gambar 2. (a) Sesar Normal, (b) Sesar Naik (*Reverse*), (c) Sesar Geser (*strike-slip*) (Mubarok, 2017)

Sumatra memiliki tatanan tektonik yang dapat menyebabkan gempa bumi, yaitu zona subduksi yang merupakan batas antar lempeng India-Australia yang menunjng ke dalam lempeng Eurasia, dan zona sesar Sumatra atau sesar Semangko dan disebut juga Sumatera Fault Zone (SFZ) (Madlazim, 2013). Kedua zona ini membelah pulau Sumatra menjadi dua wilayah yang membentang di sepanjang bukit barisan dari wilayah teluk Semangko di Selat Sunda sampai wilayah Aceh di utara sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3 (Natawidjaja, 2002).



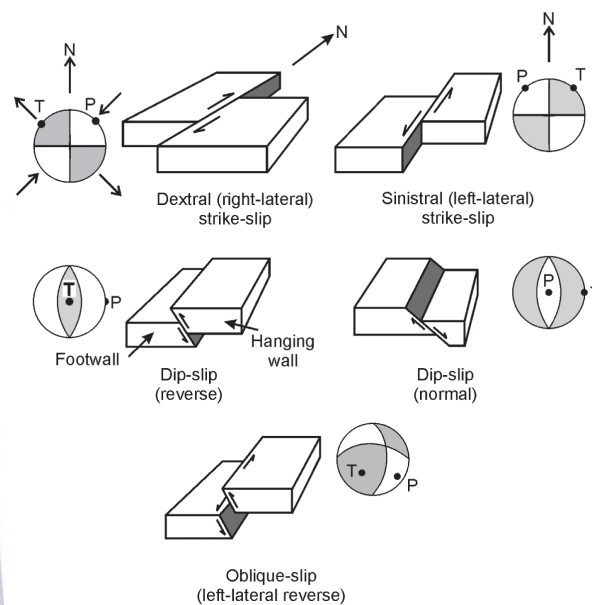
Gambar 3. Tatanan Tektonik Wilayah Sumatra (Rahadian, 2011)

Lempeng tektonik Australia mengalami pergerakan sehingga menabrak Pulau Sumatra dengan sedikit miring seperti pada gambar 3, energinya yang besar menciptakan sebuah tekanan yang mengakibatkan Sumatra terdorong ke arah utara, zona subduksi tidak dapat menarik dorongan tersebut akibatnya tekanan tersebut diserap oleh jalur patahan utama yang terletak di sepanjang Pegunungan Bukit Barisan Sumatra, tekanan lempeng yang terjadi terus menerus hingga melewati batas elastisitas batuan di wilayah patahan mengakibatkan bagian barat Sumatra bergerak ke utara dan bagian timur Sumatra bergerak ke arah selatan (Madlazim, 2015).

Diantara Sumatra Fault Zone maupun zona subduksi ada beberapa sesar minor aktif, antara lain sesar Mentawai serta sesar Andaman. Sumatra Barat ialah batasan lempeng samudra yang terdiri dari 2 sistem sesar yakni sesar *strike-slip* menganan (*dextral*) dan subduksi antarmuka dip-slip yang mempunyai pengaruh sangat besar (Lasitha et al., 2006). Pergerakan sesar Sumatra searah dengan perputaran jarum jam. Perpindahan sesarnya membentuk sudut (*dip-slip/oblique*). Bidang sesar Sumatra tegak lurus ataupun membentuk sudut terhadap bidang horisontal, keadaan tersebut mengakibatkan banyak terjadi pergerakan pada bidang patahan yang dapat mengakibatkan tingginya aktivitas kegempaan di sepanjang wilayah sesar. (Kusnanto, 2015). Gempa besar yang terjadi di daerah yang dilalui Sumatra Fault Zone maupun *megathrust* mayoritas adalah gempa dangkal yang dapat mengakibatkan aktivitas susulan seperti Tsunami dan kerusakan yang sangat fatal (Arini et al., 2019). Berdasarkan catatan aktivitas seismik (Maret 2005-juni 2019) telah terjadi gempa di Pulau Sumatra sebanyak 300 kali dengan magnitudo momen sebesar 5 Mw hingga 8,6 Mw (Sinaga et al., 2020).

Penentuan jenis bidang patahan dapat diamati melalui mekanisme fokus (*focal mechanism*). Mekanisme fokus merupakan metode yang digunakan untuk menentukan jenis sesar, dengan meninjau parameter bidang sesar (*strike, dip, rake*) berdasarkan arah gerak awal gelombang P yang terekam oleh stasiun pencatat, kemudian diproyeksikan menjadi bola fokus (Wardani et al., 2021). Bola fokus dibagi menjadi empat kuadran yang dipisahkan oleh dua buah garis nodal (NP1 dan NP2) yang membentuk suatu mekanisme fokus gempa bumi (Ismawati, 2011).

Pada bola fokus terdapat persebaran sumbu P dan Sumbu T yang merupakan parameter bidang sesar (*strike, dip, rake*) (ismawati, 2011). Apabila Sumbu P (tekanan) dan T (tegangan) berada maupun dekat dengan garis nodal, maka mekanisme fokus yang dihasilkan adalah *strike-slip* atau sesar mendatar. Pada gambar 4 merupakan hubungan mekanisme fokus dengan sumbu P dan T. Mekanisme fokus sesar Sumatra adalah *strike-slip* menganan atau *dextral*, sebaran sumbu P dan T berada dekat dengan garis nodal.



Gambar 4. Hubungan Sumbu P dan T dengan Mekanisme Fokus (jenis patahan) (Gudmundsson, 2020)

Untuk penentuan tegangan normal dari sekumpulan mekanisme fokus, Maury et al., (2013) mengasumsikan sebagai berikut:

1. Tegangan tektonik homogen di suatu wilayah.
2. Gempa bumi terdapat pada sesar yang telah terjadi sebelumnya dengan posisi dan arah yang berbeda-beda.
3. Sudut kemiringan (vektor slip) menunjuk ke arah tegangan geser pada bidang sesar.
4. Gempa bumi tidak berinteraksi satu sama lain dan tidak mengenai tegangan tektonik.

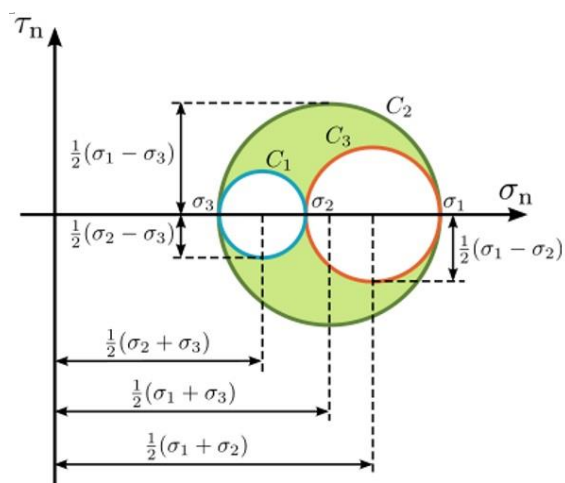
Jenis patahan bergantung pada medan tegangan serta pada orientasi rekahan (Vavrycuk, 2011a). Penelitian ini menggunakan metode inversi tegangan yang memanfaatkan parameter bidang sesar untuk menentukan parameter tensor tegangan yaitu posisi dan arah tegangan normal ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) dengan tingkat keakuratan pada histogram rasio bentuk. Pada metode inversi tegangan menghasilkan diagram lingkaran Mohr yang digunakan untuk menghitung tegangan, menemukan ketidakstabilan patahan, serta mekanisme fokus utama.

Terbatasnya penelitian mengenai tegangan normal menjadi dasar dilakukannya penelitian ini. Tegangan normal sangat dibutuhkan dalam mengetahui berbagai macam aktivitas tektonik pada suatu daerah khususnya daerah rawan gempa. Wilayah dengan potensi kegempaan besar dapat dikaji melalui posisi dan arah tegangan normal bahkan dapat diketahui adanya aktivitas seismik susulan.

Mengacu terhadap riset terdahulu oleh Vavrycuk tahun 2011, 2014, dan buku panduan *stressinverse* tahun 2019 tentang penggunaan parameter bidang sesar berupa *strike, dip, rake* dan orientasi tegangan yang bersumber pada bola fokal, maka dilakukan penelitian ini yang bertujuan untuk menghasilkan dan menganalisa distribusi posisi dan arah tegangan normal maksimum (σ_1), tegangan normal intermediate (σ_2), dan tegangan normal minimum (σ_3).

Diagram Lingkaran Mohr

Diagram lingkaran Mohr merupakan persamaan rumus dari transformasi batuan (tegangan) yang di representasikan dengan gambaran yang di plotkan ke dalam bentuk diagram lingkaran Mohr (Handari, 2013).



Gambar 5. Diagram Mohr Pada (Soetomo, 2013)

Diagram lingkaran Mohr dapat menggambarkan dan menentukan tegangan normal maupun tegangan geser pada bidang patahan atau sesar (Soetomo, 2013). Pada gambar 5 diasumsikan gaya yang berperan $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ dan vektor tegangan $T^{(n)}$ dengan satuan unit vektor (n).

$$(T^{(n)})^2 = \sigma_{ij}\sigma_{ik}n_jn_k \quad (1)$$

$$\sigma_n^2 + T_n^2 = \sigma_1^2n_1^2 + \sigma_2^2n_2^2 + \sigma_3^2n_3^2 \quad (2)$$

Dimana $n_i n_i = n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 = 1$ maka persamaan 2 dapat dijabarkan

$$\begin{aligned} n_1^2 &= \frac{T_n^2 + (\sigma_n - \sigma_3)(\sigma_n - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_1 - \sigma_3)} \geq 0 \\ n_2^2 &= \frac{T_n^2 + (\sigma_n - \sigma_3)(\sigma_n - \sigma_1)}{(\sigma_2 - \sigma_3)(\sigma_2 - \sigma_1)} \geq 0 \\ n_3^2 &= \frac{T_n^2 + (\sigma_n - \sigma_1)(\sigma_n - \sigma_2)}{(\sigma_3 - \sigma_1)(\sigma_3 - \sigma_2)} \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Karena $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 = (n_i)^2$ maka persamaan dapat ditulis:

$$\begin{aligned} T_n^2 + \left[\sigma_n - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3)\right]^2 &\geq \left(\frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3)\right)^2 \\ T_n^2 + \left[\sigma_n - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\right]^2 &\geq \left(\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\right)^2 \\ T_n^2 + \left[\sigma_n - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)\right]^2 &\geq \left(\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)\right)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Maka dapat diperoleh dengan rumus radius (R/r) jari-jari

$$\begin{aligned} R1/r1 &= (\sigma_2 - \sigma_3)/2 \\ R2/r2 &= (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \\ R3/r3 &= (\sigma_1 - \sigma_2)/2 \end{aligned} \quad (5)$$

T_n adalah tegangan normal dan T_t adalah tegangan geser yang bekerja pada bidang patahan dan R/r adalah jari-jari. Berdasarkan persamaan (5) diagram lingkaran tersebut maka dapat diketahui titik tengah lingkaran Mohr masing masing:

1. Lingkaran C1 = $[(\sigma_2 + \sigma_3) / 2, 0]$
2. Lingkaran C2 = $[(\sigma_1 + \sigma_3) / 2, 0]$
3. Lingkaran C3 = $[(\sigma_1 + \sigma_2) / 2, 0]$ (6)

Dengan mengetahui komponen tensor tegangan pada salah satu orientasi tegangan, maka dapat menggambarkan ketiga lingkaran Mohr. Komponen tensor tegangan tersebut adalah nilai C1, C2, C3 yang merupakan nilai dari persamaan sebelumnya (persamaan 6) dengan hasil sebagai berikut:

1. Solusi lingkaran C1 berada di luar lingkaran Mohr.
2. Solusi lingkaran C2 berada di dalam lingkaran Mohr.
3. Solusi lingkaran C3 berada di luar lingkaran Mohr.

Sehingga apabila ketiganya digabungkan, maka akan diperoleh suatu bagian yang diarsir hijau yang merupakan daerah dari solusi tegangan normal (T_n) dan tegangan geser (T_t).

Tegangan Normal

Tegangan atau Stress didefinisikan sebagai gaya persatuan luas. Apabila sebuah permukaan dengan luas yang diperhitungkan dikenai gaya kemudian hasilnya adalah tegangan permukaan, maka tegangan tersebut merupakan tegangan normal.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (7)$$

Dengan keterangan sebagai berikut:

σ = Tegangan Normal (N/m²)

F = Gaya Tarik (N)

A = Luas Penampang (m²)

Tegangan normal dapat memicu maupun menghambat suatu patahan atau sesar. Arah tegangan utama pada kerak bumi sering kali mendekati arah vertikal maupun horizontal. Besaran tegangan utama yaitu tegangan vertikal maksimum, menengah, dan minimum yang sehubungan dengan tegangan horizontal. Tegangan normal minimum (σ_3) adalah tegangan pada permukaan yang tegak lurus terhadap arah gayanya yang memiliki nilai kecil atau memiliki risiko sangat kecil terhadap pergerakan maupun perubahan yang akan terjadi. Tegangan normal intermediate (σ_2) adalah tegangan pada permukaan yang tegak lurus terhadap arah gayanya, memiliki gaya tarik yang bernilai sedang serta sering terjadi sehingga menjadi nilai rata-rata ketika terjadi gempa. Sedangkan tegangan normal maksimum (σ_1) merupakan tegangan yang terjadi pada permukaan yang tegak lurus terhadap arah gayanya dengan gaya tarik yang bernilai besar sehingga dapat menyebabkan perubahan pada permukaan seperti memanjang dan memencutnya sebuah penampang. Jika sampai pada batas maksimum, penampang akan putus dan dapat menimbulkan patahan pada penampang baru. Penampang yang dimaksudkan dalam hal ini ialah sesar atau patahan (Heinz, 1978).

METODE

Penelitian ini mengacu pada penelitian terdahulu (Vavrycuk, 2014) tentang orientasi tegangan utama dengan melibatkan parameter bidang sesar dan mekanisme bola fokus. Penelitian dilakukan menggunakan *software* "STRESSINVERSE" yang merupakan perangkat lunak Python yang digunakan untuk melakukan inversi tegangan secara bersamaan dan dilakukan berulang-ulang untuk menentukan orientasi *stress* dan patahan dari *focus mechanism*. Pada pemakaian *software stressinverse*, kode Python yang diperlukan untuk proses pengkodean berupa modul *matplotlib*, *scipy*, *numpy* serta *os* Linux (Vavrycuk, 2019). Inversi tegangan pada aplikasi Stressinverse mengacu pada metode Michael (1984,1987 dalam Vavrycuk, 2014) dengan kriteria ketidakstabilan yang digunakan adalah teori inversi tegangan tensor oleh Lund and Slunga (1999).

Dengan diagram lingkaran Mohr posisi dan arah tegangan utama dapat diketahui. Bersumber pada informasi gempa, data gempa disortir berdasarkan jenis patahan sesar Sumatra. Informasi tersebut diolah menggunakan *software stressinverse* pada box data mechanism Republik Bohemian Barat (*.txt) oleh Vavrycuk (2014) dengan memasukkan parameter bidang sesar (*strike, dip, rake*).

Dalam penelitian ini tiga variabel operasional yang digunakan meliputi variabel manipulasi, variabel kontrol, dan variabel respon. Variabel manipulasi adalah parameter bidang sesar (*strike, dip, rake*) yang dapat diperoleh melalui katalog gempa bumi CMT IRIS database (<https://ds.iris.edu/spud/momenttensor>). Variabel respon adalah gambar hasil keluaran berupa diagram lingkaran Mohr, sumbu P/T pada bola fokus, histogram rasio bentuk, serta gambar arah tegangan. Variabel kontrol adalah *software stressinverse*, lokasi penelitian sesar Sumatra dengan koordinat 6°LU – 6°LS dan 95°BT – 107°BT, kurun waktu kejadian gempa terhitung sejak tahun 2000-2020, event gempa bumi berdasarkan jenis sesar Sumatra. Jenis sesar yang digunakan adalah sesar strike-slip menganan (*dextral*).

Data yang telah dikumpulkan kemudian dibuat tabulasi data. Jumlah data yang diperoleh dipilih berdasarkan dengan jenis patahan dan kurun waktu yang telah ditentukan. Setelah tabulasi, kemudian dimasukkan kedalam box data (*.txt) dan dilakukan pemrosesan pada *stressinverse*. Analisis data dapat dilakukan pada gambar keluaran yang dihasilkan yaitu berupa gambar diagram lingkaran Mohr, gambar persebaran sumbu P dan T dengan arah tegangan, gambar diagram rasio bentuk, serta gambar batas kepercayaan arah tegangan utama.

Data penelitian pada tabel 1 meliputi parameter bidang sesar (*strike, dip, rake*) yang berada pada garis *nodal plane* (NP1 dan NP 2).

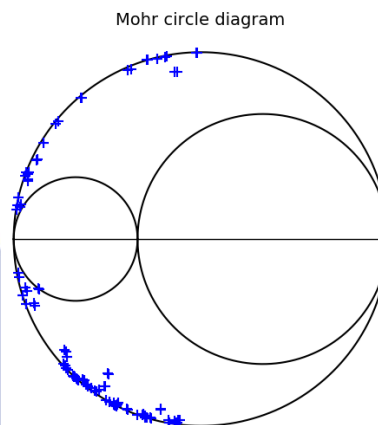
Tabel 1. Data Parameter Bidang Sesar.

No.	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Ket.
1.	92	66	-174	NP1
	359	84	-24	NP2
2.	141	68	-172	NP1
	48	83	-23	NP2
3.	146	71	-177	NP1
	55	87	-19	NP2
4.	3	83	178	NP1
	93	88	7	NP2
5.	145	65	178	NP1
	236	88	25	NP2
6.	88	81	174	NP1
	179	84	9	NP2
7.	147	72	-178	NP1
	56	88	-18	NP2
8.	139	73	-172	NP1
	47	83	-18	NP2
9.	149	77	-176	NP1
	58	86	-13	NP2
10.	221	62	12	NP1
	125	80	152	NP2
11.	152	72	-165	NP1
	57	76	-18	NP2
12.	141	79	-171	NP1
	49	81	-11	NP2
13.	164	80	-180	NP1
	74	90	-10	NP2
14.	51	79	-8	NP1
	142	82	-169	NP2
15.	86	68	178	NP1
	176	88	22	NP2
16.	109	56	163	NP1
	208	76	35	NP2
17.	136	71	-163	NP1
	41	74	-19	NP2
18.	148	67	-177	NP1
	57	87	-23	NP2
19.	133	57	-177	NP1
	41	87	-33	NP2
20.	130	65	-172	NP1
	37	83	-25	NP2
21.	118	58	178	NP1
	209	88	32	NP2
22.	132	68	-174	NP1
	39	85	-22	NP2
23.	93	68	162	NP1
	190	73	23	NP2
24.	131	71	-165	NP1
	36	76	-19	NP2
25.	145	70	-179	NP1

	55	89	-20	NP2
26.	102	64	-176	NP1
	11	87	-26	NP2
27.	37	73	-14	NP1
	132	76	-162	NP2
28.	168	74	10	NP1
	76	80	163	NP2
29.	166	62	-3	NP1
	257	87	-152	NP2
30.	50	83	-4	NP1
	141	87	-173	NP2
31.	323	70	-178	NP1
	232	88	-20	NP2
32.	355	86	-177	NP1
	264	87	-4	NP2
33.	127	65	2	NP1
	36	88	155	NP2
34.	123	62	-175	NP1
	31	86	-28	NP2
35.	104	69	166	NP1
	199	77	22	NP2
36.	332	79	-177	NP1
	241	87	-11	NP2
37.	118	66	-10	NP1
	212	81	-155	NP2
38.	331	82	173	NP1
	62	83	8	NP2
39.	229	70	-11	NP1
	323	80	-159	NP2
40.	148	79	175	NP1
	239	85	11	NP2
42.	149	80	179	NP1
	239	89	10	NP2
43.	150	84	-177	NP1
	60	87	-6	NP2
44.	162	86	180	NP1
	252	90	4	NP2
45.	141	80	-173	NP1
	50	83	-10	NP2
46.	136	80	-179	NP1
	47	89	-10	NP2
47.	46	72	0	NP1
	316	90	162	NP2
48.	168	67	9	NP1
	74	82	156	NP2
49.	183	80	9	NP1
	92	81	170	NP2
50.	135	74	-174	NP1
	44	84	-16	NP2
51.	348	72	-175	NP1
	257	85	-18	NP2

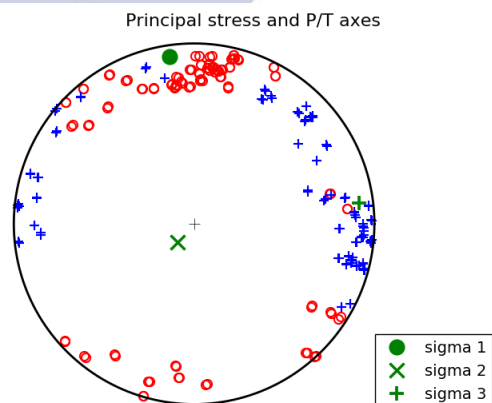
52.	148	82	-178	NP1
	58	88	-8	NP2
53.	142	78	-170	NP1
	50	80	-12	NP2
54.	184	74	8	NP1
	92	82	163	NP2

HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 6. Diagram Lingkaran Mohr

Diagram lingkaran Mohr menggambarkan keadaan tegangan dua dimensi. Tegangan dua dimensi menginterpretasikan kondisi tegangan normal dan tegangan geser yang beraktivitas di bidang patahan (Elenean, 2003). Pada gambar 6, lingkaran terluar berisi titik biru ialah bidang sesar utama di daerah solusi C2 (persamaan (6) poin 2) yang menunjukkan daerah solusi kegagalan Mohr dari dua lingkaran lainnya (Soetomo, 2013).

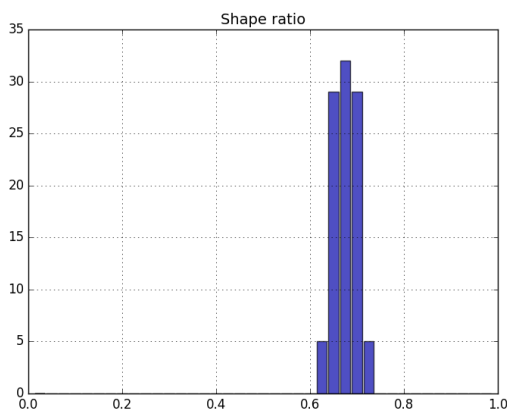


Gambar 7. Persebaran Sumbu P dan T dengan Arah Tegangan Utama

Berdasarkan gambar 7 dapat diketahui persebaran sumbu P dan T pada bidang fokus dan arah tegangannya. Sumbu P dan T ditandai dengan warna merah dan biru. Warna merah adalah sumbu P yang menggambarkan tekanan. Warna biru adalah sumbu T yang menggambarkan tegangan. Proyeksi sebaran sumbu P dan T menginformasikan jenis patahan yang dominan. berdasarkan keterangan pada gambar 7 tanda lingkaran hijau merupakan tegangan utama maksimum (σ_1), tanda persilangan hijau

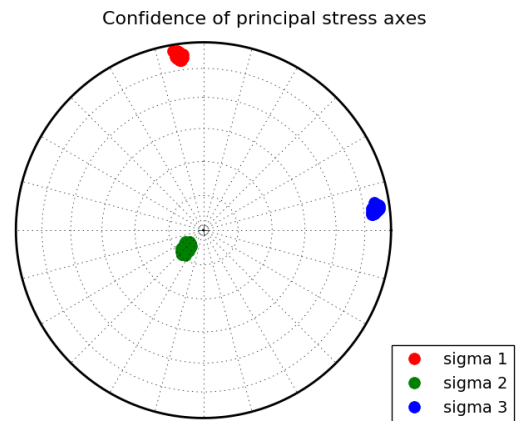
menginterpretasikan tegangan normal intermediate (σ_2), dan tanda penjumlahan hijau merupakan tegangan normal minimum (σ_3).

Orientasi bidang sesar utama dan mekanisme fokus utama bergantung pada tegangan dan gesekan sesar. Persebaran sumbu P dan T berdasarkan data parameter gempa CMT IRIS sesuai dengan jenis sesar yang dominan pada wilayah penelitian sesar Sumatra yaitu *strike-slip* mengangan (*dextral*). Area kurva dalam lingkaran yang disebut dengan kurva kegagalan merupakan area yang menentukan posisi sumbu P dan T terhadap mekanisme bola fokus, persebaran sumbu nya membentuk cluster yang tidak tumpang tindih dan membentuk cluster pola sayap dua yang menandakan akurasi tinggi dari mekanisme bola fokus dan homogenitas tegangan yang diambil (Vavrycuk 2011a).



Gambar 8. Histogram Rasio Bentuk

Menurut Vavrycuk, (2014) nilai histogram rasio bentuk (gambar 8) sensitif terhadap mekanisme bola fokus dan akurasinya. Nilai akurat dari rasio bentuk dapat dihitung berdasarkan variasi mekanisme fokus. Semakin banyak mekanisme fokus yang diamati dengan kondisi tegangan yang seragam, maka semakin kecil ketidakpastian dalam orientasi tegangan yang diperoleh. Artinya semakin banyak data mekanisme fokus dengan jenis patahan yang sama maka dapat dipastikan keakuratan data tersebut. Nilai yang diperoleh berdasarkan histogram bentuk pada gambar 8 adalah mendekati nilai 0.8. hal ini menunjukkan kesesuaian dengan teori Vavrycuk yang menyatakan nilai rasio bentuk minimum adalah 0.7 dan nilai maksimum 1.



Gambar 9. Batas Keakurasian Arah Tegangan Utama

Gambar 9 merupakan batas keakurasian arah tegangan utama. Keakurasian arah tegangan utama, pada gambar 9 ditetapkan berdasarkan kemiripan jenis patahan yang dipilih dari bidang nodal. Titik berwarna merah adalah tegangan normal maksimum (σ_1) yang menandakan adanya aktivitas seismik tinggi yang dapat memicu terjadinya gempa besar. Titik tersebut berada di sebelah utara sesar Sumatra. Kemudian titik berwarna hijau adalah garis nodal yang sesuai dengan bidang patahan strike slip yang merupakan tegangan normal intermediate (σ_2) dan berada di sekitar sesar Sumatra. Sedangkan titik berwarna biru merupakan tegangan normal minimum (σ_3) yang berada di timur sesar Sumatra.

KESIMPULAN

Distribusi posisi tegangan normal maksimum (σ_1), tegangan normal intermediate (σ_2), dan tegangan normal minimum (σ_3) wilayah sesar Sumatra diperlihatkan oleh gambar 7. Persebaran bidang nodal sumbu P dan T sesuai dengan jenis sesar Sumatra yaitu *strike-slip* mengangan (*dextral*). Distribusi arah tegangan normal ditunjukkan oleh diagram batas kepercayaan tegangan normal sesuai gambar 9. Area sebelah utara sesar Sumatra didominasi oleh Tegangan normal maksimum yang merupakan pemicu terjadinya gempa besar. Tegangan normal intermediate mendominasi sekitar sesar Sumatra. Sedangkan tegangan normal minimum mendominasi area timur sesar Sumatra. Nilai histogram rasio bentuk dihasilkan angka mendekati 0.8 dengan bidang patahan yang dipilih berdasarkan jenis patahan pada wilayah penelitian. Hasil-hasil penelitian ini dapat meningkatkan pemahaman posisi dan arah tegangan normal pada wilayah dengan status kegempaan aktif dan sebagai bagian dari upaya mitigasi bahaya bencana gempa bumi di Indonesia.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada *reviewers* yang bertindak sebagai penguji dan telah memberi masukan/kritik/komentar bermanfaat untuk kesempurnaan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Arini, Dwi. Irwan Meilano, Zamzam Akhmad Jamaluddin Tanuwijaya. (2019). Analisa Pola Pergerakan Sesar Sumatra berdasarkan Pengamatan Data GPS 2016-2017 guna Mengetahui Aktivitas Seismik. *Jurnal Spasial*, Volume 6, Nomor 3, 2019: 97-103. <https://doi.org/10.22202/js.v6i3.3993>
- Bird, P. (2003). An Updated digital model of plate boundaries: *Geochemistry, Geophysics, Geosystem*. Vol. 4 No.3, 1027. doi:10.1029/2001GC000252.
- Elenean, K. M. (2003). Focal mechanism and stress tensor inversion of earthquake at and around Nasser Lake, Egypt. *Bull. Fac. Sci., Zagzang University*, 25(1), 77-177.
- Febyani, S., Pradhana, M. F., Rivaldy, M., Syafri, I., Nur, A. A., Embara, P. Nugroho, S. D. (2020). Analisis Kerentanan Gempa Pada Jalur Sesar Baribis Menggunakan Metode Microearthquake (MEQ). *Bulletin Scientific Contribution: GEOLOGY*, 18(1), 1-12.
- Gudmundsson, A. (2020). Volcanic Earthquakes. In *Volcanotectonics: Understanding the Structure, Deformation and Dynamics of Volcanoes* (pp. 179-223). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139176217.005>
- Handari, Kevin. (2013). Persamaan dan Rumus Dalam Diagram Mohr. ITSB.
- Ibrahim, G. dan Subarjo. (2005). Pengetahuan Seismologi: Badan Meteorologi dan Geofisika. Jakarta.
- Ismawati, T. (2011). Mekanisme Fokus Gempa bumi Mentawai. *Skripsi*. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- Kusnanto, A.R. (2015). Struktur Sesar Mendatar Semangko Pulau Sumatra. Bandung: Universitas Padjajaran.
- Lasitha, S., Radhakrishna, M., and Sanu, T.D. (2006). Seismically Active Deformation in the Sumatra – Java Trench-arc region: Geodynamic Implications, *Current Science*, 90, No. 5
- Linda, I. N., Palloan, P. (2019). Analisis Distribusi Special Dan Temporal Seismotektonik Berdasarkan Nilai b-value dengan Menggunakan Metode Likelihood Di Pulau Jawa. *Sains dan Pendidikan Fisika*, 15(1), 16-13, 2548-6373
- Madlazim. (2013). Kajian Awal Tentang b-Value Gempa Bumi di Sumatra. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya*, 3(1), 41-46
- Madlazim. (2015). Buku Fisika Bumi Seri Seismologi. Surabaya. Unipress UNESA.
- Mauzy, J., Cornet, F.H. & Dorbath, L. (2013). A review of methods for determining stress fields from earthquake focal mechanisms: application to the Sierentz 1980 seismic crisis (Upper Rhine graben). *Bull. Soc. Geol. France*. 188(4–5), 319-344
- Mubarok, Fathul. A. (2017). Estimasi Momen Tensor Dan Pola Bidang Sesar Amerika Serikat Pada Tahun 2016-2017 Dengan Inversi Waveform Tiga Komponen Dengan Program Isola. *Tugas Akhir*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Mustafa, Badrul. (2010). Analisis Gempa Nias dan Gempa Sumatra Barat dan Kesamaannya yang Tidak Menimbulkan Tsunami. *Jurnal Ilmu Fisika*, 2(1), 44-50
- Natawidjaja, D. H. (2002). Neotectonics of the Sumatra Fault and Paleogeodesy of the Sumatra Subduction Zone. *Thesis*. California Institute of Technology Pasadena. California.
- Rahadian, Ade. (2011). Peta Tektonik Sumatra.
- Sammuel, E. R., Hendrasto, F., Adhitama, R., (2020). Analisis Hubungan antara Intensitas Rekahan dengan Struktur Geologi Daerah Cipanas, Kabupaten Lebak, Provinsi Banten. *Journal of Geoscience Engineering & Energy*, 1(2), 129-140.
- Simanjuntak, A. V. H, Olymphina. (2017). Perbandingan Energi Gempa Bumi Utama dan Susulan (Studi Kasus Gempa Subduksi Sumatra dan Pulau Jawa). *Jurnal Fisika FLUX*, 14(1), 19-26.
- Sinaga, Sry. S, Awaluddin, M. Sabri, L. M. (2020). Analisis Deformasi Koseismik Gempa Nias 3 Juni 2019 Menggunakan Data CORS BIG dan SuGAR. *Jurnal Geodesi Undip*, 9(4), 12-21.
- Soetomo, James. (2013). Persamaan Lingkaran Mohr Pada Problem General. Jakarta.
- Tamril, F., Kurniawan, D. C., Apriyanti, L. O., Mahzuro, L. T., Andriani, R., Putri, M. Y., Putri, W., YY, Nur, A., Harimanando, Zahra, V. D., Rahmata, Y., Edial, H. (2020). Indikasi Struktur Geologi Melalui Rekahan dan Retakan Bangunan Pada Zona Sesar.
- Vavrycuk, V. (2011a). Principal earthquake: Theory and observation from the 2008 West Bohemia swarm, *Earth planet. Sci. Lett.*, 305, 290-296.
- Vavrycuk, V. (2011b). Tensile earthquake: Theory, modeling and inversion, *Geophys. J. Int*
- Vavrycuk, V. (2014). Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms. *Geophys. J. Int*. 199, 69-77.
- Vavrycuk, V. (2015). Earthquake mechanism, and stress field. *Enclopedia of Earthquake Engineering*, https://doi.org/10.1007/978-3-642-36197-5_295-1
- Vavrycuk, V. (2019). Stressinverse. User guide.
- Wardani, Ni, N. S. K., Suarbawa, K. N., Kusnandar, R. (2021). Penentuan Jenis Sesar Pada Gempa Bumi Lombok Tanggal 1 Juli Sampai 3 Desember 2018 Menggunakan Metode Mekanisme Fokus. *Buletin Fisika*, 22(2), 91-96.