

Pemodelan Penunjaman Zona Seismik Menggunakan Data Gempabumi Di Daerah Gorontalo dan Sekitarnya

Seismic Subduction Zone Modeling Based on Earthquake Data in Gorontalo and Surrounding Areas

Moh. Ramdan Lipoeto¹, Dewa Gede Eka Setiawan^{1*}, Icha Untari Meidji¹, Meilan Demulawa¹, Harsano Jayadi²

¹ Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Gorontalo, Gorontalo, Indonesia 96119

² Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tadulako, Palu, Sulawesi Tengah, Indonesia 94148

Email: ramdanliputo8@gmail.com; *dewaeka@ung.ac.id; ichautarimeiji10@gmail.com; meilan.demulawa@ung.ac.id; harsanoj@gmail.com

Received: 04th May 2025; Revised: 16th May 2025; Accepted: 17th May 2025

Abstrak – Wilayah Gorontalo terletak pada zona tektonik aktif sehingga memiliki tingkat aktivitas seismik yang tinggi. Pemahaman mengenai geometri zona subduksi di wilayah ini penting untuk penilaian bahaya gempabumi dan upaya mitigasi bencana. Penelitian ini memodelkan sudut dan kedalaman penunjaman slab subduksi di bawah permukaan wilayah Gorontalo menggunakan data gempabumi dari katalog USGS periode 1994 hingga 2024. Analisis dilakukan dengan metode irisan vertikal (cross-section) yang membagi wilayah studi menjadi tiga segmen, yaitu A, B, dan C. Setiap segmen dianalisis menggunakan regresi polinomial untuk menentukan pola penunjaman subduksi. Hasil menunjukkan bahwa zona megathrust berada pada kedalaman < 50 km, sedangkan zona benioff menjangkau hingga 300 km. Sudut penunjaman yang diperoleh adalah $49,01^{\circ}$ - $59,09^{\circ}$ pada Segmen A, $6,49^{\circ}$ - $71,76^{\circ}$ pada Segmen B, dan $19,87^{\circ}$ - $58,15^{\circ}$ pada Segmen C. Hasil ini menunjukkan variasi geometri subduksi yang mencerminkan kompleksitas tektonik wilayah Gorontalo.

Kata kunci: Subduksi; sudut penunjaman; gempabumi; Gorontalo; seismik.

Abstract – The Gorontalo region is located in an active tectonic zone, so it has a high level of seismic activity. Understanding the geometry of the subduction zone in this region is important for assessing earthquake hazards and disaster mitigation efforts. This study models the angle and depth of subduction of the subduction plate beneath the surface of the Gorontalo region using earthquake data from the USGS catalog from 1994 to 2024. The analysis was carried out using the vertical section method (cross-section), which divides the study area into three segments, namely A, B, and C. Each segment was analyzed using polynomial regression to determine the subduction pattern. The results show that the megathrust zone is at a depth of < 50 km, while the Benioff zone reaches up to 300 km. The obtained subduction angles are 49.01° - 59.09° in Segment A, 6.49° - 71.76° in Segment B, and 19.87° - 58.15° in Segment C. These results show variations in subduction geometry that reflect the tectonic complexity of the Gorontalo region.

Keywords: Subduction; dipping angle; earthquake; Gorontalo; seismic.

1. Pendahuluan

Indonesia rawan gempa karena berada di zona Cincin Api Pasifik [1]. Sulawesi adalah salah satu wilayah di Indonesia yang rentan terhadap gempabumi [2]. Pada 28 September 2018 gempa di Sulawesi menarik perhatian nasional dan internasional karena dampaknya yang luas, dengan 2.256 korban jiwa di 4 wilayah terdampak menurut data BNPB [3]. Pulau ini memiliki kondisi geologi dan tektonik yang rumit, terlihat dari bentuknya yang menyerupai huruf K [4]. Kompleksitas ini muncul akibat interaksi antara tiga

lempeng utama: Lempeng Indo-Australia yang bergerak ke utara, Lempeng Pasifik yang bergerak ke barat, dan Lempeng Eurasia yang bergerak ke arah selatan-tenggara, serta adanya pengaruh dari Lempeng Filipina [5]. Kondisi ini menjadikan wilayah Pulau Sulawesi sebagai daerah tektonik aktif dengan tingkat seismisitas yang tinggi sehingga secara langsung wilayah Gorontalo mengalami pergerakan lempeng yang aktif pula [6]. Tektonik Sulawesi didominasi oleh beberapa sesar mendatar sinistral besar, salah satunya Sesar Gorontalo [7].

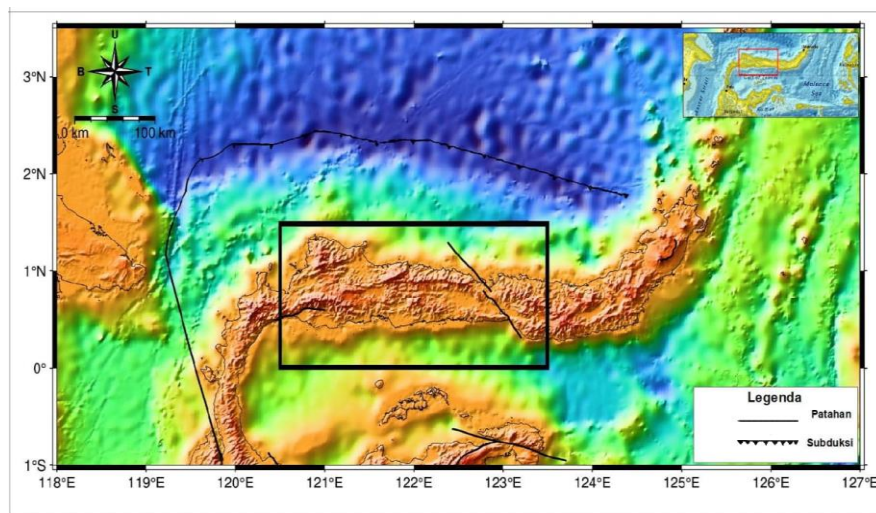
Gorontalo adalah salah satu daerah yang rentan terhadap bencana gempa bumi [8]. Daerah Gorontalo memiliki sistem tektonik yang kompleks karena terletak di semenanjung utara pulau Sulawesi [9]. Dari sudut pandang geologi, terdapat struktur sesar yang melintasi wilayah kota Gorontalo dan juga melewati Danau Limboto [10]. Kondisi ini menyebabkan area tektonik di Sulawesi, khususnya di Gorontalo, mengalami aktivitas lempeng yang signifikan. Patahan-patahan ini juga berdampak pada aktivitas seismik, seperti Patahan Palu-Koro yang memengaruhi Lengan Barat Daya Sulawesi dan Patahan Gorontalo yang memengaruhi Lengan Utara. Selain itu, terdapat pula model subduksi, seperti subduksi di Laut Sulawesi yang terletak di sebelah utara wilayah tersebut [4].

Menurut Efendi dkk (2021), beberapa wilayah yang perlu diwaspadai adalah titik pertemuan atau persimpangan antar sesar, yang menjadi *area* dengan potensi tinggi untuk terjadinya gempa besar. Namun, studi mengenai zona subduksi di Gorontalo masih sangat jarang, meskipun daerah ini memiliki peluang tinggi terkait terjadinya gempa bumi. Pentingnya menganalisis zona seismik tidak hanya untuk memahami dinamika lempeng tektonik, akan tetapi juga untuk mengurangi resiko bencana yang dapat diakibatkan oleh aktivitas gempa bumi [11]. Oleh karena itu, untuk meningkatkan kesadaran akan bencana geologi berupa gempa bumi, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pola seismisitas yang terjadi di Gorontalo dan sekitarnya.

Banyak metode dapat digunakan untuk menganalisis zona seismik, salah satu metode yang dapat digunakan adalah metode segmen irisan vertikal (*cross section*). Dengan menggunakan metode segmen irisan vertikal (*vertical cross-section*) dapat diketahui arah subduksi lempeng, kedalaman hiposenter, dan jarak hiposenter terhadap titik awal lintasan, serta persebaran gempa bumi [12]. Dibandingkan dengan metode lain, metode ini memiliki kelebihan dalam memberikan visualisasi yang lebih jelas terkait zona subduksi, termasuk sudut penunjaman. Metode ini memungkinkan pengamatan lebih detail terhadap distribusi gempa dan lapisan bawah permukaan dibandingkan metode lain. Penelitian ini bertujuan untuk membuat peta seismisitas dan model zona subduksi di wilayah Gorontalo dan sekitarnya berdasarkan data gempa bumi dari *United States Geological Survey* (USGS) untuk periode 1994-2024, dengan hanya mempertimbangkan gempa bumi bermagnitudo ≥ 3 Mw.

2. Metode Penelitian

Peta penelitian ini berada di wilayah Gorontalo dan sekitarnya, dengan fokus pada zona seismik bawah permukaan pada koordinat $0^{\circ}00'$ LS - $1,5^{\circ}00'$ LU dan $120,5^{\circ}00'$ BT - $123,5^{\circ}00'$ BT. Pemetaan wilayah penelitian dapat dilihat pada Gambar 1, yang bersumber dari USGS.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian.

Pada penelitian ini telah digunakan berbagai macam aplikasi serta data untuk memudahkan penulis dalam melakukan analisis. Data dan perangkat lunak ialah a) **Katalog gempabumi**: (waktu kejadian, lintang, bujur, kedalaman serta magnitudo) pada periode 1994-2024 dari USGS, b) **Microsoft Excel**: digunakan untuk menginput data dan mengelola data gempabumi, c) **Arcgis**: perangkat lunak untuk membuat layout peta lokasi, d) **Generic Mapping Tool (GMT)**: sebuah perangkat lunak berbasis script yang digunakan untuk pemetaan distribusi gempa, penempatan stasiun, dan cross-section, dan e) **Visual studio code (VSC)**: perangkat lunak ini digunakan untuk mengedit dan memodifikasi script pada GMT.

Adapun tahapan dari penelitian ini ialah:

- a. **Akuisisi data**, Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data katalog Gempabumi yang mencakup periode waktu cukup panjang, yaitu dari tahun 1994 hingga 2024. Data tersebut mencakup informasi mengenai Gempabumi dengan magnitudo lebih besar dari 3 Mw, sehingga hanya mencakup gempa yang signifikan dalam skala tertentu. Sumber utama data ini adalah *United States Geological Survey (USGS)*, sebuah lembaga terpercaya yang secara konsisten merekam dan menyediakan data Gempabumi global. Informasi yang diperoleh dari katalog ini meliputi berbagai parameter penting, seperti waktu terjadinya gempa, besar magnitudo, kedalaman hiposenter, serta lokasi gempa dalam koordinat lintang dan bujur. Dengan informasi ini, analisis terhadap pola dan karakteristik gempa dapat dilakukan secara lebih mendalam.
- b. **Pengolahan data**, Pada penelitian ini informasi penting yang digunakan meliputi koordinat lintang dan bujur, kedalaman hiposenter, serta nilai magnitudo. Dalam pembuatan peta, data gempa diolah secara visual dengan simbol yang dibedakan ukurannya berdasarkan magnitudo dan warna berdasarkan kedalaman hiposenter: merah untuk gempa dangkal (< 80 km), kuning untuk gempa menengah (80-300 km), dan hijau untuk gempa dalam (> 300 km) [13]. Selanjutnya, model zona subduksi dikonstruksi dengan membagi wilayah penelitian menjadi tiga irisan vertikal yang mengikuti arah sesar Gorontalo dan zona subduksi sebagaimana terlihat pada peta seismisitas. Proses ini menggunakan perangkat lunak *Generic Mapping Tools (GMT)* versi 6.4 untuk menentukan lintasan irisan yang ditarik tegak lurus terhadap arah penunjaman. Data gempa dalam setiap irisan meliputi kedalaman hiposenter, magnitudo, dan jarak terhadap titik awal lintasan diekstraksi dan dipetakan dalam hubungan antara kedalaman dan jarak horizontal guna menganalisis struktur subduksi secara rinci. Model yang dihasilkan menggambarkan geometri zona subduksi, termasuk sudut penunjaman dan distribusi gempa berdasarkan kedalaman, serta pola interaksi lempeng yang khas di setiap irisan. Dengan pendekatan sistematis ini, penelitian diharapkan mampu memberikan pemahaman komprehensif terhadap dinamika bawah permukaan wilayah Gorontalo yang berguna untuk kajian ilmiah dan mitigasi risiko bencana.
- c. **Pemodelan zona subduksi**, pemodelan zona subduksi dilakukan menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel* dengan memanfaatkan data input dari irisan vertikal yang telah dibuat di *software GMT*, yang diproses lebih lanjut dengan bantuan *visual studio code*. Data yang digunakan dalam pemodelan ini meliputi jarak antara lingkaran gempa terhadap garis irisan vertikal, serta kedalaman hiposenter gempa yang menggambarkan pola penunjaman subduksi. Setelah pemodelan penunjaman subduksi selesai dibuat di *Microsoft Excel*, hasilnya digabungkan dengan model penunjaman zona subduksi yang diperoleh dari *software GMT*. Kedua model ini memiliki skala yang sama, sehingga penggabungan gambar dari kedua sumber tersebut menghasilkan model subduksi yang lebih akurat dan komprehensif. Persamaan berikut tegak lurus pada zona subduksi yaitu:

$$Ax + by + c = 0 \quad (1)$$

Persamaan garis dapat ditentukan dengan menggunakan dua titik yang terletak pada garis lurus sejajar dengan garis trench. Setelah persamaan garis lurus ini diketahui, jarak episenter ke garis tersebut dapat dihitung menggunakan rumus empiris Persamaan (2) dan (3).

$$\frac{aX_1 + bY_1 + C}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (2)$$

Dan

$$D = d \times 111 \text{ km} \quad (3)$$

Hubungan antara jarak dan kedalaman bisa dianalisis menggunakan metode *least square* untuk mengetahui persamaan dari parabola, dengan jumlah dari orde diferensinya sama dengan 0, seperti Persamaan (4).

$$Y = A + BX + CX^2 \quad (4)$$

Untuk memperoleh nilai A, B, dan C dapat digunakan persamaan *Gauss*. Analisis besar sudut penunjaman subduksi didapatkan dari Persamaan (5).

$$\tan a = Y' = B + 2CX \quad (5)$$

Persamaan (5) masih bernilai radian. Untuk itu perlu mengubahnya dalam bentuk derajat dengan menggunakan Persamaan (6).

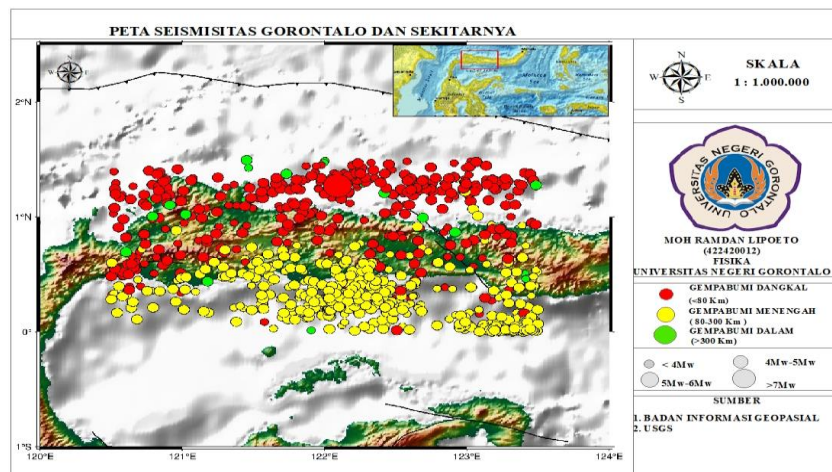
$$\text{Arctan}(Y') = \tan^{-1}(Y') \quad (6)$$

- d. *Analisis dan interpretasi data*, melakukan analisis dan interpretasi terhadap irisan vertikal A-A', B-B', dan C-C'. Interpretasi yang dilakukan dengan melihat model subduksi serta penunjamannya terhadap letak kedalaman zona *megathrust* dan zona *benioff* yang ditinjau dengan informasi tektonik dan keadaan geologi wilayah Gorontalo.

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1 Distribusi gempa wilayah penelitian

Peta distribusi gempabumi sering kali disebut juga peta seismitas yang merupakan peta untuk digunakan sebagai pemberian informasi kejadian gempabumi di suatu wilayah. Pada penelitian ini, peta distribusi gempabumi dibuat menggunakan *software Generic Mapping Tools* (GMT) dengan menggunakan data masukan berupa lintang, bujur, kedalaman, dan magnitudo. Jumlah data gempabumi pada periode 1994-2024 dari website USGS sebanyak 898 data kejadian gempabumi di Wilayah Gorontalo dan sekitarnya dengan magnitudo > 3 Mw dan kedalaman $0 - < 700$ km. Peta seismisitas diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta seismitas Wilayah Gorontalo dan sekitarnya.

Gambar 2 menunjukkan tingkat seismisitas yang tinggi di sepanjang Provinsi Gorontalo hingga bagian Utara Laut Sulawesi. Hal ini mengindikasikan adanya struktur tektonik aktif yang mempengaruhi distribusi aktivitas gempa di wilayah tersebut. Sebaran gempa di wilayah ini terdiri dari gempa dangkal, menengah, hingga dalam, dengan distribusi yang bervariasi pada setiap zona. Menurut Bulu dkk, (2020) Gempabumi dibagi menjadi tiga berdasarkan kedalaman hiposenternya: dangkal (< 60 km), sedang (60-300 km), dan dalam (> 300 km) [13]. Gempabumi dangkal ditunjukkan dengan lingkaran merah terdistribusi luas di Gorontalo. Aktivitas gempa dangkal ini kemungkinan besar disebabkan oleh interaksi lempeng dengan Lengan Utara Pulau Sulawesi, yang menghasilkan zona subduksi aktif atau dikenal sebagai zona *megathrust*. Tumbukan ini juga menyebabkan terjadinya aktivitas sesar, yang dapat mengakibatkan dampak bahaya yang cukup besar di Lengan Utara Pulau Sulawesi [14]. Salah satunya sesar Gorontalo yang berdampak besar wilayah penelitian. Gempabumi menengah ditandai dengan

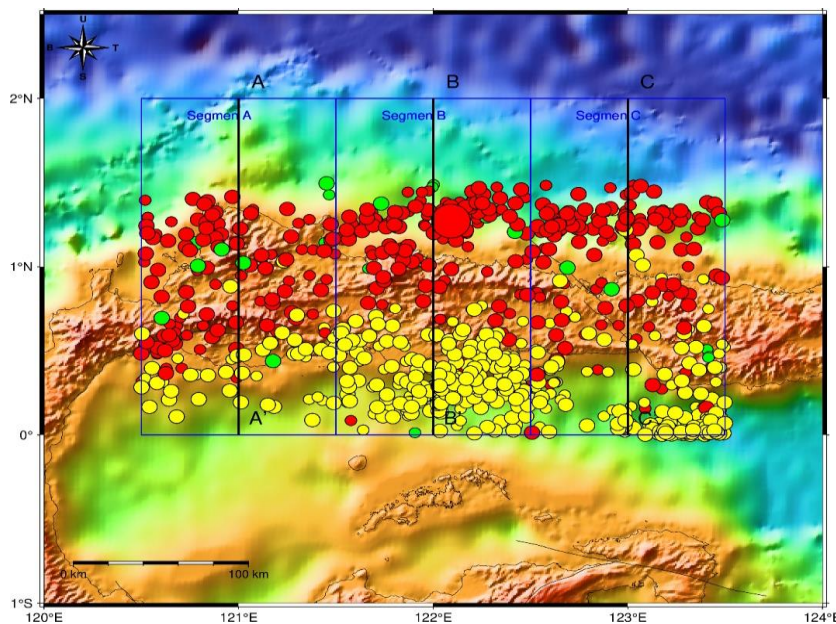
lingkaran kuning tersebar cukup merata di wilayah tengah dan selatan Gorontalo. Hal ini mengindikasikan adanya proses tektonik yang berkelanjutan di kedalaman menengah akibat aktivitas subduksi. Gempabumi dalam ditunjukkan dengan lingkaran hijau, dimana gempa ini relatif jarang terjadi dibandingkan dengan gempa dangkal dan menengah. Namun, distribusinya di beberapa titik tertentu menunjukkan adanya aktivitas pada kedalaman yang berkaitan dengan penyusupan lempeng yang lebih dalam.

Secara keseluruhan, pola seismisitas ini mencerminkan dinamika tektonik kompleks yang terjadi akibat interaksi lempeng di wilayah Gorontalo dan sekitarnya. Penelitian ini berkesuaian dengan apa yang diteliti oleh Santoso dan Soemi [14].

3.2 Pembagian cross section

Pembagian segmen irisan vertikal ditampilkan pada gambar 2 yang dibuat menggunakan *software* GMT. Dalam penelitian ini, wilayah studi dibagi menjadi tiga segmen irisan vertikal dengan ukuran yang sama. Irisan vertikal dibuat memanjang ke arah utara-selatan, tegak lurus terhadap zona subduksi, untuk mengidentifikasi pola penunjaman yang terjadi.

Pembagian wilayah menjadi tiga segmen bertujuan untuk memahami model subduksi di setiap irisan serta mengidentifikasi keberadaan struktur geologi di area penelitian. Segmen A dengan irisan A-A' melintasi Laut Sulawesi, Gorontalo, dan sebagian Teluk Tomini. Segmen B dengan irisan B-B' juga melewati Laut Sulawesi, Gorontalo, dan sebagian Teluk Tomini. Sementara itu, Segmen C dengan irisan C-C' mencakup Gorontalo Laut Sulawesi, sebagian Teluk Tomini serta terdapat sesar pada segmen ini.



Gambar 3. Pembagian *cross section*.

Pembagian koordinat segmen *cross section* ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Koordinat pembagian *cross section*.

Segmen	Bujur	Lintang	Lebar (km)	Panjang (km)
A	120,5°E-121,5°E	0°S-2°U	100	222
B	121,5°E-122,5°E	0°S-2°U	100	222
C	122,5°E-123,5°E	0°S-2°U	100	222

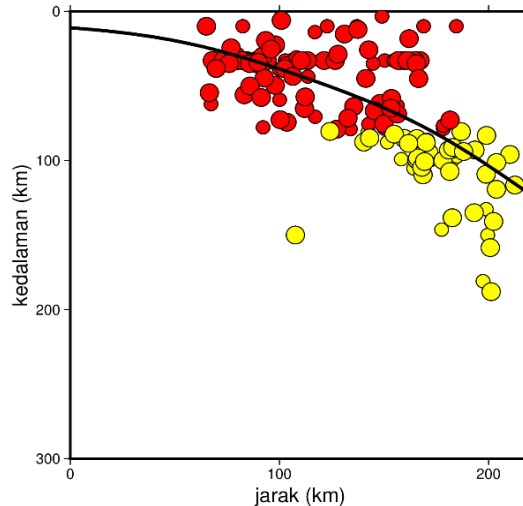
Tabel 1 menunjukkan bahwa tiap-tiap segmen *cross section* (A, B, dan C) memiliki panjang dan lebar yang sama, yaitu panjang 222 km dan lebar 100 km. Segmen A memiliki koordinat bujur 120,5°E hingga 121,5°E dan lintang 0°S hingga 2°U. Begitu juga dengan segmen B, yang memiliki koordinat bujur 121,5°E hingga 122,5°E dan lintang 0°S hingga 2°U, serta segmen C dengan koordinat bujur 122,5°E

hingga 123,5°E dan lintang 0°S hingga 2°U. Semua segmen tersebut memiliki lebar 100 km dan panjang 222 km, yang berarti setiap segmen meliputi area dengan dimensi yang sama.

3.3 Pemodelan zona subduksi

3.3.1 Segmen irisan vertikal A-A'

Gambar 4 di bawah ini menunjukkan bagaimana arah penunjaman lempeng pada Segmen A, dengan melihat hubungan antara kedalaman gempa dan jaraknya dari garis irisan vertikal.



Gambar 4. Model penunjaman subduksi segmen A.

Gambar 4 memperlihatkan hubungan jarak episenter (dalam satuan km) terhadap kedalaman (dalam satuan km) berdasarkan garis irisan vertikal. Diduga bahwa penunjaman subduksi pada Segmen A mencapai kedalaman < 200 km. Jarak penunjaman subduksi dari segmen A diduga < 250 km dari garis awal segmen irisan.

Untuk mengetahui besar sudut penunjaman digunakan persamaan polinomial pada *software Microsoft Excel*, sehingga didapatkan nilai koefisien dari A, B, dan C dari model subduksi Segmen A adalah -278,02, 3,2821, dan -0,0124. Nilai koefisien tersebut disubstitusikan ke Persamaan (4) diperoleh:

$$Y = -278,02 + 3,2821X - 0,0124X^2$$

Kemudian persamaan tersebut diturunkan kedalam turunan pertama, sehingga digunakan Persamaan (5), yaitu:

$$Y' = 3,2821 + 2(-0,0124)X$$

Nilai A dalam bentuk radian kemudian dikonversikan menjadi bentuk sudut. Proses konversi ini dilakukan dengan menggunakan Persamaan (6) yang dapat dilihat hasil koversinya pada Tabel 2.

Tabel 2. Penunjaman subduksi.

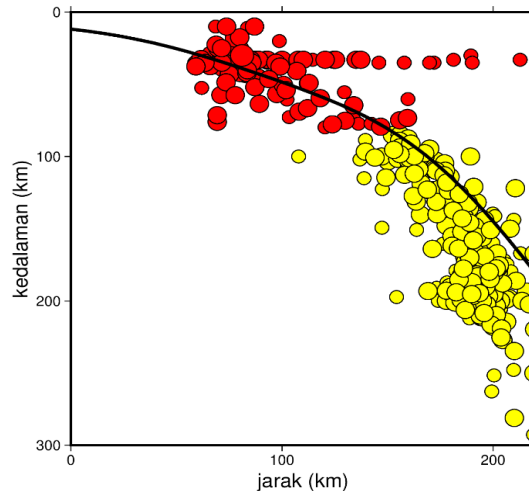
Kedalaman (km)	Jarak (km)	Sudut (°)	Y'
50	85,931535	49,01	1,15101
100	171,906	44,45	0,981169
150	199,594	59,09	1,667843

Perhitungan nilai sudut dilakukan dengan interval kedalaman 50 km. Dari Tabel 2, dapat diketahui bahwa semakin dalam penunjaman subduksi maka semakin besar juga sudut penunjaman subduksi. Pada kedalaman 50 km, sudut penunjaman menunjukkan penunjaman yang cukup curam. Hal ini memberikan pendugaan bahwa pada kedalaman 50 km sudah tergolong zona *megathrust* dengan sudut penunjaman 49,01°, hingga < 100 km dan pada kedalaman > 100 km dengan penunjaman 44,49°, hingga kedalaman 150 dengan sudut penunjaman 59,09°, termasuk zona *benioff*.

Pendugaan tersebut berdasarkan Lowre, William (2007), bahwa pada sudut 30 - 60°, zona tersebut diasumsikan sebagai zona *benioff* [15].

3.3.2 Segmen irisan vertikal B-B'

Gambar 5 di bawah ini menunjukkan bagaimana arah penunjaman lempeng pada Segmen B, dengan melihat hubungan antara kedalaman gempa dan jaraknya dari garis irisan vertikal.



Gambar 5. Model penunjaman subduksi Segmen B.

Pada Gambar 5 memperlihatkan hubungan jarak episenter (dalam satuan km) terhadap kedalaman (dalam satuan km) berdasarkan garis irisan vertikal. Diduga bahwa penunjaman subduksi pada segmen B mencapai kedalaman < 300 km. Jarak penunjaman subduksi dari Segmen B diduga < 250 km dari garis awal segmen irisan.

Untuk mengetahui besar sudut penunjaman digunakan persamaan polinomial pada *software Microsoft Excel*, sehingga didapatkan nilai koefisien A, B, dan C dari model subduksi Segmen B adalah -171,12, 2,3616, dan -0,0123. Nilai koefisien tersebut disubstitusikan ke dalam Persamaan (4) diperoleh:

$$Y = -171,12 + 2,3616X - 0,0123X^2$$

Kemudian persamaan tersebut diturunkan kedalam turunan pertama dengan menggunakan Persamaan (5), yaitu:

$$Y' = 2,3616 + 2(-0,0123)X$$

Nilai A dalam bentuk radian kemudian dikonversikan menjadi bentuk sudut. Proses konversi ini dilakukan dengan menggunakan Persamaan (6) dan hasil konversinya dituliskan pada Tabel 3.

Tabel 3. Penunjaman subduksi.

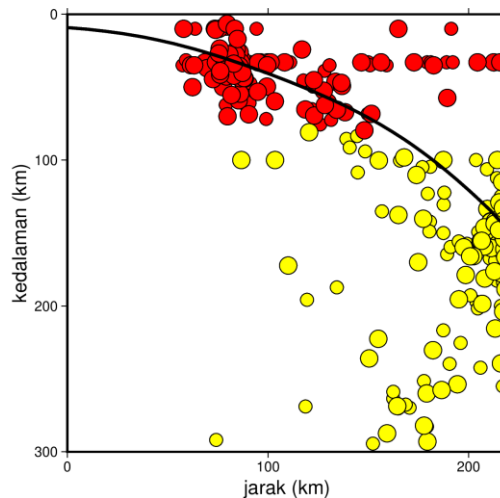
Kedalaman (km)	Jarak (km)	Sudut (°)	Y'
50	100,6311	6,49	0,113925
100	165,7918	59,78	1,716877
150	208,0459	70,05	2,756329
200	213,7167	70,94	2,895831
250	219,3878	71,76	3,03534

Perhitungan sudut subduksi dilakukan dengan interval kedalaman 50 km yang terlihat pada tabel 3. Dari perhitungan yang dilakukan, pada kedalaman 50 km, sudut penunjaman subduksi sebesar 6,49°. Hal ini memberikan pendugaan bahwa kedalaman < 50 km, pada Segmen B sudah menunjukkan keberadaan zona *megathrust*. Ini memberikan asumsi bahwa zona *benioff* pada Segmen B termasuk penunjaman yang curam pada kedalaman < 100 km dengan sudut penunjaman 59,78°. Begitupun, pada kedalaman 150, 200, dan 250 km dengan jarak 208,04, 213,71, dan 219,4 km

memiliki sudut berturut-turut sebesar $70,05^\circ$, $70,94^\circ$, dan $71,76^\circ$. Semakin besar sudut, maka semakin curam penunjaman subduksi tersebut.

3.3.3 Segmen irisan vertical C-C'

Gambar 6 di bawah ini menunjukkan bagaimana arah penunjaman lempeng pada Segmen C, dengan melihat hubungan antara kedalaman gempa dan jaraknya dari garis irisan vertikal.



Gambar 6. Model penunjaman subduksi Segmen C.

Pada Gambar 6 memperlihatkan hubungan jarak episenter (km) terhadap kedalaman (km) berdasarkan garis irisan vertikal. Diduga bahwa penunjaman subduksi pada Segmen C mencapai kedalaman 150 km. Jarak penunjaman subduksi dari Segmen C diduga < 250 km dari garis awal segmen irisan. Untuk mengetahui besar sudut penunjaman digunakan persamaan polinomial pada *software Microsoft Excel*, sehingga didapatkan nilai koefisien A, B, dan C dari model subduksi Segmen C adalah -120,29, 2,4988, dan -0,0123. Nilai koefisien tersebut disubstitusikan ke dalam Persamaan (4) diperoleh:

$$Y = -120,29 + 2,4988X - 0,0057X^2$$

Kemudian persamaan tersebut diturunkan kedalam turunan pertama dengan menggunakan Persamaan (5), yaitu:

$$Y' = 2,4988 + 2(-0,0057)X$$

Nilai A dalam bentuk radian kemudian dikonversikan menjadi bentuk sudut. Proses konversi ini dilakukan dengan menggunakan Persamaan (6) dan hasil konversinya dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Penunjaman subduksi.

Kedalaman (km)	Jarak (km)	Sudut ($^\circ$)	Y'
50	77,9465	58,1582	1,61021
100	103,52256	52,8249	1,31864
150	187,47456	19,8797	0,36159

Pada Tabel 4, perhitungan sudut subduksi dilakukan dengan interval kedalaman setiap 50 km. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada kedalaman 50 km, sudut kemiringan mencapai sekitar $58,15^\circ$, yang mencerminkan bidang subduksi yang sangat curam. Di kedalaman 100 km, sudutnya sedikit berkurang menjadi $52,82^\circ$, dan semakin mendatar pada kedalaman 150 km dengan sudut sekitar $19,87^\circ$.

Secara umum, zona *megathrust* biasanya berada pada kedalaman 0-60 km dan memiliki sudut kemiringan yang relatif landai, berkisar antara 10° - 30° . Namun, pada hasil ini, sudut yang sangat curam

pada kedalaman 50 km mengindikasikan bahwa zona *megathrust* di wilayah ini kemungkinan sempit atau bahkan telah mengalami peralihan menuju zona *Benioff*. Zona *Benioff* sendiri merupakan area aktivitas gempa yang lebih dalam dan curam, biasanya dimulai dari kedalaman lebih dari 60 km. Zona *megathrust* diperkirakan terletak pada jarak 300-360 km dengan kedalaman kurang dari 60 km, sementara zona *Benioff* mulai berkembang pada jarak sekitar 300 km dengan kedalaman lebih dari 60 km, ditandai oleh sudut kemiringan antara 19°-52°, yang mencerminkan arah penunjaman lempeng samudra ke dalam mantel Bumi.

Keberadaan Sesar Gorontalo pada Segmen C turut memengaruhi pola deformasi dan seismisitas di wilayah ini. Sebagai salah satu struktur tektonik aktif di bagian utara Pulau Sulawesi, Sesar Gorontalo berperan penting dalam mengakomodasi deformasi akibat interaksi antara Lempeng Laut Sulawesi dan Lempeng Eurasia. Keberadaan sesar ini memperumit sistem subduksi karena selain memengaruhi arah dan sudut penunjaman lempeng, juga berkontribusi terhadap tegangan lokal yang dapat memicu aktivitas gempa. Sudut kemiringan yang curam sejak kedalaman dangkal, dapat disebabkan oleh gangguan struktural akibat sesar tersebut. Jalur sesar Gorontalo tersebut menimbulkan gempabumi yang sangat besar, sehingga dikhawatirkan ketika terjadi gempa akan terjadi amplifikasi yang nantinya menimbulkan likuifaksi besar-besaran dan mengakibatkan bangunan mengalami kerusakan [9]. Menurut Murtianto Semakin dangkal gempa, semakin besar pula daya rusaknya [16].

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan di atas, dapat disimpulkan bahwa zona subduksi di wilayah Gorontalo menunjukkan variasi geometri penunjaman yang mencerminkan kompleksitas tektonik daerah tersebut. Melalui analisis irisan vertikal pada tiga segmen (A, B, dan C), ditemukan bahwa zona *megathrust* berada pada kedalaman < 50 km, sedangkan zona *benioff* mencapai kedalaman hingga 300 km. Sudut penunjaman bervariasi pada tiap segmen, yaitu 49,01°-59,09° di Segmen A, 6,49°-71,76° di Segmen B, dan 19,87°-58,15° di Segmen C. Perbedaan sudut dan kedalaman ini dipengaruhi oleh faktor tektonik lokal seperti keberadaan sesar aktif, terutama Sesar Gorontalo, yang turut memperumit pola penunjaman lempeng. Temuan ini memberikan gambaran lebih rinci mengenai dinamika seismik bawah permukaan Gorontalo dan penting untuk mendukung upaya mitigasi bencana gempabumi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing atas bimbingan dan arahan selama penelitian ini, serta kepada dosen penguji yang telah memberikan masukan yang membangun. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh dosen di Jurusan Fisika Universitas Negeri Gorontalo atas ilmu dan dukungannya selama masa studi.

Pustaka

- [1] C. Swastikawati, M. A. Pamoengkas, and A. C. Wahyudi, "Penerapan Data Sains Untuk Klasifikasi Wilayah Yang Terdampak Kerusakan Gempabumi Dengan Metode C.45," vol. 7, no. 2, 2024.
- [2] G. Pasau and A. Tanauma, "PEMODELAN SUMBER GEMPA DI WILAYAH SULAWESI UTARA SEBAGAI UPAYA MITIGASI BENCANA GEMPABUMI," *JIS*, vol. 15, no. 1, p. 202, Oct. 2011, doi: 10.35799/jis.11.2.2011.208.
- [3] A. M. M. Huda and N. K. El Ridho, "ANALISIS SEISMISITAS SULAWESI BERDASARKAN DATA KEGEMPAAN PERIODE 2008-2018," *petro.j.ene.techno.*, vol. 1, no. 2, pp. 34–43, Oct. 2019, doi: 10.58267/petrogas.v1i2.26.
- [4] I. U. Meidji *et al.*, "Analyzing Seismicity Pattern of the Gorontalo Region and Its Surroundings in the Form of Hypocenter Relocation Using Double Difference Method," *jppipa, pendidikan ipa, fisika, biologi, kimia*, vol. 9, no. 10, pp. 8581–8587, Oct. 2023, doi: 10.29303/jppipa.v9i10.5400.
- [5] H. D. Rachmadhan, J. H. M. Djaya, and H. E. S. Adam, "POTENSI GEOWISATA BERBASIS KENAMPAKAN TANJUNG DAN FENOMENA SHEETING JOINT TANJUNG LELAPIDE PULAU SANGIHE SULAWESI UTARA," vol. 02, no. 01.

- [6] A. Agustiawati, I. B. H. Mei, and M. Si, “STUDI B-VALUE UNTUK ANALISIS SEISMISITAS BERDASARKAN DATA GEMPABUMI PERIODE 1904-2014 (Studi Kasus: Gorontalo)”.
- [7] A. Wahyuni, “ANALISIS SEISMISITAS SULAWESI BARATBERDASARKAN DATA GEMPA 1967-202,” 2021.
- [8] S. Nurrahmi, “ANALISIS SEISMISITAS GEMPABUMI SEDANG DI WILAYAH SULAWESI PADA BULAN FEBRUARI 2022 MENGGUNAKAN ANALISA SEISCOMP3,” vol. 2, 2022.
- [9] M. Demulawa and I. Daruwati, “ANALISIS FREKUENSI NATURAL DAN POTENSI AMPLIFIKASI MENGGUNAKAN METODE HVSR (Studi Kasus: Kampus 4 Universitas Negeri Gorontalo),” vol. 10, no. 1.
- [10] . N., G. Pasau, and S. S. Raharjo, “Identifikasi Sesar di Wilayah Gorontalo dengan Analisis Mekanisme Bola Fokus,” *JM*, vol. 3, no. 1, p. 40, Mar. 2014, doi: 10.35799/jm.3.1.2014.3905.
- [11] H. A. Efendi, G. I. Marliyani, and S. Pramumijoyo, “Recent faulting along Gorontalo fault based on seismicity data analysis and lineament mapping,” *E3S Web Conf.*, vol. 325, p. 01013, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202132501013.
- [12] A. Z. Ramadhanty, A. Febrianty, A. M. Utomo, and A. Widodo, “IDENTIFIKASI DAN KARAKTERISASI GEMPA INTRASLAB DI PULAU JAWA 2017-2021 DENGAN METODE SEGMENT IRISAN VERTIKAL (STUDI KASUS GEMPA INTRASLAB TASIKMALAYA),” *JGE*, vol. 10, no. 3, pp. 178–190, Nov. 2024, doi: 10.23960/jge.v10i3.341.
- [13] D. Bulu and B. Hendrawanto, “PENENTUAN TITIK EPICENTER DAN HYPOCENTER SERTA PARAMETER MAGNITUDE GEMPABUMI BERDASARKAN DATA SEISMOGRAM,” vol. 3, 2020.
- [14] Santoso and A. Soehami, “Analisis Bahaya Gempabumi Lengan Utara Sulawesi.,” *JSDG*, 20, 2010.
- [15] L. W, *Fundamentals of Geophysics*, Second Edition. USA: Cambridge University Press., 2007.
- [16] H. Murtianto, “POTENSI KERUSAKAN GEMPABUMI AKIBAT PERGERAKAN PATAHAN SUMATERA DI SUMATERA BARAT DAN SEKITARNYA,” *Jurnal Pendidikan Geografi*, vol. 10, no. 1, Mar. 2016, doi: 10.17509/gea.v10i1.1667.