

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Struktur internal Bumi ditandai oleh adanya perubahan sifat fisik material yang tercermin pada variasi kecepatan gelombang seismik terhadap kedalaman. Salah satu ciri utama struktur mantel adalah keberadaan diskontinuitas seismik pada kedalaman sekitar 410 km dan 660 km, yang membatasi Zona Transisi Mantel (MTZ). Diskontinuitas ini berkaitan dengan transisi fase mineral mantel akibat peningkatan tekanan dan temperatur, sehingga sangat sensitif terhadap kondisi termal dan dinamika mantel Bumi (Bina & Helffrich, 1994; Miao, *et al* 2024). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa topografi diskontinuitas 410 km dan 660 km tidak bersifat seragam secara global, melainkan mengalami variasi lateral yang dipengaruhi oleh heterogenitas temperatur, keberadaan slab litosfer, serta proses dinamika mantel (Glišović *et al* ., 2022; Chambers *et al* ., 2005). Oleh karena itu, pemetaan diskontinuitas mantel menjadi penting untuk memahami proses geodinamika di dalam Bumi.

Salah satu metode seismologi yang efektif untuk mengkaji diskontinuitas mantel adalah analisis prekursor gelombang SS. Prekursor SS merupakan fase gelombang pantul dari diskontinuitas mantel yang tiba lebih awal dibandingkan fase SS utama. Keunggulan metode ini terletak pada lokasi titik pantul gelombang (*bounce point*) yang berada di tengah lintasan antara sumber gempa dan stasiun penerima, sehingga memungkinkan pemetaan diskontinuitas mantel pada wilayah yang luas, termasuk daerah yang minim sebaran stasiun seismik (Shearer, 2000; Miao, *et al* , 2019). Dalam pengolahan data prekursor SS, pemisahan sinyal refleksi dari gangguan lain serta peningkatan rasio signal-to-noise merupakan tantangan utama. Metode berbasis Radon Transform, termasuk Slant stack, telah banyak digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut dengan mengeksplorasi perbedaan moveout atau kelengkungan sinyal. Gu dan Sacchi (2009) menunjukkan bahwa metode Radon-based stacking efektif dalam memetakan struktur reflektivitas mantel dan meningkatkan resolusi identifikasi refleksi dari diskontinuitas mantel. Pendekatan analisis prekursor SS juga diterapkan oleh Fahrudin *et al* . (2025) dalam mengidentifikasi diskontinuitas mantel di sekitar Palung Mariana, yang menunjukkan bahwa kombinasi data prekursor SS dan teknik stacking berbasis slowness mampu menentukan lokasi *bounce point* serta kedalaman diskontinuitas mantel secara andal.

Wilayah Pegunungan Himalaya merupakan zona tumbukan benua antara Lempeng India dan Lempeng Eurasia yang memiliki dinamika litosfer dan mantel yang kompleks. Berbeda dengan zona subduksi samudra, deformasi di wilayah collision benua tidak didominasi oleh pembebanan slab ke arah mantel bawah, melainkan oleh penebalan dan pengangkatan litosfer. Kondisi ini berpotensi menghasilkan variasi kedalaman diskontinuitas mantel yang berbeda dibandingkan wilayah subduksi aktif (Yin & Harrison, 2000; Oreshin *et al* ., 2008). Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini

dilakukan untuk menganalisis diskontinuitas mantel di wilayah Pegunungan Himalaya menggunakan data prekursor SS dengan metode *Slant stack* yang berlandaskan konsep Radon Transform, guna memperoleh gambaran kedalaman dan karakteristik diskontinuitas mantel pada zona collision benua.

1.2 Tujuan dan Manfaat

Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengidentifikasi keberadaan fase prekursor SS pada data seismik di wilayah Pegunungan Himalaya.
2. Menganalisis nilai slowness dan ray parameter prekursor SS menggunakan metode *Slant stack*.
3. Menentukan kedalaman diskontinuitas mantel berdasarkan hasil analisis prekursor SS melalui metode interpolasi linier dan raypath
4. Memberikan gambaran karakteristik diskontinuitas mantel pada wilayah Pegunungan Himalaya sebagai zona *collision* benua.

Manfaat

Hasil dari penelitian kemudian diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain:

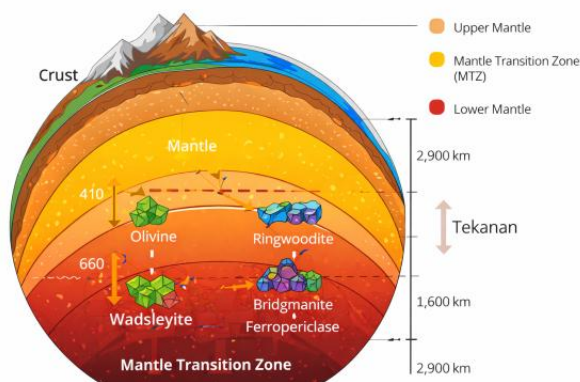
1. Menambah pemahaman mengenai struktur diskontinuitas mantel, khususnya di wilayah *collision* benua seperti Pegunungan Himalaya.
2. Memberikan kontribusi ilmiah dalam penerapan metode prekursor SS dan *Slant stack* untuk studi struktur mantel Bumi.
3. Menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan analisis gelombang seismik, prekursor SS, dan diskontinuitas mantel.

1.3 Landasan Teori

1. Struktur Mantel Bumi dan Diskontinuitas Mantel

Mantel Bumi merupakan lapisan yang terletak di antara kerak dan inti Bumi, dengan ketebalan sekitar 2.900 km. Berdasarkan variasi kecepatan gelombang seismik terhadap kedalaman, mantel dibagi menjadi mantel atas, zona transisi mantel (*Zona Transisi Mantel*), dan mantel bawah. Zona transisi mantel dibatasi oleh dua diskontinuitas utama, yaitu diskontinuitas pada kedalaman sekitar 410 km dan 660 km. (Bissig, *et al* , 2022)

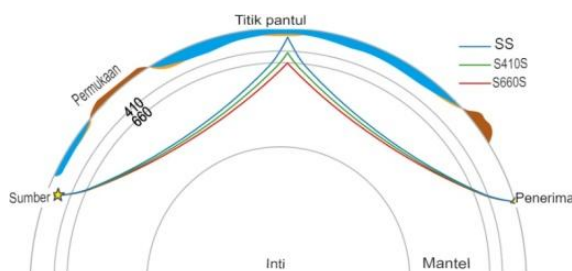
Diskontinuitas 410 km berasosiasi dengan perubahan fase mineral olivin menjadi wadsleyite, sedangkan diskontinuitas 660 km berkaitan dengan transformasi fase ringwoodite menjadi bridgmanite dan ferropericlasite. Perubahan fase ini menyebabkan peningkatan densitas dan kecepatan gelombang seismik secara signifikan. Kedalaman kedua diskontinuitas tersebut sangat sensitif terhadap kondisi temperatur dan tekanan, sehingga variasinya dapat mencerminkan dinamika termal dan mekanik mantel. (Bina & Helffrich, 1994; Zhou, *et al* , 2022).



Gambar 1. Visualisasi kondisi lapisan bumi

2. Gelombang SS dan Prekursor SS

Gelombang SS merupakan gelombang geser yang mengalami satu kali pemantulan di permukaan Bumi sebelum direkam oleh stasiun seismik. Selain fase SS utama, sering teramati fase-fase awal yang disebut prekursor SS, yang berasal dari pemantulan gelombang pada diskontinuitas mantel seperti 410 km dan 660 km (Shearer, 2000; Deuss, 2009).



Gambar 2. Raypath fase SS Prekursor diskontinuitas 410 dan 660. (Wang *et al* ., 2022)

Prekursor SS memiliki amplitudo yang relatif kecil dan sering tertutupi oleh noise atau fase lain. Namun, keunggulan metode ini adalah lokasi titik pantul (*bounce point*) yang berada di tengah lintasan antara sumber gempa dan stasiun penerima, sehingga memungkinkan pemetaan diskontinuitas mantel pada wilayah yang luas, termasuk daerah dengan keterbatasan stasiun seismik (Deuss, 2009; Wei & Shearer, 2017)

3. Ray Parameter dan Ray Tracing

Dalam pendekatan ray theory, rambatan gelombang seismik direpresentasikan sebagai lintasan sinar (*ray path*) yang mengikuti prinsip waktu tempuh minimum (*Fermat's principle*). Untuk medium berlapis dengan kecepatan yang bergantung pada kedalaman, lintasan ray mengikuti hukum Snell, yang menyatakan bahwa perbandingan antara sinus sudut datang terhadap kecepatan gelombang bersifat konstan sepanjang lintasan rambat. Besaran konstan ini dikenal sebagai *ray parameter* (p) atau *slowness horizontal*, yang secara matematis dinyatakan sebagai:

$$p = \frac{\sin i}{v(z)} \quad (1)$$

di mana i adalah sudut datang ray terhadap arah vertikal dan v adalah kecepatan gelombang seismik terhadap kedalaman. Ray parameter merepresentasikan kemiringan lintasan ray dan menentukan seberapa besar komponen horizontal rambatan gelombang. Nilai p konstan sepanjang lintasan ray meskipun kecepatan medium berubah, sehingga menjadi parameter fundamental dalam analisis moveout dan pemodelan lintasan gelombang (Aki & Richards, 2002; Triyoso et.al. 2024).

4. Ray Tracing

Ray tracing merupakan metode untuk menentukan lintasan rambat gelombang seismik berdasarkan model kecepatan medium. Asakawa dan Kawanaka (1993) menunjukkan bahwa lintasan ray dan waktu tempuh gelombang dapat dihitung secara efisien dengan menggunakan interpolasi linier waktu tempuh (*linear traveltime interpolation*). Pendekatan ini memungkinkan estimasi waktu tempuh pada titik-titik yang tidak secara langsung dihitung, sehingga mempermudah pemodelan rambatan gelombang dalam medium berlapis.

Berdasarkan definisi ray parameter, hubungan antara perubahan jarak horizontal x dan kedalaman z dapat dituliskan sebagai:

$$\frac{dx}{dz} = \frac{pv(z)}{\sqrt{1 - p^2v^2(z)}} \quad (2)$$

Sedangkan hubungan waktu tempuh terhadap kedalaman diberikan oleh:

$$\frac{dt}{dz} = \frac{1}{v(z)\sqrt{1 - p^2v^2(z)}} \quad (3)$$

Kedua persamaan ini merupakan dasar dari metode ray tracing dalam medium berlapis dan digunakan untuk menghitung lintasan ray serta waktu tempuh gelombang seismik dari sumber ke titik refleksi dan kembali ke permukaan (Asakawa & Kawanaka, 1993).

Metode ray tracing berbasis interpolasi waktu tempuh ini banyak digunakan dalam analisis seismik karena bersifat sederhana, stabil, dan mampu merepresentasikan hubungan antara ray parameter, lintasan ray, dan waktu tempuh gelombang secara konsisten. Oleh karena itu, konsep ray tracing dan ray parameter menjadi dasar penting dalam analisis fase seismik refleksi, termasuk prekursor gelombang SS

5. Slant Stack

Metode *slowness slant stack* merupakan teknik stacking berbasis *slowness* atau *ray parameter* yang digunakan untuk meningkatkan rasio signal-to-noise pada data seismik. Metode ini merupakan pengembangan dari teknik *delay-and-sum* konvensional yang dilakukan dengan mempertimbangkan perbedaan *moveout fase seismik* terhadap jarak episentral.

Secara matematis, *slowness slant stack* dapat dinyatakan sebagai:

$$D(p, t) = \frac{1}{N} = \sum_{i=1}^N w_i d_i(t + \delta t_i(p)) \quad (4)$$

dengan pergeseran waktu:

$$\delta ti(p) = p(\Delta i - \Delta 0) \quad (5)$$

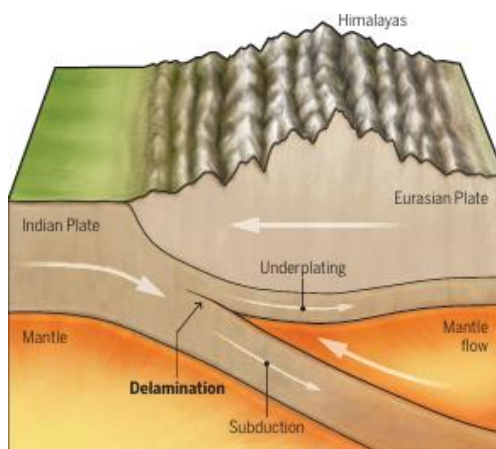
di mana $D(p, t)$ merupakan hasil stacking untuk ray parameter p , $di(t)$ adalah trace seismik ke- i , N adalah jumlah trace, w_i merupakan bobot kualitas trace, dan $\delta ti(p) = p(\Delta i - \Delta 0)$ adalah pergeseran waktu yang bergantung pada ray parameter dan jarak episentral Δi

Jika nilai ray parameter yang digunakan sesuai dengan ray parameter fase seismik target, maka fase tersebut akan sejajar setelah pergeseran waktu dan menghasilkan amplitudo maksimum pada hasil stack. Sebaliknya, jika ray parameter tidak sesuai, fase tidak akan terfokus dan energinya akan teredam. Dengan melakukan perhitungan untuk berbagai nilai ray parameter, diperoleh representasi energi seismik dalam domain waktu–*slowness* yang dikenal sebagai vespa diagram.

Metode *slowness slant stack* banyak digunakan dalam analisis prekursor gelombang SS untuk mengidentifikasi fase refleksi dari diskontinuitas mantel, seperti SS410 dan SS660, serta untuk mengekstraksi nilai ray parameter yang selanjutnya digunakan dalam pemodelan lintasan ray dan penentuan kedalaman diskontinuitas mantel. (Gu & Sacchi, 2009 ; wang , 2023)

6. Zona Collision Benua

Wilayah *collision* benua, seperti Pegunungan Himalaya, memiliki karakteristik geodinamika yang berbeda dibandingkan zona subduksi samudra (Zhao, *et al* 2023). Tidak adanya pembebanan slab samudra yang dingin menyebabkan variasi diskontinuitas mantel di wilayah ini lebih dipengaruhi oleh penebalan litosfer dan dinamika mantel atas. Oleh karena itu, analisis prekursor SS di wilayah *collision* benua menjadi penting untuk memahami respon diskontinuitas mantel terhadap proses tektonik tersebut (Saikia *et al* , 2020; Oreshin *et al* ., 2008).



Gambar 3. Kondisi Tektonik Pegunungan Himalaya(Wei-Haas, 2024)

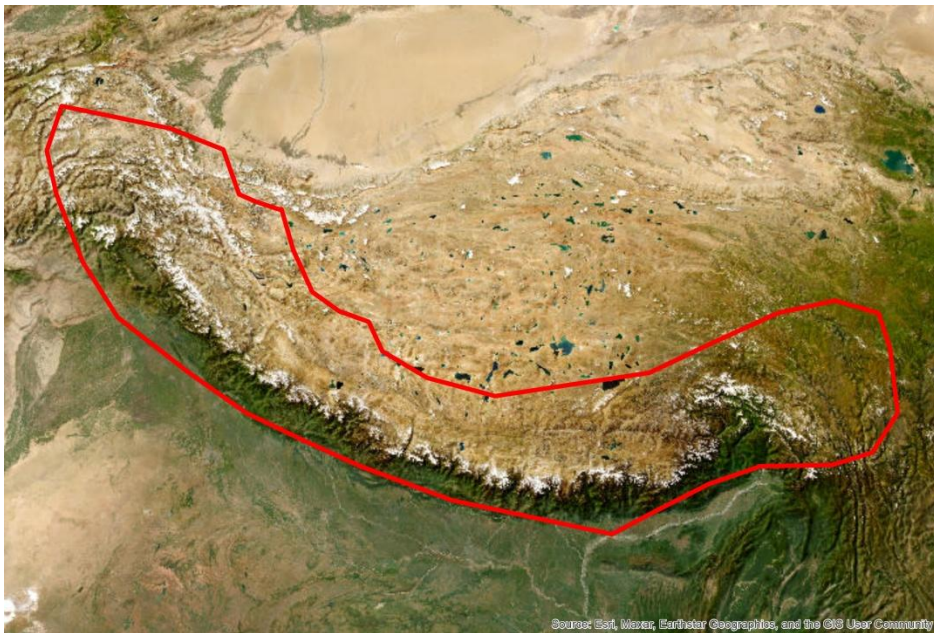
BAB II

METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Wilayah Pegunungan Himalaya merupakan kawasan yang membentang luas di Asia Selatan dan Tengah, mencakup wilayah pertemuan antara Lempeng India dan Lempeng Eurasia. Secara geografis, kawasan ini melintasi beberapa negara, antara lain India, Nepal, Bhutan, Pakistan, dan Tiongkok, serta dicirikan oleh posisi tektonik yang sangat kompleks akibat proses collision benua yang masih aktif hingga saat ini.

Secara morfologi, wilayah Pegunungan Himalaya memiliki topografi yang sangat bervariasi, mulai dari dataran tinggi Tibet, lembah-lembah dalam, hingga rangkaian pegunungan dengan elevasi ekstrem. Variasi topografi dan kondisi geologi tersebut berpengaruh terhadap struktur litosfer dan mantel atas di bawahnya, sehingga menjadikan wilayah ini sebagai lokasi yang penting untuk kajian struktur internal Bumi, khususnya dalam penelitian diskontinuitas mantel menggunakan data gelombang seismik.



Gambar 4. Lokasi Penelitian

2.2 Alat dan Bahan

Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Perangkat Keras
 - a) Laptop
 - b) Kalkulator Ilmiah

2. Perangkat Lunak

- a) ArcGIS
- b) Visual Studio Code
- c) Google Earth Pro
- d) Taup Seismology 2.6.1
- e) Excel

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian kali ini berupa data skunder yang berisi informasi seismogram diantaranya:

3. Data Gelombang seismik

Bahan utama dalam penelitian ini adalah data gelombang seismik tiga komponen yang direkam oleh stasiun seismik global. Data yang digunakan berupa komponen BHN (North–South) dan BHE (East–West), yang selanjutnya diolah dan dirotasi menjadi komponen BHT (Transversal) untuk analisis gelombang geser. Data seismik ini digunakan untuk mengekstraksi fase SS dan prekursor SS yang berkaitan dengan diskontinuitas mantel.

Data seismik diperoleh dari jaringan stasiun seismik global yang dikelola oleh lembaga internasional, sehingga memiliki cakupan wilayah yang luas dan kualitas rekaman yang memadai untuk analisis struktur mantel.

4. Data Katalog Gempa

Penelitian ini menggunakan data katalog gempa bumi global yang mencakup informasi waktu kejadian gempa, lokasi hiposenter (lintang, bujur, dan kedalaman), serta magnitudo gempa. Data katalog ini digunakan untuk memilih kejadian gempa yang memenuhi kriteria analisis gelombang SS, dengan magnitudo minimal 5.8 dan jarak 100-160°(Fahrudin *et al* ., 2017).. Informasi katalog gempa sangat penting untuk menentukan lintasan rambat gelombang, jarak episentral, serta waktu tiba fase SS dan prekursor SS.

5. Model Kecepatan Bumi ak135

Sebagai acuan dalam analisis lintasan gelombang dan perhitungan waktu tiba teoritis, penelitian ini menggunakan model kecepatan Bumi satu dimensi ak135. Model ini menyediakan informasi kecepatan gelombang seismik sebagai fungsi kedalaman dan digunakan dalam penentuan ray parameter, ray tracing, serta estimasi kedalaman diskontinuitas mantel. Model ak135 dipilih karena merupakan salah satu model referensi global yang umum digunakan dalam studi seismologi mantel.

6. Data jarak episentral dan Bounce Point

Data jarak episentral antara sumber gempa dan stasiun seismik digunakan untuk menentukan posisi *bounce point* gelombang SS dan prekursor SS. Informasi ini diperlukan untuk memetakan lokasi lateral diskontinuitas mantel yang disampel oleh gelombang seismik di wilayah penelitian.

2.3 Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari IRIS. Data tersebut mencakup beberapa parameter penting yaitu ,waktu terjadinya

gempa, Koordinat longitude dan latitude sumber gempa, Besaran magnitudo gempa, Jarak episentral gempa dalam deg dan Km, Koordinat latitude dan longitude stasiun, Koordinat latitude dan Longitude Bouce Point, dan waktu tiba SS. Seluruh parameter ini digunakan untuk mengolah data dalam menentukan SS precursor hingga Diskontinuitas. Selain itu, proses pengumpulan data juga dilengkapi dengan studi literatur melalui penelusuran jurnal, buku, dan artikel ilmiah yang relevan. Studi literatur ini bertujuan untuk memperkuat dasar teori serta mendukung analisis yang dilakukan dalam penelitian, sehingga hasil yang diperoleh dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

2.4 Pengolahan Data

Adapun tahap pengolahan data dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak pengolahan seismik, yang meliputi beberapa langkah sebagai berikut:

1. Pengambilan data gempa

Data Penelitian ini dilakukan di wilayah Pegunungan Himalaya dengan memanfaatkan data seismik berupa seismogram dari kejadian gempa bumi regional dan global. Penelitian ini difokuskan pada identifikasi diskontinuitas mantel di bawah wilayah penelitian melalui analisis fase prekursor gelombang SS. Data gempa yang digunakan dipilih berdasarkan kriteria magnitudo $\geq 5,8$ dan kedalaman sumber ≤ 75 km, sehingga diharapkan menghasilkan rekaman gelombang SS dengan kualitas sinyal yang memadai. (Fahrudi. *et al* , 2025)

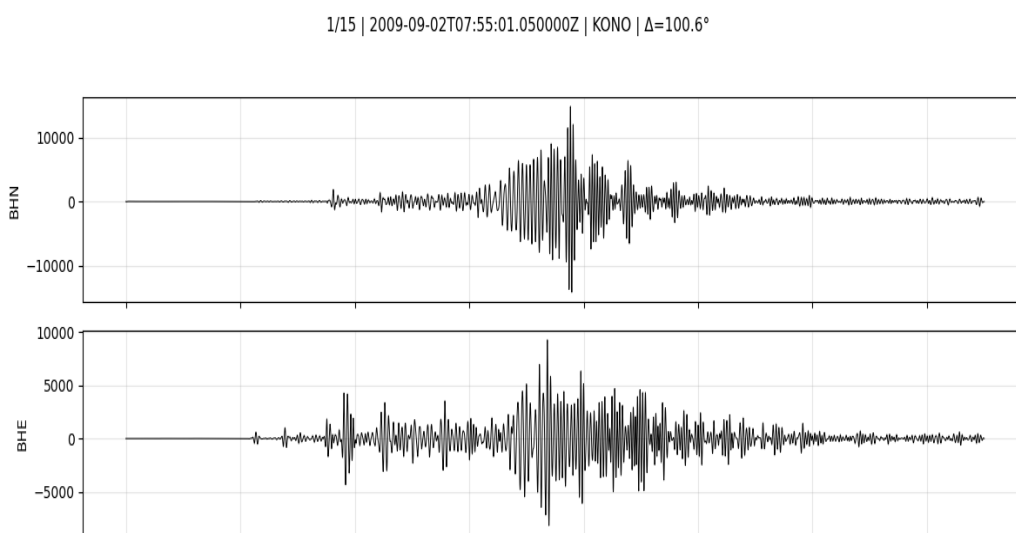
Setiap kejadian gempa yang memenuhi kriteria tersebut dicatat koordinat episenternya beserta lokasi stasiun penerima sinyal. Selanjutnya dilakukan penentuan titik pantul (bounce point) gelombang SS untuk memastikan bahwa lintasan rambat gelombang melintasi wilayah Pegunungan Himalaya. Data seismik kemudian diunduh melalui Visual Studio Code yang terhubung dengan website IRIS untuk memperoleh rekaman seismogram komponen horizontal BHN dan BHE. Secara keseluruhan, penelitian ini menggunakan sejumlah 15 data rekaman seismogram dengan variasi jarak episentral yang sesuai untuk analisis gelombang SS dan prekursor SS. Data yang diperoleh selanjutnya diproses dan dianalisis guna memperjelas keberadaan serta karakteristik fase prekursor SS yang berkaitan dengan diskontinuitas mantel. Informasi mengenai lokasi episenter, stasiun, dan titik pantul gelombang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Daftar Koordinat gempa, stasiun, dan Bounce Point

DATA	Stasiun (Lon)	Stasiun (lat)	Gempa (lon)	Gempa (lat)	BP (lon)	BP (lat)
1.	9.5982	59.6491	107.297	-7.782	78.819	34.7137
2.	32.79356	39.8681	136.484	-2.329	94.113	28.4833
3.	37.2525	-1.1271	141.526	36.164	81.588	26.9996
4.	37.2525	-1.1271	142.317	36.541	81.6977	27.4578
5.	37.2525	-1.1271	143.445	41.824	79.352	31.228
6.	37.2525	-1.1271	143.754	41.892	79.4085	31.3575
7.	30.7382	-0.6019	138.446	37.535	75.6118	29.2147

8.	32.79356	39.8681	141.724	-2.783	97.648	29.5818
9.	11.2203	49.6909	113.931	-10.708	77.023	28.760
10.	32.79356	39.8681	141.943	-3.76	97.761	28.948
11.	11.2203	49.6909	118.467	-8.224	80.716	31.5460
12.	11.2203	49.6909	118.631	-8.207	80.8452	31.601
13.	11.2203	49.6909	120.231	-8.1	82.1045	32.1095
14.	47.229	-19.018	164.07	56.312	82.6848	30.681
15.	147.3204	42.9099	-27.29	47.00	97.2009	31.2141

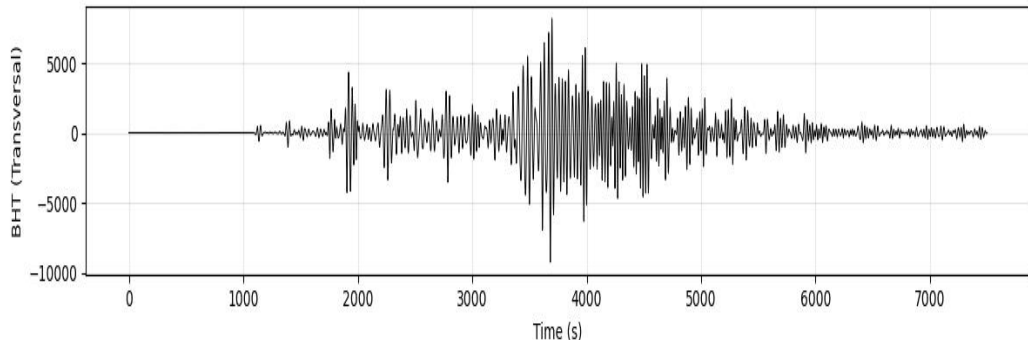
Data yang diperoleh berupa *file* seismogram dengan komponen horizontal berupa komponen *Broadband Horizontal East – West* (BHE) dan *Broadband Horizontal North – South* (BHN) dengan ekstensi Mseed. *File* jenis tersebut kemudian diolah dan dibaca dengan menggunakan aplikasi *Software Visual Studio Code* (VSC). Data inilah nanti yang akan digunakan untuk mencari diskontinuitas 410 dan 660 melalui beberapa tahap. Data ini diseleksi terlebih dahulu melalui quality control yaitu Signal To Noise (SNR) untuk melihat kelayakan data yang akan digunakan. Berikut data seismogram yang diperoleh.



Gambar 5. Data Seismogram BHN dan BHE

2. Rotasi Komponen ke Transversal

Pada penentuan diskontinuitas menggunakan prekursor SS, komponen data seismogram yang digunakan adalah berupa komponen horizontal Utara – Selatan dan komponen horizontal Timur – Barat. Komponen ini kemudian dirotasi ke arah radial dan transversal agar sesuai dengan arah kedatangan gelombang seismik. Hal ini perlu dilakukan agar pengolahan data seismik menjadi lebih akurat (Fahrudin *et al.* , 2017). Berikut hasil Komponen BHT pada gambar 7.



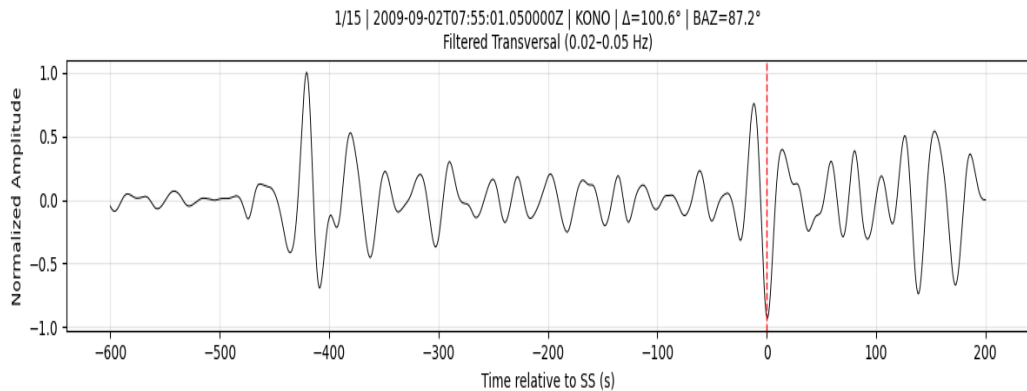
Gambar 6. Komponen BHT

3. Filtering data

Proses Data seismik perlu diolah menggunakan teknik pemrosesan sinyal digital agar mampu menampilkan gambaran struktur bawah permukaan Bumi secara lebih akurat. Secara umum, pemrosesan data seismik terbagi ke dalam tiga tahapan utama, yaitu akuisisi data, pengolahan data, dan interpretasi data seismik (Wood *et al.*, 1975). Tahap pengolahan data seismik mencakup berbagai proses, antara lain dekonvolusi, analisis kecepatan, koreksi normal moveout maupun dip moveout, koreksi statik, penumpukan (stacking), serta migrasi (Wang, 2023).

Salah satu tahapan penting dalam pengolahan data seismik adalah proses penyaringan sinyal (*filtering*). Filtering merupakan teknik dalam pemrosesan sinyal digital yang bertujuan untuk memodifikasi komponen frekuensi suatu sinyal, sehingga gangguan atau noise dapat dikurangi dan kualitas data seismik dapat ditingkatkan (Haque *et al.*, 2019). Secara umum, terdapat tiga jenis filter yang sering digunakan dalam pengolahan data seismik, yaitu *high-pass filter*, *low-pass filter*, dan *band-pass filter*. High-pass filter berfungsi untuk melewatkan sinyal dengan frekuensi tinggi dan meredam sinyal berfrekuensi rendah, sedangkan low-pass filter bekerja sebaliknya dengan melewatkan frekuensi rendah dan menahan frekuensi tinggi. Sementara itu, band-pass filter digunakan untuk melewatkan sinyal pada rentang frekuensi tertentu sesuai dengan karakteristik gelombang yang ingin dianalisis (Hadi, 2012).

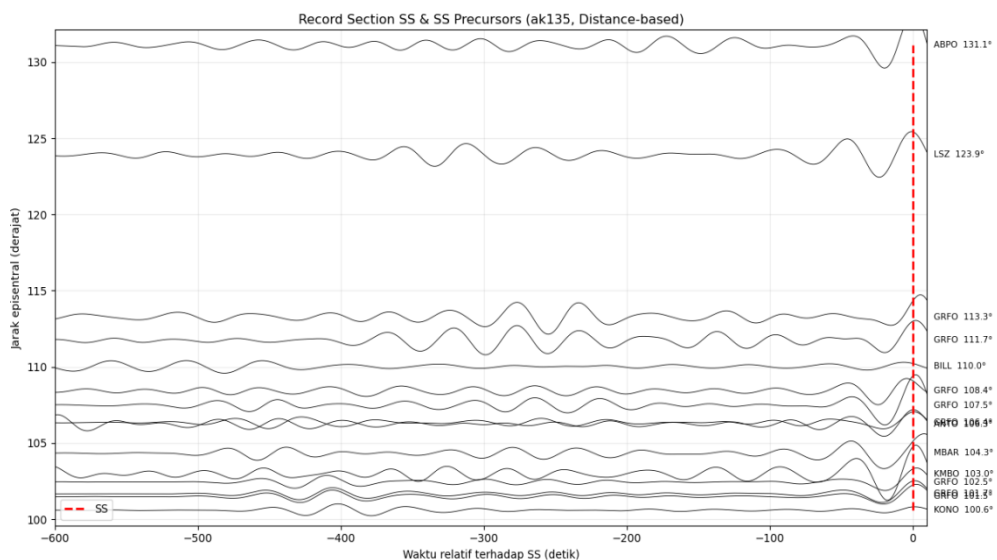
Pada proses *filtering data* digunakan *low pass filter* yang bertujuan untuk menghilangkan noise pada frekuensi yang lebih tinggi dari data asli. Sebelum melakukan penyaringan, data perlu disesuaikan terlebih dahulu dengan memotong seismogram beberapa saat setelah gelombang SS dan mengatur *number of points* (npts) berdasarkan waktu pada seismogram. Setelah di filter, dilanjutkan dengan windowing ke fase SS. Berikut salah satu hasil filter dari data transversal



Gambar 7. Komponen BHT yang telah di Filter dan Windowing ke Fase SS

4. Aligned seluruh data Fase SS ke detik 0

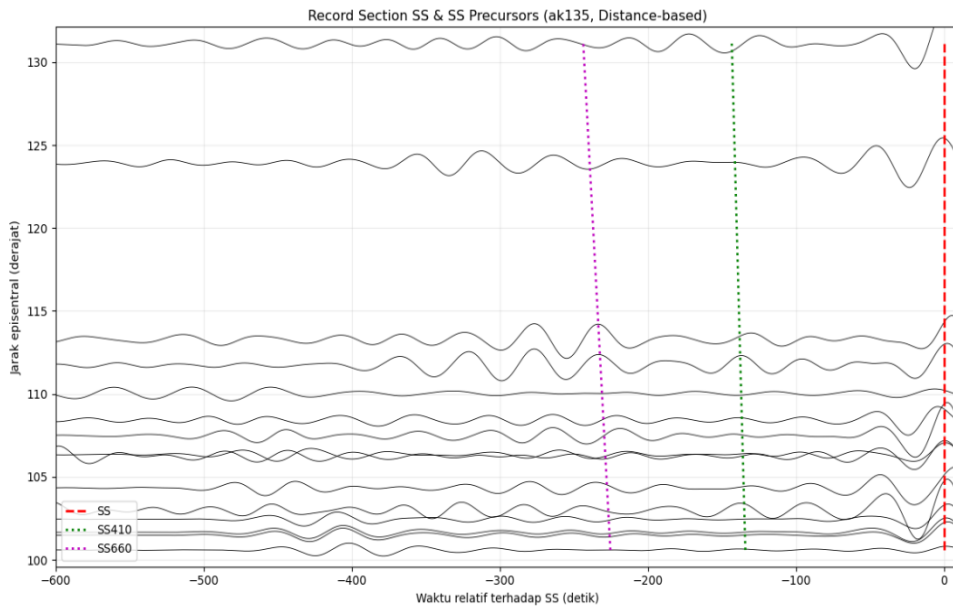
Setelah hasil filtering, kemudian dilakukan penyelerasan fasa SS untuk 15 data yang telah di filter. Seluruh rekaman seismik diselaraskan dengan menjadikan waktu tiba fase SS sebagai waktu nol ($t = 0$). Penyelerasan ini bertujuan untuk menghilangkan perbedaan waktu tiba absolut yang disebabkan oleh variasi waktu origin gempa, jarak episentral, serta heterogenitas struktur kerak dan mantel atas. Dengan menggunakan fase SS sebagai referensi, analisis difokuskan pada perbedaan waktu relatif antara fase SS dan fase prekursor SS, yang secara langsung berkaitan dengan kedalaman reflektor di dalam mantel. Selain itu, penyelerasan ini merupakan langkah penting untuk memastikan konsistensi geometrik antartrace sebelum dilakukan proses stacking dan slowness slant stack, sehingga energi fase prekursor dapat difokuskan secara optimal.



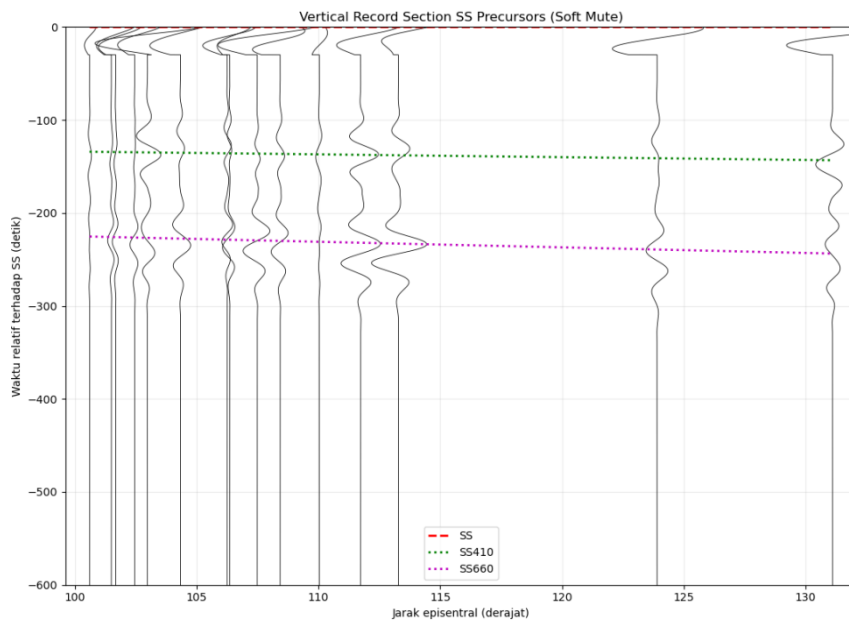
Gambar 8. Hasil Aligned Fase SS di detik 0

5. Prekursor SS

Penentuan Prekursor SS dilakukan melalui pengamatan. Penentuan precursor ini didasarkan pada kajian literatur terkait precursor SS serta terintegrasi dengan pemodelan bumi 1D model ak135. Selanjutnya nilai noise disekitar prekursor diubah menjadi 0 untuk memudahkan pengamatan. Berdasarkan hal tersebut, didapatkan hasil prekursor sebagai berikut.



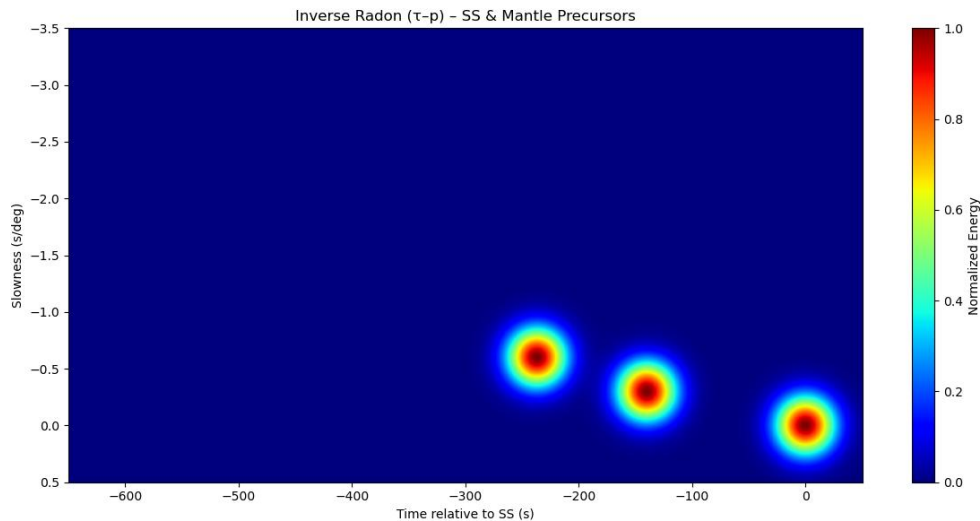
Gambar 9. SS Prekursor



Gambar 10. Nilai Noise dinolkan dan vertikal

6. Slant Stack

Data hasil plotting kemudian diolah agar dapat dibaca menggunakan dengan Slant Stack. Penggunaan Slant Stack pada pengolahan data ini bertujuan untuk mendapatkan nilai kecepatan gelombang (slowness) awal. Berikut merupakan gambar hasil plotting dari SS



Gambar 11. Hasil Slant Stack

7. Ray Parameter

Dari hasil Ini, didapatkan hasil slowness sebesar 0.3 da 0.6 hasil tersebut akan diolah untuk mendapatkan ray tracing. Ray Parameter dihitung menggunakan Taup.

Tabel 2. Ray Parameter data

Dist	Distt (km)	Depth	Name	Time	Ray Param	Slowness
50.3	5593.1	46	S	961.26	13.900	
53.1	5904.56	46	S	999.77	13.600	0.3
54.97	6112.39	46	S	1025	13.400	0.6

8. Ray Tracing

Dalam penelitian ini, pemodelan lintasan gelombang (*ray tracing*) dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak TauP Toolkit. Dari hasil analisis diperoleh dua nilai slowness, yaitu 0,3 s/deg dan 0,6 s/deg. Nilai slowness tersebut selanjutnya digunakan sebagai parameter dalam proses ray tracing untuk menelusuri lintasan rambat gelombang, sehingga memungkinkan identifikasi kedalaman beberapa lapisan diskontinuitas mantel. Untuk setiap titik pantul (*bounce point*), teridentifikasi dua kedalaman diskontinuitas yang merepresentasikan struktur mantel yang berbeda.

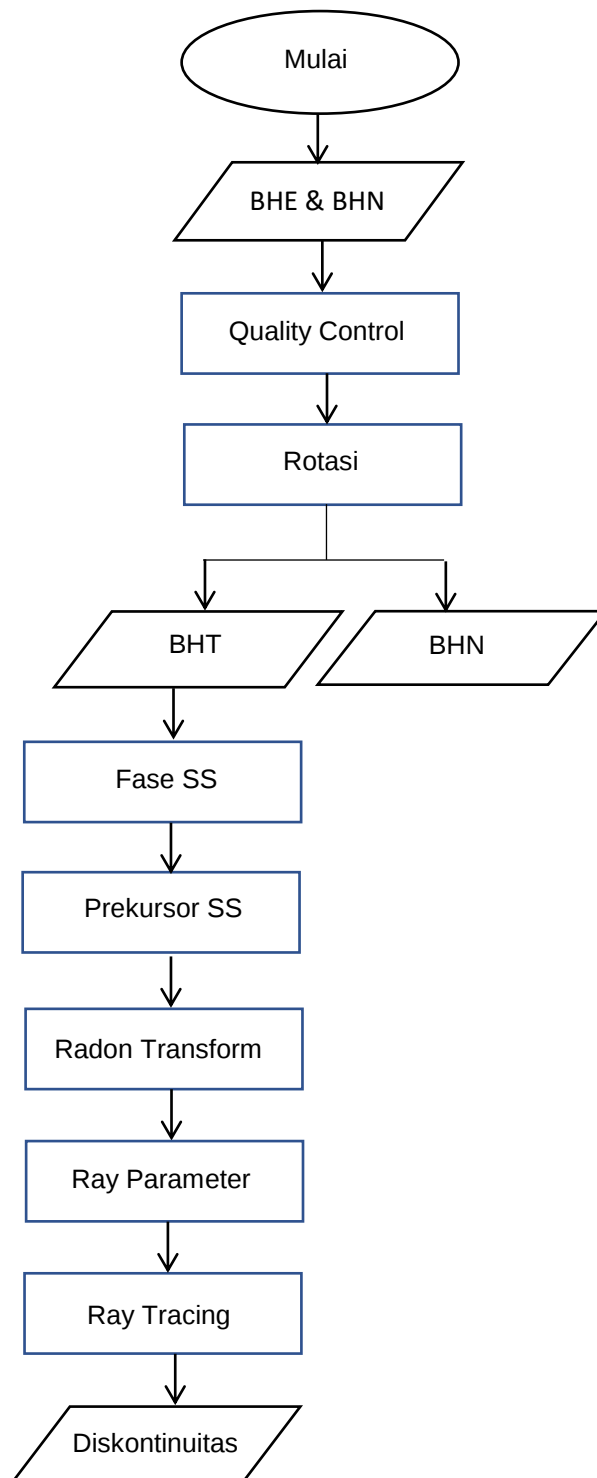
Tahap awal ray tracing difokuskan pada fase SS yang digunakan sebagai fase acuan dalam penelusuran lintasan fase-fase pendahulu (prekursor) SS. Nilai ray parameter untuk fase SS kemudian dikombinasikan dengan selisih ray parameter yang telah

diperoleh sebelumnya, sehingga lintasan prekursor SS dapat dimodelkan secara konsisten.

Tabel 2 menyajikan data yang digunakan dalam proses ray tracing. Data tersebut berkaitan dengan gelombang S atau setengah dari lintasan gelombang SS, yang merepresentasikan jarak rambat sebesar setengah dari jarak episentral antara sumber gempa dan stasiun pengamatan.

Hasil pemodelan ray tracing yang disajikan pada Tabel 3 digunakan untuk mengestimasi kedalaman diskontinuitas mantel di wilayah Pegunungan Himalaya melalui dua pendekatan. Pendekatan pertama dilakukan dengan menggambarkan garis lurus dari titik pantul (bounce point) menuju pusat Bumi, kemudian menentukan kedalaman diskontinuitas berdasarkan titik perpotongan antara garis tersebut dan lintasan ray dari fase prekursor. Pendekatan kedua dilakukan dengan menerapkan metode interpolasi terhadap data hasil ray tracing yang disajikan pada Tabel 4.

2.5 Bagan Alir Penelitian



Gambar 12. Bagan Alir Penelitian