

Karakteristik Atenuasi Gelombang Seismik di Daerah Ternate, Maluku Utara dengan menggunakan Analisis Gelombang Coda

Fatima Marjan Keshia Satriani¹, Titi Anggono² dan Mia Uswatun Hasanah¹

¹Program Studi Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Bandung-Sumedang Km. 21, 45363

²Pusat Riset Kebencanaan Geologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Bandung, Indonesia

*Email: fatima21001@mail.unpad.ac.id

Submit: 24 Februari 2025; Revised: 12 Mei 2025; Accepted: 29 Juli 2025

Abstrak: Maluku Utara memiliki jejak tektonik kompleks yang disebabkan oleh pertemuan Lempeng Filipina, Lempeng Eurasia, Lempeng Australia, dan subduksi ganda antara Lempeng Laut Maluku, Busur Sangihe, dan Busur Halmahera. Potensi bencana tektonik seperti gempa bumi sering terjadi di daerah ini karena aktifnya aktivitas tektonik. Gelombang seismik yang merambat diukur pelemahan dan penguatan amplitudonya menggunakan analisis gelombang coda. Analisis digunakan pada penelitian ini untuk mengkarakterisasi atenuasi gelombang coda yang merambat di daerah Ternate, Maluku Utara, untuk mengetahui aktivitas tektonik daerah penelitian. Nilai atenuasi dan nilai coda yang dihasilkan dari 129 data gempa bumi dari empat stasiun dengan kedalaman di bawah 40 km di Maluku Utara diolah untuk melihat tingkat aktivitas tektonik di daerah Ternate. Stasiun BB06 dan SP28 berlokasi pada Pulau Hiri dan stasiun SP01 dan SP02 berlokasi pada Pulau Ternate. Nilai coda (Q_0), η , Q_c , dan atenuasi (Q_c^{-1}) diperoleh dengan frekuensi sampling 2 – 10 Hz dan panjang jendela 20 – 120 s. Gelombang coda diasumsikan datang dua kali waktu datang gelombang S. Nilai variasi coda (Q_0) diperoleh pada nilai rata-rata 112.167 untuk stasiun SP01, nilai rata-rata 91.071 untuk stasiun SP02, nilai rata-rata 116.089 untuk stasiun SP28, dan nilai rata-rata 112.843 untuk stasiun BB06. Kenaikan dan penurunan nilai terjadi pada panjang jendela 20 – 40 s. Redaman dan Q_c memiliki nilai yang berbanding terbalik. Dengan tingginya nilai redaman di daerah Ternate, maka nilai Q_c dan Q_0 yang diperoleh rendah. Diasumsikan bahwa nilai Q_0 rendah (<200), nilai eta (ν) tinggi (>1), dan redaman tinggi (Q_c^{-1}) merupakan indikasi tingginya aktivitas tektonik di wilayah Ternate, Maluku Utara. Penelitian dapat digunakan untuk menilai bahaya dari kebencanaan seismik.

Kata kunci: Coda-Q, Atenuasi, Maluku Utara, Ternate

Abstract: The convergence of the Philippine Plate, the Eurasian Plate, the Australian Plate, and the double subduction between the Molucca Sea Plate, the Sangihe Through, and the Halmahera Through have created a complex tectonic setting in North Maluku. Due to intense tectonic activity, this region frequently experiences the possibility of tectonic events like earthquakes. In the attenuation seismology approach, seismic waves propagating below the surface are measured

for amplitude amplification and attenuation. Seismic wave attenuation propagating in this region is described using the coda attenuation method on coda seismic waves, to evaluate its tectonic activity. In order to determine the degree of tectonic activity in the Ternate region, 129 earthquake data points from four sites in North Maluku that were less than 40 kilometers deep were processed. Stations SP01 and SP02 are situated on Ternate Island, whereas stations BB06 and SP28 are situated on Hiri Island. A sampling frequency of 2 – 10 Hz and a window length of 20 – 120 s were used to get values of the coda (Q_0), η , Q_c , and attenuation (Q_c^{-1}). Two times the S-wave's arrival time is assumed for the coda wave. The coda variation values (Q_0) were recorded as follows: an average of 112.167 for station SP01, 91.071 for station SP02, 116.089 for station SP28, and 112.43 for station BB06. The value increases and decreases within the 20 – 40 s range. The values of attenuation and (Q_0) are inversely related. The Q_0 and Q_c values obtained are low due to the high damping value in the Ternate area. The high damping (Q_c^{-1}), high eta (η) value (>1), and low Q_0 value (<200) are thought to be signs of strong tectonic activity in the Ternate, North Maluku region

Keywords: Coda-Q, Attenuation, North Maluku, Ternate

1 PENDAHULUAN

Maluku Utara merupakan sebuah pulau yang berada di sebelah timur dari Kepulauan Republik Negara Indonesia. Secara geografis, Pulau Maluku Utara terbentuk karena pertemuan lempeng besar, Lempeng Filipina, Lempeng Eurasia, Lempeng Australia (Ipranta dan Irzon, 2019; Mutaqin dkk., 2021; Wajedy dkk., 2024). Maluku Utara merupakan wilayah dikelilingi oleh Busur Sangihe serta Halmahera, Palung Filipina, Patahan Sorong, dan Palung Papua Nugini. Terdapat subduksi ganda pada Lempeng Laut Maluku yang ditampilkan pada Gambar 1, menggambarkan Lempeng Laut Maluku tersubduksi oleh Busur Halmahera dan Busur Sangihe dari dua arah, ke arah timur ke Busur Halmahera, dan arah barat ke Busur Sangihe. Bentuk subduksi ini sekarang dikenal sebagai Collision Zone Laut Maluku, dengan subduksi Busur Sangihe lebih cepat dibandingkan Busur Hal-

mahera (Hamilton, 1979; Bock dkk., 2003; Hermanto, 2024; Yuliatmoko dan Kurniawan, 2019). Zona Koalisi Laut Maluku memiliki nilai gravitasi yang rendah sehingga sering terjadi fenomena gempa bumi (Adii dkk., 2021). Zona tumbukan atau subduksi di Laut Maluku sebelumnya merupakan busur gunung api aktif, subduksi yang kompleks, dan cekungan. Kompleksitas kondisi tektonik ini membuat daerah Ternate menjadi daerah dengan aktivitas seismisitas yang tinggi yang menyebabkan bencana gempa bumi (Ulfi-ana dkk., 2020; Amarda dan Syafriani, 2021).

Daerah tektonik aktif, lempeng-lempeng bumi bergerak, menghasilkan fenomena gempa bumi yang menjadi sumber utama gelombang seismik yang dihasilkan dari pelepasan energi akibat pergerakan lempeng. Gelombang seismik yang terekam oleh stasiun karena adanya getaran gempa bumi umumnya terdiri dari gelombang primer dan gelombang sekunder. Gelombang primer (P) merupakan gelombang yang pertama kali muncul saat gelombang seismik terekam di stasiun yang kemudian disusul oleh gelombang sekunder (S) setelahnya. Bagian akhir dari rekaman gelombang seismik disebut sebagai gelombang coda. Gelombang coda muncul sebagai respon dari struktur medium bawah bumi yang kompleks seperti batas lapisan batuan atau zona patahan yang menyebabkan energi gelombang seismik terpantulkan, tersebar, dan terhamburkan (atenuasi) dalam medium bumi. Gelombang ini menggambarkan kemungkinan penghamburan/penurunan amplitudo gelombang primer saat merambat di bawah permukaan bumi (Sato dan Fehler, 1998; Akinci dkk., 2020). Gelombang coda dari sebuah gempa bumi lokal dapat didefinisikan sebagai hamburan balik dari gelombang- S (Aki, 1980; Biescas dkk., 2007). Gelombang atenuasi coda dapat membantu melihat bahaya tektonik dengan melihat penurunan amplitudo gelombang seismik seiring dengan kenaikan jarak penjalaran dari sumber ke stasiun perekam (Ma'hood dan Hamzehloo, 2009). Kompleksitas dari suatu medium atau topografi akan meningkat ketika dekat dengan permukaan dan menurun ketika menjauhi permukaan (Akinci dkk., 1995; Kumar dkk., 2005). Parameter yang mengukur perubahan perambatan dari sebuah gelombang seismik pada suatu medium bawah permukaan adalah faktor kualitas atau parameter Q . Faktor kualitas (Q) adalah nilai rasio energi perambatan gelombang seismik dengan penurunan energi gelombang seismik (Sharma dan Mitra, 2018). Pada gelombang coda, peluruhan amplitudo saat gelombang coda merambat di medium bawah permukaan ditulis dengan parameter Q_c atau faktor kualitas gelombang coda. Faktor kualitas gelombang coda lebih sensitif terhadap struktur kecil atau anomali lokal pada medium bawah permukaan. Nilai Q_c yang rendah umumnya menunjukkan sebuah medium bawah permukaan yang lebih kompleks dengan indikasi aktivitas tektonik yang tinggi, berkebalikan dengan nilai Q_c yang tinggi. Faktor kualitas coda ini berbanding terbalik dengan nilai atenuasi coda (Q_c^{-1}) atau nilai peluruhan gelombang coda yang merambat di bawah permukaan (Aki dan Chouet, 1975; Akamatsu, 1980; Biescas dkk., 2007; Sharma dan Mitra, 2018). Atenuasi coda (Q_c^{-1}) dan faktor kualitas coda (Q_c) sudah banyak digunakan pada banyak bagian di dunia untuk penelitian pada wilayah dengan aktivitas tektonik yang tinggi yang memiliki banyak kebencanaan tektonik seperti gempa bumi, gunung meletus, dan sebagainya (Sato dan Fehler, 1998).

Aki dan Chouet (1975) dalam Anggono dkk. (2023) me-

nyebutkan penggunaan gelombang coda yang digunakan di akhir seismogram pada sebuah gempa lokal untuk memperkirakan faktor kualitas coda atau Q_c . Nilai faktor kualitas yang terukur dari peluruhan amplitudo coda cukup besar ketika medium yang dilalui oleh gelombang memiliki heterogenitas yang rendah. Amplitudo gelombang coda dalam bentuk fungsi dari frekuensi dan waktu pada sebuah gempa lokal dapat ditulis dalam persamaan (Aki dan Chouet, 1975; Sharma dan Mitra, 2018; Anggono dkk., 2023).

$$A(f, t) = S(f)t^{-\beta}e^{-\frac{\pi ft}{Q_c}} \quad (1)$$

Parameter $A(f, t)$ merepresentasikan amplitudo gelombang coda pada waktu t dan frekuensi f . Parameter $S(f)$ merepresentasikan faktor dari sumber coda atau awal muncul gelombang coda, dan parameter β merupakan parameter dari penyebaran geometris gelombang seismik, parameter ini bernilai 1 untuk hamburan pada gelombang badan. Parameter Q_c adalah kualitas faktor gelombang coda yang bergantung kepada nilai frekuensi yang dituliskan dengan (Aki dan Chouet, 1975; Sharma dan Mitra, 2018; Anggono dkk., 2023).

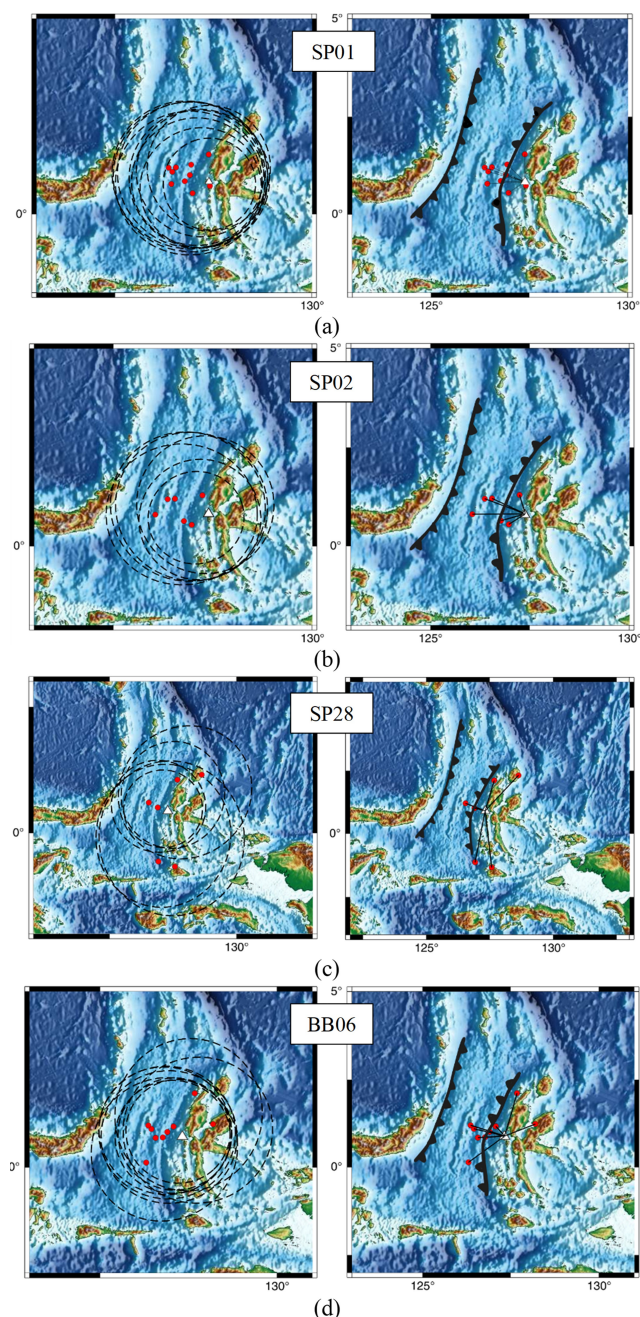
$$Q_c = Q_0 \left(\frac{f}{f_0} \right)^\eta \quad (2)$$

Parameter Q_0 merepresentasikan nilai faktor kualitas coda pada nilai frekuensi 1 Hz atau pada kondisi f_0 . Parameter η adalah faktor yang bergantung kepada nilai frekuensi. Nilai η diperkirakan berkisar pada 0.0 – 1.0 dan dapat bervariasi untuk gelombang geser (Anggono dkk., 2023, 2024).

Penelitian ini merupakan penelitian analisis atenuasi (redaman) gelombang coda pada Pulau Maluku Utara. Penelitian kami berfokus untuk mengkarakterisasi atenuasi gelombang coda menggunakan data gempa dari beberapa stasiun yang dikhususkan pada daerah Ternate. Analisis ini dilakukan pada hasil nilai faktor kualitas gelombang coda dari berbagai frekuensi dan panjang jendela yang berbeda. Hasil dari penelitian ini dapat digunakan untuk menilai bahaya dari kebencanaan seismik atau tektonik dari nilai Q_0 , dan η untuk pemodelan bahaya seismik. Selain itu, penelitian ini membantu dalam memahami lapisan tektonik yang kompleks memengaruhi karakteristik perambatan gelombang seismik.

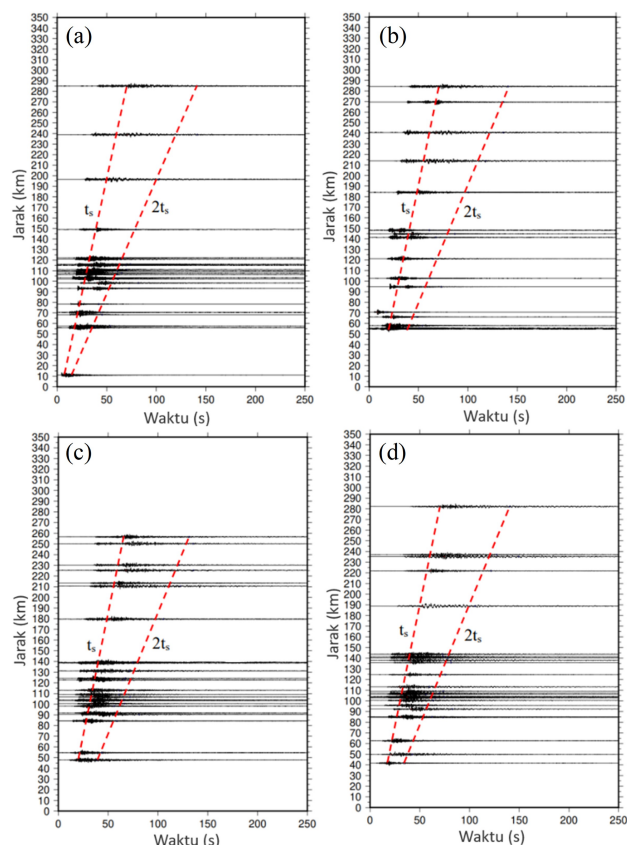
2 DATA DAN METODOLOGI

Data yang digunakan pada studi ini mencakup 129 seismogram dari empat stasiun dalam rentang waktu Bulan Agustus 2016 s.d Bulan Juni/Julai 2017. Informasi ini didapatkan dari Federation of Digital Seismograph Networks dan GEOFON Program GFZ Postdam. Stasiun yang digunakan adalah stasiun SP01, SP02, SP28, dan BB06 yang merupakan bagian dari seismic network 7G yang berada di Pulau Ternate dan Pulau Tidore. Lokasi keempat stasiun yang ditandai dengan segitiga berwarna putih serta lokasi sumber gempa yang ditandai dengan lingkaran berwarna merah yang ditampilkan oleh Gambar 1. Seismogram dari empat stasiun dianalisis menggunakan frekuensi sampel 20 Hz yang merupakan batasan frekuensi stasiun network GEOFON. Kemudian agar mendapatkan seismogram yang memiliki informasi



Gambar 1. Peta distribusi gempa yang digunakan pada studi ini. (a) Stasiun SP01, (b) Stasiun SP02, (c) Stasiun SP28, dan (d) Stasiun BB06. Peta elips pada sebelah kiri menunjukkan estimasi lokasi hiposenter gempa bumi dan peta raypath pada sebelah kanan mengestimasi jalur penjalaran gelombang dari sumber ke stasiun perekam dan peta. Titik merah adalah sumber kejadian gempa dan segitiga putih adalah stasiun perekam. Garis hitam merupakan perpotongan dan arah dari penunjaman dari Busur Halmahera dan Busur Sangihe terhadap Lempeng Laut Maluku.

seismik lebih akurat, seismogram dipilih menggunakan filter berdasarkan nilai *Signal to Noise Ratio* (SNR) di atas dua dan kedalaman di bawah 40 km. Dengan membagi data ke dalam rentang frekuensi yang sempit, dapat diidentifikasi dan diisolasi gelombang coda dengan lebih akurat. Analisis gelombang coda yang baik dan tidak dipengaruhi *noise*



Gambar 2. Rekaman komponen vertical (HHZ) pada (a) Stasiun SP01, (b) Stasiun SP02, (c) Stasiun SP28, dan (d) Stasiun BB06. Garis merah putus-putus, ditandai sebagai t_s dan $2t_s$, menunjukkan perkiraan waktu kedatangan gelombang S dan gelombang coda.

harus memiliki nilai SNR yang tinggi. Gelombang dengan frekuensi yang tinggi menyebabkan nilai SNR juga tinggi sehingga memiliki sensitivitas yang lebih terhadap medium heterogen.

Studi ini menggunakan 129 rekaman gelombang komponen vertical (HHZ). Gelombang tersebut kemudian dikoreksi instrumen untuk mengurangi efek gangguan dari stasiun, dan pengoreksian ini juga merubah satuan gelombang ke dalam unit kecepatan (km/s). Pada Gambar 2, permulaan gelombang coda dituliskan sebagai $2t_s$ untuk mencegah terjadinya tumpang tindih atau penyatuan waktu dari gelombang-S (Aki dan Chouet, 1975; Sharma dan Mitra, 2018; Anggono dkk., 2023). Gelombang coda pada penelitian ini dianalisis pada panjang jendela 20 s, 30 s, 40 s, 50 s, 60 s, 70 s, 80 s, 90 s, 100 s, 110 s, dan 120 s. Kemudian seismogram difilter menggunakan *bandpass filter* dengan *bandwidth* 2/3 dari frekuensi sentral. Frekuensi sampel dari Network GEOFON adalah 20 Hz, dan filter ini menggunakan 1/2 dari frekuensi sampel atau maksimal 10 Hz. Pengkalkulasian nilai amplitudo coda menggunakan metode *Root Mean Square* (RMS) dari setiap panjang jendela. Nilai Coda-Q (Q_c) atau faktor kualitas coda dikalkulasi menggunakan regresi linear dari amplitudo RMS pada setiap frekuensi.

3 HASIL DAN DISKUSI

Hasil pengolahan data pada penelitian ini menggunakan software VSCode dengan bantuan Pustaka ObsPy yang dijelaskan dengan berbagai analisis: kalkulasi nilai coda, grafik hubungan nilai coda dan panjang gelombang, serta grafik perbandingan nilai coda dan atenuasi. Tabel 1 menunjukkan hasil kalkulasi dari nilai Q_c , Q_0 dan η untuk setiap stasiun. Diperoleh nilai Q_0 sebesar 96.369 ± 20.56 sampai 125.98 ± 5.96 untuk stasiun SP01, 60.229 ± 7.52 sampai 107.195 ± 4.86 untuk stasiun SP02, 61.146 ± 14.56 sampai 142.75 ± 6.38 untuk stasiun SP28, dan 62.508 ± 9.3 sampai 132.474 ± 5.13 untuk stasiun BB06. Kenaikan yang signifikan pada nilai Q_0 ini berada pada panjang jendela 20 s - 40, diikuti dengan penurunan dan kenaikan lagi yang signifikan stabil mulai dari panjang jendela 50 s - 120 s. Penurunan nilai Q_0 terjadi pada nilai 112.927 ± 0.23 sampai 110.340 ± 6.58 pada stasiun SP01, dan 125.48 ± 28.193 sampai 118.626 ± 28.19 pada stasiun SP28. Sedangkan untuk nilai η sendiri mengalami kenaikan dengan nilai 0.878 ± 0.10 sampai 1.093 ± 0.077 pada stasiun SP01, 1.032 ± 0.14 sampai 1.238 ± 0.124 pada stasiun SP02, 1.029 ± 0.12 pada stasiun BB06, dan penurunan nilai dari 1.372 ± 0.104 sampai 1.282 ± 0.166 pada stasiun SP28. Kenaikan dan penurunan dengan selisih yang besar ini terdapat pada panjang jendela 20 s - 60 s. Sehingga diasumsikan semakin kecil panjang jendela, gelombang coda telah menyampling pada kedalaman yang lebih dalam daripada panjang jendela yang lebih besar.

Memperlihatkan grafik hubungan antara nilai Q_0 dengan η pada jarak episenter 0 – 350 km ditunjukkan pada Gambar 3. Pada grafik terlihat adanya kesamaan kenaikan nilai Q_0 yang pesat pada keempat stasiun berada panjang jendela 20 s – 40 s. Grafik kemudian meningkat secara stabil pada panjang jendela 50 s ke atas. Pada jarak episenter 0 – 100 km dan 100 km – 250 km, terlihat pula lonjakan kenaikan nilai Q_0 secara besar pada panjang jendela 20 s – 40 s. Untuk jarak episenter 200 – 350 km, lonjakan nilai Q_0 secara tinggi ditunjukkan pada panjang jendela 30 s – 40 s pada stasiun SP01 dan SP28, dan lonjakan pada panjang jendela 20 s – 30 s pada stasiun SP02 dan BB06. Jarak episenter mungkin dapat memengaruhi arah propagasi penjalaran gelombang seismik dari sumber gelombang menuju stasiun perekam. Semakin besar jarak episentrumnya, kedalaman medium rambat yang terlewati oleh gelombang seismik menjadi semakin dalam, berkebalikan dengan jarak episenter yang lebih pendek (Anggono dkk., 2023). Diasumsikan bahwa di panjang jendela 30 s ke atas, gelombang coda sudah menyampling dan merambat pada lapisan homogen atau mantel atas.

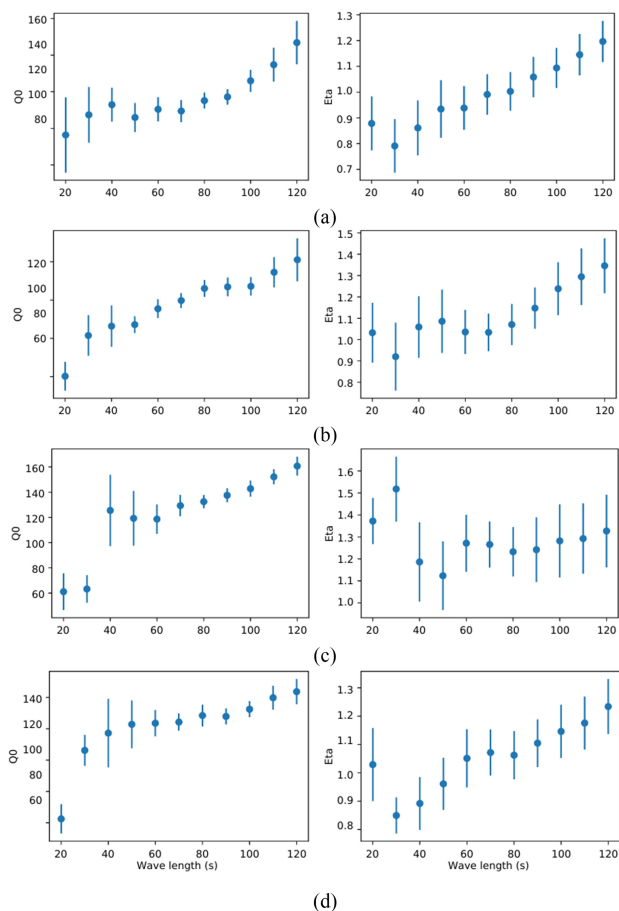
Berdasarkan beberapa penelitian tentang nilai gelombang coda, suatu daerah atau wilayah dengan aktivitas tektonik yang tinggi memiliki nilai η yang tinggi, sedangkan aktivitas tektonik yang stabil ataupun rendah memiliki nilai η yang cenderung lebih kecil. Sedangkan nilai faktor kualitas (Q_0) yang rendah menunjukkan sebuah daerah memiliki aktivitas tektonik yang tinggi (Aki dan Chouet, 1975; Mitchell, 1995; Mak dkk., 2004; Aggarwal dan Khan, 2016; Anggono dkk., 2023). Nilai faktor kualitas coda (Q_c) dapat menunjukkan daerah memiliki aktivitas tektonik rendah atau tinggi, dimana ketika rendahnya nilai Q_c maka aktivitas tektonik daerah tersebut tinggi. Berlaku juga sebaliknya, jika nilai Q_c tinggi, maka aktivitas tektonik daerah tersebut

Tabel 1. Hasil kalkulasi nilai coda pada stasiun perekam.

(a) SP01			
Panjang Jendela (s)		$Q_0 \pm \text{std}$	$\eta \pm \text{std}$
20		96.369 ± 20.562	0.878 ± 0.104
40		112.927 ± 9.232	0.861 ± 0.106
60		110.399 ± 6.582	0.938 ± 0.084
80		115.159 ± 4.320	1.003 ± 0.074
100		125.981 ± 5.964	1.094 ± 0.077
(b) SP02			
Panjang Jendela (s)		$Q_0 \pm \text{std}$	$\eta \pm \text{std}$
20		60.229 ± 7.526	1.032 ± 0.141
40		86.389 ± 10.799	1.059 ± 0.144
60		95.464 ± 4.888	1.036 ± 0.103
80		106.075 ± 4.434	1.070 ± 0.096
100		107.196 ± 4.460	1.238 ± 0.124
(c) SP28			
Panjang Jendela (s)		$Q_0 \pm \text{std}$	$\eta \pm \text{std}$
20		61.146 ± 14.570	1.372 ± 0.104
40		125.480 ± 28.193	1.186 ± 0.180
60		118.626 ± 11.559	1.271 ± 0.129
80		132.444 ± 5.172	1.232 ± 0.113
100		142.750 ± 6.383	1.282 ± 0.166
(d) SP06			
Panjang Jendela (s)		$Q_0 \pm \text{std}$	$\eta \pm \text{std}$
20		62.508 ± 9.305	1.029 ± 0.129
40		117.228 ± 21.857	0.892 ± 0.093
60		123.564 ± 8.417	1.051 ± 0.102
80		128.440 ± 6.946	1.062 ± 0.085
100		132.475 ± 5.135	1.146 ± 0.094

cenderung rendah. Nilai Q_0 yang rendah (<200) dan η yang relatif tinggi (>1) menandakan daerah dengan aktivitas tektonik yang tinggi (Anggono dkk., 2024).

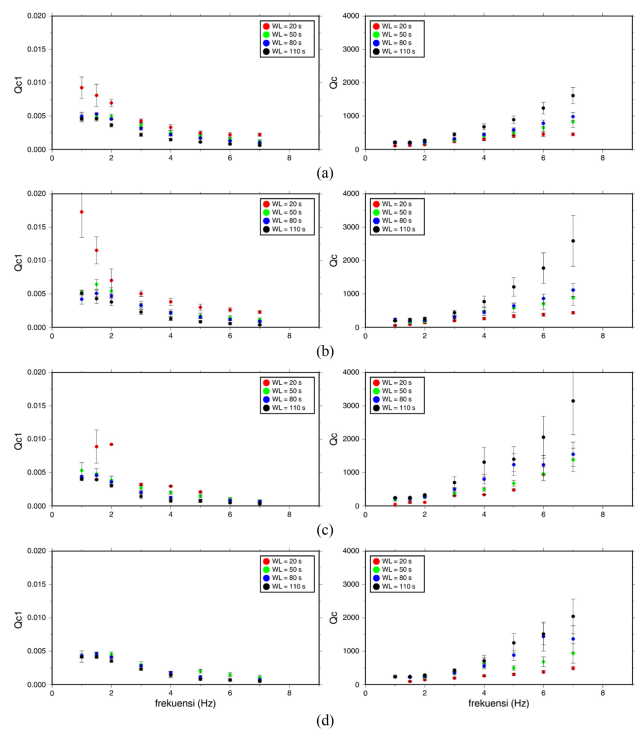
Beberapa studi penelitian mengatakan variasi nilai parameter Q_0 dan η dapat mewakili keaktifan dari sebuah wilayah tektonik pada nilai faktor kualitas coda atau (Q_c). Jin dan Aki (1988) mengatakan bahwa Q_c dapat disebut dengan parameter tektonik dimana Q_c yang rendah menandakan wilayah tektonik aktif. Parameter Q_c berbanding terbalik dengan atenuasi (Q_c^{-1}), yang merupakan nilai peluruhan gelombang coda. Parameter Q_0 dan η kemudian dikalkulasi menjadi nilai Q_c dan nilai atenuasi (Q_c^{-1}) yang nilainya dibuat grafik pada Gambar 4. Grafik tersebut menunjukkan hubungan antara nilai Q_c dan nilai atenuasi (Q_c^{-1}) yang memperlihatkan adanya keterbalikkan nilai Q_c dan nilai atenuasi, semakin besar nilai Q_c maka nilai atenuasi akan semakin kecil. WL (window length) atau panjang jendela menentukan durasi bagian gelombang coda yang dipakai. Panjang jendela 20 s menunjukkan analisis data gelombang coda selama 20 s dimulai dari gelombang S tiba, dan berlaku seterusnya. Data tidak cukup untuk analisis frekuensi jika panjang jendela yang digunakan terlalu pendek, dan dapat bercampur dengan *noise* atau jenis gelombang



Gambar 3. Grafik perbandingan nilai Q_0 dan η dari rekaman gelombang komponen vertikal (HHZ) terhadap panjang jendela 20 s sampai dengan 120 s pada (a) stasiun SP01, (b) stasiun SP02, (c) stasiun SP28, dan (d) stasiun BB06 pada jarak episenter 0 – 350 km.

lain jika panjang jendela terlalu panjang. Nilai atenuasi keempat stasiun pada panjang jendela 20 s dan 50 s lebih tinggi dibandingkan panjang jendela 80 s dan 110 s. Sedangkan nilai Q_c pada panjang jendela 20 s dan 50 s lebih rendah dibandingkan pada panjang jendela 80 s dan 110 s. Menggunakan perhitungan $Q_c = Q_0$ (Anggono dkk., 2024), nilai faktor kualitas (Q_0) akan berbanding terbalik dengan nilai atenuasi. Semakin tinggi nilai Q_0 suatu daerah, maka nilai atenuasi atau penghamburannya akan semakin rendah, yang menandakan daerah tersebut memiliki aktivitas tektonik yang rendah. Pada penelitian nilai coda yang dilakukan di daerah Aceh, didapatkan nilai coda $Q_0 \pm 150$ dan $\eta \pm 1.1$, yang merepresentasikan tingginya aktivitas tektonik di daerah Aceh. Grafik perbandingan faktor kualitas coda dan atenuasi pada daerah Aceh memiliki hasil yang kurang lebih sama dengan grafik untuk daerah Ternate (Anggono dkk., 2023). Sebuah penelitian juga menyebutkan bahwa daerah Maluku Utara memiliki tingkat aktivitas tektonik yang tinggi (Amarda dan Syafriani, 2021).

Wilayah penjalaran gelombang coda diestimasi pada Gambar 1 menggunakan penghamburan elips dengan hiposenter gempa ditandai oleh titik warna merah dan stasiun perekam ditandai oleh segitiga warna putih. Dengan diguna-



Gambar 4. Grafik perbandingan (kiri) nilai atenuasi (Q_c^{-1}) dan (kanan) nilai faktor kualitas coda (Q_c) terhadap frekuensi pada (a) stasiun SP01, (b) stasiun SP02, (c) stasiun SP28, dan (d) stasiun BB06 pada panjang jendela yang berbeda. Panjang jendela yang digunakan bervariasi dari 20 – 110 s untuk melihat variasi Q_c terhadap waktu. Pada frekuensi rendah dibutuhkan panjang gelombang yang lebih besar untuk meningkatkan akurasi nilai Q_c .

kannya $V_s \sim 3.5$ km/s, diperkirakan kedalaman maksimum gelombang menyampling pada panjang jendela 60 s. Diasumsikan kedalaman maksimal sampling gelombang pada ~ 125 km. Kenaikan nilai Q_0 dan panjang jendela dapat dihubungkan dengan bertambahnya kedalaman yang bisa di sampling oleh gelombang hamburan (gelombang coda). Semakin dalam sebuah medium berada, semakin homogen medium yang akan dilewati oleh gelombang seismik saat menjalar dari sumber getaran (Biswas dan Singh, 2020).

4 KESIMPULAN

Dari pengolahan data pada stasiun di daerah Ternate, Maluku Utara, didapatkan nilai coda berkisar dari ± 60 hingga ± 140 , dengan faktor frekuensi dari ± 0.8 hingga ± 1 . Nilai ini menunjukkan tingginya aktivitas tektonik pada daerah ini. Tingginya nilai atenuasi yang dihasilkan dari pengolahan menunjukkan bahwa gelombang seismik terhamburkan selama merambat di bawah permukaan menuju ke stasiun perekam. Hal ini dikarenakan kompleksnya struktur bawah permukaan pada daerah Ternate, Maluku Utara. Berdasarkan rendahnya nilai faktor kualitas coda dan tingginya nilai atenuasi, daerah Ternate, Maluku Utara memiliki aktivitas tektonik yang tinggi. Hal yang sama bisa terjadi pada pulau Maluku Utara itu sendiri, dengan analisa serta penelitian lebih lanjut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dapat dilakukan berkat dukungan serta bantuan Universitas Padjadjaran melalui program Merdeka Kampus Merdeka Belajar (MBKM) Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Kedua belah pihak pembimbing mendukung seluruh penelitian ini dari awal sampai selesai. Mentor BRIN membantu pengolahan dan perolehan data seismic dari network GEOFON (GFZ German Research Center for Geosciences) serta persiapan segala kebutuhan software dan materi.

Pustaka

- Adii, J., Kusumawati, D., Falevi, C. Sahara, D.P. (2021): Maluku sea plate faulting regime analysis: A preliminary study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **873**(1), 012100, doi:10.1088/1755-1315/873/1/012100.
- Aggarwal, S.K. Khan, P.K. (2016): Qlg tomography in gujarat, western india. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **95**, 135–149, ISSN 1474-7065, doi:https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.12.003, studying Seismic Sources: Theory, Methods and Applications.
- Akamatsu, J. (1980): Attenuation property of coda parts of seismic waves from local earthquakes. *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*, **30**(1), 1–16, ISSN 0454-7675, doi:https://cir.nii.ac.jp/crid/1050282676671209728.
- Aki, K. (1980): Scattering and attenuation of shear waves in the lithosphere. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **85**(B11), 6496–6504, doi:https://doi.org/10.1029/JB085iB11p06496.
- Aki, K. Chouet, B. (1975): Origin of coda waves: Source, attenuation, and scattering effects. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, **80**(23), 3322–3342, doi:https://doi.org/10.1029/JB080i023p03322.
- Akinci, A., Del Pezzo, E. Ibáñez, J.M. (1995): Separation of scattering and intrinsic attenuation in southern spain and western anatolia (turkey). *Geophysical Journal International*, **121**(2), 337–353, ISSN 0956-540X, doi:10.1111/j.1365-246X.1995.tb05715.x.
- Akinci, A., Pezzo, E.D. Malagnini, L. (2020): Intrinsic and scattering seismic wave attenuation in the central apennines (italy). *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **303**, 106498, ISSN 0031-9201, doi:https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106498.
- Amarda, M. Syafriani, S. (2021): Analysis of seismic hazards and vulnerability throughout indonesia based on 1999-2003 earthquake data using the microseismic method. *PILLAR OF PHYSICS EDUCATION*, **14**(2), doi:http://dx.doi.org/10.24036/11929171074.
- Anggono, T. dkk. (2023): Coda wave attenuation in northern aceh, indonesia from a single station measurement: preliminary results. *Journal of Physics: Conference Series*, **2596**(1), 012036, doi:10.1088/1742-6596/2596/1/012036.
- Anggono, T. dkk. (2024): Attenuation characteristics of coda wave in northern aceh, sumatra, indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, **2780**(1), 012001, doi:10.1088/1742-6596/2780/1/012001.
- Biescas, B., Rivera, Z. Zapata, J.A. (2007): Seismic attenuation of coda waves in the eastern region of cuba. *Tectonophysics*, **429**(1), 99–109, ISSN 0040-1951, doi:https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.09.013.
- Biswas, R. Singh, C. (2020): An investigation of regional variations of coda wave attenuation in western tibet. *Journal of Seismology*, **24**(6), 1235–1254, ISSN 1573-157X, doi:10.1007/s10950-020-09929-0.
- Bock, Y. dkk. (2003): Crustal motion in indonesia from global positioning system measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **108**(B8), doi:https://doi.org/10.1029/2001JB000324.
- Hamilton, W.B. (1979): Tectonics of the Indonesian region. Tech. rep., doi:10.3133/pp1078.
- Hermanto, B. (2024): Perkembangan kerangka tektonik laut maluku, kepulauan banggai-sula dan lajur ofiolit sulawesi timur. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, **15**(2), 69–74, doi:https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v15i2.62.
- Ipranta, I. Irzon, R. (2019): Plagioclase fractionation on the holocene volcanic rocks evolution in west halmahera regency. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, **20**(3), 165, doi:https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v20i3.468.
- Jin, A. Aki, K. (1988): Spatial and temporal correlation between coda q and seismicity in china. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **78**(2), 741–769, ISSN 0037-1106, doi:10.1785/BSSA0780020741.
- Kumar, N., Parvez, I.A. Virk, H. (2005): Estimation of coda wave attenuation for nw himalayan region using local earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **151**(3), 243–258, ISSN 0031-9201, doi:https://doi.org/10.1016/j.pepi.2005.03.010.
- Ma'hood, M. Hamzehloo, H. (2009): Estimation of coda wave attenuation in east central iran. *Journal of Seismology*, **13**(1), 125–139, doi:10.1007/s10950-008-9130-2.
- Mak, S., Chan, L., Chandler, A. Koo, R. (2004): Coda q estimates in the hong kong region. *Journal of Asian Earth Sciences*, **24**(1), 127–136, ISSN 1367-9120, doi:https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2003.10.001.
- Mitchell, B.J. (1995): Anelastic structure and evolution of the continental crust and upper mantle from seismic surface wave attenuation. *Reviews of Geophysics*, **33**(4), 441–462, doi:https://doi.org/10.1029/95RG02074.
- Mutaqin, B.W., Handayani, W., Rosaji, F.S.C., Wahyuningtyas, D. Marfai, M.A. (2021): Geomorphological analysis for the identification of small volcanic islands in north maluku, indonesia. *JURNAL GEOGRAFI*, **13**(2), 184–194, doi:10.24114/jg.v13i2.21526.
- Sato, H. Fehler, M.C. (1998): Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth. Springer-Verlag, New York.
- Sharma, S. Mitra, S. (2018): Seismic attenuation of the eastern himalayan and indo-burman plate boundary systems, northeast india. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **123**(12), 10,797–10,809, doi:https://doi.org/10.1029/2018JB016496.
- Ulfiana, E., Wandono, W., Sianipar, D. Heryandoko, N. (2020): Study of p and s wave quality factor (qa and qb) around mt. jailolo. *Jurnal Geofisika*, **18**(2), 33–39, ISSN 2477-6084.
- Wajedy, M.F., Altin Massinai, M., Fawzy Ismullah Massinai, M., Taufiq Rafie, M., Sucifebrianti, A. Lubis Sa-

putra, M. (2024): Mapping low earthquake risk areas in north maluku indonesia. *MAUSAM*, **75**(3), 863–868, [doi:10.54302/mausam.v75i3.6273](https://doi.org/10.54302/mausam.v75i3.6273).

Yuliatmoko, R.S. Kurniawan, T. (2019): Analysis of stress drop variations in fault and subduction zones of maluku and halmahera earthquakes in 2019. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, **9**(2), 152–162, [doi:10.26740/jpfa.v9n2.p152-162](https://doi.org/10.26740/jpfa.v9n2.p152-162).