

TUGAS AKHIR - CF234824

**PENDEKATAN OTOMATIS WELL-SEISMIC TIE:
INTEGRASI EKSTRAKSI WAVELET BERBASIS *GABOR*
DECONVOLUTION DAN *DYNAMIC TIME WARPING*
PADA LAPANGAN TOROSA, CEKUNGAN BROWSE**

FIRZA RIZALDI SURYANTORO

NRP 5017221055

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Firman Syaifuddin, S.Si., M.T.

NIP. 198409112014041001

Nilla Perdana Agustina, S.ST., M.T.

NPP. 1996202612017

Program Studi Teknik Geofisika

Departemen Teknik Geofisika

Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2026



TUGAS AKHIR - CF234824

**PENDEKATAN OTOMATIS WELL-SEISMIC TIE:
INTEGRASI EKSTRAKSI WAVELET BERBASIS *GABOR*
DECONVOLUTION DAN *DYNAMIC TIME WARPING*
PADA LAPANGAN TOROSA, CEKUNGAN BROWSE**

FIRZA RIZALDI SURYANTORO

NRP 5017221055

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Firman Syaifuddin, S.Si., M.T.

NIP. 198409112014041001

Nilla Perdana Agustina, S.T., M.T.

NPP. 1996202612017

Program Studi Teknik Geofisika

Departemen Teknik Geofisika

Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2026

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - CF234824

**AUTOMATIC APPROACHES TO WELL-SEISMIC TIE:
INTEGRATING GABOR DECONVOLUTION-BASED
WAVELET EXTRACTION AND DYNAMIC TIME WARPING
AT TOROSA FIELD, BROWSE BASIN**

FIRZA RIZALDI SURYANTORO

NRP 5017221055

Advisor

Dr. Ir. Firman Syaifuddin, S.Si., M.T.

NIP. 198409112014041001

Nilla Perdana Agustina, S.T., M.T.

NPP. 1996202612017

Study Program Geophysical Engineering

Department of Geophysical Engineering

Faculty Civil, Planning, and Geo Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2026

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

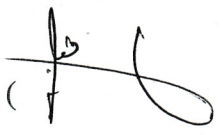
PENDEKATAN OTOMATIS WELL-SEISMIC TIE: INTEGRASI EKSTRAKSI WAVELET BERBASIS *GABOR DECONVOLUTION* DAN *DYNAMIC TIME WARPING* PADA LAPANGAN TOROSA, CEKUNGAN BROWSE

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Geofisika
Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
FIRZA RIZALDI SURYANTORO
NRP. 5017221055

Disetujui oleh Tim Pembimbing dan Penguji Tugas Akhir:

- | | | |
|---|---------------|---|
| 1. Dr. Ir. Firman Syaifuddin, S.Si.,
M.T.
NIP. 198409112014041001 | Pembimbing | () |
| 2. Nilla Perdana Agustina, S.T., M.T.
NPP. 1996202612017 | Ko-Pembimbing | () |
| 3. Ir. Eki Komara, S.T., M.T.
NIP. 198711232020121010 | Penguji 1 | () |
| 4. Kadek Hendrawan Palgunadi, S.T.,
M.Sc., Ph.D.
NPP. 1993202411003 | Penguji 2 | () |

SURABAYA

Juli, 2026

Halaman ini sengaja dikosongkan

APPROVAL SHEET

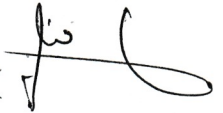
AUTOMATIC APPROACHES TO WELL-SEISMIC TIE: INTEGRATING GABOR DECONVOLUTION-BASED WAVELET EXTRACTION AND DYNAMIC TIME WARPING AT TOROSA FIELD, BROWSE

FINAL PROJECT

Submitted to fulfil one of the requirements
for obtaining a degree of Bachelor of Engineering at
Undergraduate Study Program of Geophysics Engineering
Department of Geophysical Engineering
Faculty of Civil, Planning and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By :
FIRZA RIZALDI SURYANTORO
NRP. 5017221055

Approved by the Thesis Advisory and Examination Committee:

- | | | |
|---|------------|---|
| 1. Dr. Ir. Firman Syaifuddin, S.Si.,
M.T.
NIP. 198409112014041001 | Advisor | () |
| 2. Nilla Perdana Agustina, S.T., M.T.
NPP. 1996202612017 | Co-Advisor | () |
| 3. Ir. Eki Komara, S.T., M.T.
NIP. 198711232020121010 | Examiner 1 | () |
| 4. Kadek Hendrawan Palgunadi, S.T.,
M.Sc., Ph.D.
NPP. 1993202411003 | Examiner 2 | () |

SURABAYA

July, 2026

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Firza Rizaldi Suryantoro / 5017221055
Program studi : Teknik Geofisika
Dosen Pembimbing / NIP : Dr. Ir. Firman Syaifuddin, S.Si., M.T. / 19840911201404
1001
Ko-Pembimbing / NIP : Nilla Perdana Agustina, S.T., M.T / 1996202612017

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul **“PENDEKATAN OTOMATIS WELL-SEISMIC TIE: INTEGRASI EKSTRAKSI WAVELET BERBASIS GABOR DECONVOLUTION DAN DYNAMIC TIME WARPING PADA LAPANGAN TOROSA, CEKUNGAN BROWSE”** adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 13 Juli 2026

Mengetahui,
Pembimbing



Dr. Ir. Firman Syaifuddin, S.Si., M.T.
NIP. 198409112014041001

Mahasiswa



Firza Rizaldi Suryantoro
NRP. 5017221055

Mengetahui,
Ko-Pembimbing



Nilla Perdana Agustina, S.T., M.T.
NPP. 1996202612017

Halaman ini sengaja dikosongkan

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of Student / NRP : Firza Rizaldi Suryantoro / 5017221055
Study Program : Teknik Geofisika
Advisor / NIP : Dr. Ir. Firman Syaifuddin, S.Si., M.T. / 19840911201404
1001
Co-Advisor / NIP : Nilla Perdana Agustina, S.T., M.T / 1996202612017

Hereby Declare that the Final Project with the title “**AUTOMATIC APPROACHES TO WELL-SEISMIC TIE: INTEGRATING GABOR DECONVOLUTION-BASED WAVELET EXTRACTION AND DYNAMIC TIME WARPING AT TOROSA FIELD, BROWSE**” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 13 July 2026

Acknowledged,
Advisor



Dr. Ir. Firman Syaifuddin, S.Si., M.T.
NIP. 198409112014041001

Student



Firza Rizaldi Suryantoro
NRP. 5017221055

Acknowledged,
Co-Advisor



Nilla Perdana Agustina, S.T., M.T.
NPP. 1996202612017

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRAK

PENDEKATAN OTOMATIS WELL-SEISMIC TIE: INTEGRASI EKSTRAKSI WAVELET BERBASIS *GABOR DECONVOLUTION* DAN *DYNAMIC TIME WARPING* PADA LAPANGAN TOROSA, CEKUNGAN BROWSE

Nama Mahasiswa / NRP : Firza Rizaldi Suryantoro / 5017221055
Departemen : Teknik Geofisika FTSPK - ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Firman Syaifuddin, S.Si., M.T.
Ko-Pembimbing : Nilla Perdana Agustina, S.T., M.T

Abstrak

Well-seismic tie otomatis pada data dengan atenuasi Q yang signifikan menghadapi dua tantangan utama, yaitu ketidakstationeran wavelet seismik akibat peluruhan frekuensi seiring kedalaman dan ketidakselarasan temporal antara seismogram sintetik dan *trace* seismik. Penelitian ini mengintegrasikan Dekonvolusi Gabor dan *Dynamic Time Warping* (DTW) untuk mengatasi kedua permasalahan tersebut secara otomatis. Dekonvolusi Gabor digunakan untuk mengestimasi wavelet *time-variant* dalam domain *time-frequency*, sementara DTW dengan pendekatan *Marker Anchored* digunakan untuk menyelaraskan seismogram sintetik terhadap *trace* seismik menggunakan posisi marker formasi sebagai titik jangkar *hard constraint*. Validasi pada data sintetis terkontrol menunjukkan bahwa Dekonvolusi Gabor mampu *recover* komponen frekuensi dan amplitudo wavelet dengan koefisien korelasi global $r = 0,951$ dan RMSE frekuensi 7,96 Hz, meskipun estimasi fasa pada zona dalam tidak sepenuhnya berhasil akibat instabilitas transformasi Hilbert ketika SNR menurun. DTW *Marker Anchored* menghasilkan korelasi $r = 0,990\text{--}0,993$ dengan *tops error* = 0 pada seluruh skenario *stretch* dan *squeeze* $\pm 10\%\text{--}\pm 30\%$, dibandingkan *Fixed Band* yang menghasilkan korelasi sebanding namun dengan *tops error* 4–6 marker per skenario. Metode diterapkan pada data nyata Lapangan Torosa, Cekungan Browse, yang mencakup lima sumur yaitu NSR-1, Torosa-2, Torosa-3, Torosa-4, dan Torosa-5, dan menghasilkan korelasi $r = 0,571\text{--}0,800$ dengan *tops error* = 0 di seluruh sumur, meningkat dari kondisi pre-tie $r = -0,236$ hingga 0,205. Pada penampang seismik 2D, seluruh marker dari Formasi Barracouta hingga Triassic terposisi konsisten pada reflektor yang sama secara lateral di kelima sumur, mengkonfirmasi bahwa integrasi Dekonvolusi Gabor dan DTW *Marker Anchored* efektif untuk *well-seismic tie* otomatis pada data lapangan dengan karakteristik atenuasi Q yang kompleks.

Kata kunci: *Well-seismic tie, Dekonvolusi Gabor, Dynamic Time Warping, Wavelet time-variant, Atenuasi Q*

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRACT

AUTOMATIC APPROACHES TO WELL-SEISMIC TIE: INTEGRATING GABOR DECONVOLUTION-BASED WAVELET EXTRACTION AND DYNAMIC TIME WARPING AT TOROSA FIELD, BROWSE

Student Name / NRP : Firza Rizaldi Suryantoro / 5017221055
Department : Geophysical Engineering CIVPLAN - ITS
Advisor : Dr. Ir. Firman Syaifuddin, S.Si., M.T.
Co-Advisor : Nilla Perdana Agustina, S.T., M.T

Abstract

Automatic *well-seismic tie* on data with significant Q attenuation faces two main challenges: seismic wavelet non-stationarity due to frequency decay with depth, and temporal misalignment between synthetic seismograms and seismic traces. This study integrates Gabor Deconvolution and *Dynamic Time Warping* (DTW) to address both problems automatically. Gabor Deconvolution is used to estimate *time-variant* wavelets in the *time-frequency* domain, while DTW with the *Marker Anchored* approach aligns synthetic seismograms to seismic traces using formation marker positions as *hard constraint* anchor points. Validation on controlled synthetic data shows that Gabor Deconvolution successfully recovers wavelet frequency and amplitude components with a global correlation coefficient of $r = 0.951$ and frequency RMSE of 7.96 Hz, although phase estimation at deeper zones was not fully achieved due to Hilbert transform instability as SNR decreases with cumulative Q attenuation. *Marker Anchored* DTW yields correlation $r = 0.990\text{--}0.993$ with *tops error* = 0 across all stretch and squeeze scenarios of $\pm 10\%\text{--}\pm 30\%$, compared to *Fixed Band* which produces comparable correlation but with *tops error* of 4–6 markers per scenario. The method was applied to field data from the Torosa Field, Browse Basin, covering five wells: NSR-1, Torosa-2, Torosa-3, Torosa-4, and Torosa-5, yielding correlation $r = 0.571\text{--}0.800$ with *tops error* = 0 across all wells, improved from pre-tie conditions of $r = -0.236$ to 0.205. On the 2D seismic section, all markers from the Barracouta Formation to the Triassic are laterally consistent on the same reflector across all five wells, confirming that the integration of Gabor Deconvolution and *Marker Anchored* DTW is effective for automatic *well-seismic tie*-on field data with complex Q attenuation characteristics.

Keywords: *Well-seismic tie*, Gabor Deconvolution, *Dynamic Time Warping*, *Time-variant* Wavelet, Q attenuation

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT. atas rahmat-Nya sehingga penulis dapat mengerjakan dan menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan judul “**Pendekatan Otomatis Well-Seismic Tie: Integrasi Ekstraksi Wavelet Berbasis Gabor Deconvolution dan Dynamic Time Warping pada Lapangan Torosa, Cekungan Browse**”. Penyusunan laporan tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat kelulusan untuk jenjang sarjana Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pelaksanaan dan penyusunan laporan ini tidak lepas dari do’a, arahan, bimbingan dan dukungan moril yang diberikan oleh banyak pihak. Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan ucap syukur terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan segala petunjuk dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Ir. Firman Syaifuddin, S.Si., M.T. dan Nilla Perdana Agustina, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing I dan II penulisan atas saran, kritik, pengolahan, serta arahan yang selalu diberikan dari awal hingga terselesaikannya Laporan Tugas Akhir ini.
3. Kepada Ayah saya, Bapak Ir. Meingkar Suryantoro yang hebat dan selalu menjadi *support system* penulis dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini. Terima kasih berkat doa dan dukungan bapak penulis bisa berada di titik ini.
4. Kepada Adik saya, Revita Ardana Suryantoro terima kasih atas segala bentuk dukungan yang diberikan kepada penulis.
5. Kepada Alpina Damayanti, S.Kep., Ners. terima kasih atas segala nasihat, motivasi, dan dukungan yang diberikan kepada penulis.
6. Mas Sabda Wahidatulhusna, S.T. selaku *Geophysicist* dari Geodynamics Research Group ITB atas motivasi, diskusi selama mengerjakan tugas akhir.
7. Maulana Wahyu, Rizqy Arsa, Yogi Ananta, Khavid Sapuutra, dan Dean Yunnaz yang selalu menjadi teman diskusi akademis maupun non akademis selama menjalani perkuliahan.
8. TG11 yang telah memberikan momen dan kesempatan yang sangat menyenangkan.
9. Seluruh Bapak/ Ibu Dosen dan Tenaga Pendidikan Departemen Teknik Geofisika ITS yang telah memberikan ilmu selama penulis melaksanakan studi di Departemen Teknik Geofisika ITS.
10. Serta pihak-pihak lain yang tidak bisa disebutkan satu persatu. Terima kasih atas semua kritik dan sarannya selama penyelesaian Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih dapat dikembangkan seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan. Maka dari itu, penulis akan sangat menerima diskusi, kritik, dan saran yang berkaitan dengan laporan tugas akhir ini. Semoga laporan tugas akhir ini bermanfaat, tidak hanya bagi penulis, tetapi juga bagi pembaca.

Surabaya, 2026

Firza Rizaldi Suryantoro

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
APPROVAL SHEET	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
STATEMENT OF ORIGINALITY	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL.....	xxiii
GLOSSARIUM	xxv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	1
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Manfaat.....	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	3
2.1 Dasar Teori	3
2.1.1 Geologi Regional.....	3
2.1.1.1 Stratigrafi Regional	4
2.1.2 Konsep Dasar Metode Seismik	5
2.1.2.1 Gelombang Seismik	5
2.1.2.2 Impedansi Akustik	5
2.1.2.3 Koefisien Refleksi.....	5
2.1.2.4 Polaritas dan Fasa	5
2.1.2.5 Resolusi Vertikal.....	6
2.1.2.6 Atenuasi dan Faktor Kualitas.....	7
2.1.3 <i>Well Seismic Tie</i>	7
2.1.3.1 Sintetis Seismogram.....	7
2.1.3.2 Kurva Waktu-Kedalaman	8
2.1.4 Dekonvolusi Gabor	8

2.1.4.1	Konsep Dasar Dekonvolusi	8
2.1.4.2	Transformasi Gabor	8
2.1.4.3	Estimasi Wavelet Non-Stasioner	8
2.1.5	<i>Dynamic Time Warping</i>	9
2.1.5.1	Prinsip Kerja <i>Dynamic Time Warping</i>	9
2.1.5.2	<i>Constraint</i> Sakoe-Chiba	10
2.1.6	Dispersi Fase Akibat Atenuasi Q	11
2.2	Hasil Penelitian Terdahulu	12
2.2.1	Cui dan Margrave., (2015) — " <i>Phase Correction of Gabor Deconvolution</i> "	12
2.2.2	Herrera et al., (2014) — " <i>Automatic approaches for seismic to well tying</i> "	14
BAB 3	METODOLOGI	15
3.1	Lokasi Penelitian	15
3.2	Alat dan Bahan	15
3.2.1	Perangkat Lunak	15
3.2.2	Data	15
3.2.2.1	Data Sumur	15
3.2.2.2	Data Seismik	16
3.3	Diagram Alir	17
3.4	Tahapan Penelitian	20
3.4.1	Studi Literatur	20
3.4.2	<i>Gabor Deconvolution Test</i>	20
3.4.2.1	Pembuatan <i>Q-Attenuated Seismic Model</i>	20
3.4.2.2	<i>Gabor Deconvolution</i>	23
3.4.2.3	<i>Gabor Synthetic Trace Generation</i>	25
3.4.3	<i>Dynamic Time Warping Test</i>	25
3.4.3.1	Pembuatan Data Sintetis <i>Stretch / Squeeze</i>	25
3.4.3.2	<i>Dynamic Time Warping</i>	26
3.4.3.3	<i>Fixed Band Constraint</i> (Sakoe–Chiba)	27
3.4.3.4	<i>Marker-Anchored Constraint</i>	28
3.4.4	<i>Auto Well Tie</i> pada Data Lapangan	29
3.4.4.1	<i>Conditioning</i> Data Sumur	29
3.4.4.2	<i>Pseudo Checkshot</i>	30
3.4.4.3	<i>Checkshot Correction</i>	31
3.4.4.4	<i>Seismic Trace Extraction</i>	31

3.4.4.5	<i>Gabor Deconvolution</i>	32
3.4.4.6	<i>Gabor Synthetic Trace Generation</i>	32
3.4.4.7	<i>Dynamic Time Warping</i>	32
3.4.4.8	<i>Well Tie Quality Control</i>	32
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1	<i>Gabor Deconvolution Test</i>	35
4.2	<i>Dynamic Time Warping Test</i>	40
4.2.1	<i>Dynamic Time Warping Sintetis Q-Attenuated Fixed Band</i>	41
4.2.2	<i>Dynamic Time Warping Sintetis Q-Attenuated Marker Anchored</i>	45
4.3	<i>Auto Well Tie</i> pada Data Seismik Lapangan	50
4.3.1	North Scoot Reef -1.....	50
4.3.1.1	<i>Gabor Synthetic Generation</i>	51
4.3.1.2	<i>Dynamic Time Warping Fixed Band</i>	53
4.3.1.3	<i>Dynamic Time Warping Marker Anchored</i>	54
4.3.2	Torosa-2	55
4.3.2.1	<i>Gabor Synthetic Generation</i>	56
4.3.2.2	<i>Dynamic Time Warping Fixed Band</i>	58
4.3.2.3	<i>Dynamic Time Warping Marker Anchored</i>	59
4.3.3	Torosa-3	60
4.3.3.1	<i>Gabor Synthetic Generation</i>	61
4.3.3.2	<i>Dynamic Time Warping Fixed Band</i>	63
4.3.3.3	<i>Dynamic Time Warping Marker Anchored</i>	64
4.3.4	Torosa-4	65
4.3.4.1	<i>Gabor Synthetic Generation</i>	66
4.3.4.2	<i>Dynamic Time Warping Fixed Band</i>	68
4.3.4.3	<i>Dynamic Time Warping Marker Anchored</i>	69
4.3.5	Torosa-5	70
4.3.5.1	<i>Gabor Synthetic Generation</i>	71
4.3.5.2	<i>Dynamic Time Warping Fixed Band</i>	73
4.3.5.3	<i>Dynamic Time Warping Marker Anchored</i>	74
4.3.6	Analisis Penampang Seismik 2D Hasil Dynamic Time Warping.....	76
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN	79
5.1	Kesimpulan.....	79
5.2	Saran.....	79

DAFTAR PUSTAKA	81
LAMPIRAN	85
BIODATA PENULIS	98

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Geologi Regional Cekungan Browse (Geoscience Australia, 2023).	3
Gambar 2.2	Kolom Litostratigrafi Cekungan Browse (ConocoPhillips, 2011).	4
Gambar 2.3	SEG standard polarity zero phase wavelet (Sheriff, 2002).	6
Gambar 2.4	Wavelet minimum-phase dan zero-phase (Brown, 2010).	6
Gambar 2.5	Matriks biaya <i>Dynamic Time Warping</i> (modifikasi dari Chen et al., 2013).	9
Gambar 2.6	Perbandingan propagating wavelet estimasi dan wavelet Q dalam domain waktu (Chen et al., 2013).	10
Gambar 2.7	Perbandingan <i>propagating wavelet</i> hasil estimasi Gabor Dekonvolusi dengan wavelet Q pada empat waktu tempuh berbeda (Cui dan Margrave, 2015).	11
Gambar 2.8	<i>Forward Gabor transform</i> dari <i>trace</i> non-stasioner (Cui & Margrave, 2015).	12
Gambar 2.9	Perbandingan spektrum Gabor <i>propagating wavelet</i> estimasi dan aktual (Cui & Margrave, 2015).	13
Gambar 2.10	Perbandingan <i>propagating wavelet</i> estimasi dan wavelet Q dalam domain waktu (Cui & Margrave, 2015).	13
Gambar 2.11	Perbandingan metode <i>well-seismic tie</i> : (a) Hasil <i>well-seismic tie</i> manual, (b) hasil DTW dengan <i>warping window</i> (c) hasil LSIM pada seluruh panjang <i>trace</i> (Herrera et al., 2014).	14
Gambar 3.1	Peta lokasi penelitian Lapangan Torosa beserta posisi sumur dan lintasan arbitrary line seismik.	15
Gambar 3.2	<i>Arbitrary line</i> seismik sepanjang lintasan sumur.	16
Gambar 3.3	Diagram Alir Penelitian.	17
Gambar 3.4	Diagram Alir <i>Gabor Deconvolution Test</i> .	18
Gambar 3.5	Diagram Alir <i>Dynamic Time Warping Test</i> .	19
Gambar 3.6	Ekstraksi atribut seismik: (a) data seismik, (b) <i>instantaneous frequency</i> , (c) <i>instantaneous bandwidth</i> , dan (d) <i>dominant frequency</i> .	21
Gambar 3.7	Estimasi tren frekuensi dominan dan faktor kualitas Q: (a) kurva <i>exponential fit</i> frekuensi dominan terhadap TWT, dan (b) distribusi nilai Q per interval waktu.	22
Gambar 3.8	<i>Time-variant</i> Ricker wavelet yang digunakan dalam pembuatan seismogram sintetis stasioner.	23
Gambar 3.9	Ilustrasi <i>Fixed Band Constraint</i> (Sakoe-Chiba).	28
Gambar 3.10	Ilustrasi <i>Marker-Anchored Constraint</i> .	29
Gambar 4.1	Model seismik <i>Q-attenuated</i> : (a) Koefisien Refleksi, (b) Frekuensi Dominan, (c) Seismik <i>Q-attenuated</i> , dan (d) <i>Time-Variant Ricker Wavelet</i> .	35
Gambar 4.2	Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor pada data seismik <i>Q-attenuated</i> : (a) <i>Frequency Recovery</i> , (b) <i>Wavelet Amplitude</i> (τ, f), (c) <i>Spectrogram</i> $ G(\tau, f) $, (d) <i>Wavelet Phase</i> (τ, f), dan (e) <i>Gabor Time-Variant Wavelet</i> .	36
Gambar 4.3	Evaluasi hasil Dekonvolusi Gabor: (a) <i>Frequency Recovery</i> , (b) <i>Frequency Error</i> , dan (c) <i>Trace Recovery Correlation</i> .	37
Gambar 4.4	Perbandingan <i>trace</i> seismik: (a) Seismik <i>Q-attenuated</i> , (b) <i>trace</i> sintetis hasil konvolusi Gabor (<i>Gabor Convolution</i>), dan (c) <i>overlay</i> .	38
Gambar 4.5	Kondisi awal seismik <i>Q-attenuated</i> sebelum DTW: (a) <i>Gabor Synthetic Trace</i> , (b) <i>Q-Att Seismic Stretch</i> 10%, (c) <i>Q-Att Seismic Stretch</i> 20%, (d) <i>Q-Att</i>	

	<i>Seismic Stretch 30%, (e) Q-Att Seismic Squeeze 10%, (f) Q-Att Seismic Squeeze 20%, dan (g) Q-Att Seismic Squeeze 30%.</i>	40
Gambar 4.6	Hasil <i>auto well tie</i> DTW <i>Fixed Band</i> pada seismik Q-Attenuated: (a) <i>stretched 10%</i> , (b) <i>stretched 20%</i> , (c) <i>stretched 30%</i> , (d) <i>squeezed 10%</i> , (e) <i>squeezed 20%</i> , dan (f) <i>squeezed 30%</i>	41
Gambar 4.7	Jalur penyelarasan (<i>warping path</i>) DTW <i>Fixed Band</i> pada seismik Q-Attenuated: (a) <i>stretched 10%</i> , (b) <i>stretched 20%</i> , (c) <i>stretched 30%</i> , (d) <i>squeezed 10%</i> , (e) <i>squeezed 20%</i> , dan (f) <i>squeezed 30%</i>	43
Gambar 4.8	Hasil kurva waktu-kedalaman (<i>Time-Depth Relation</i>) DTW <i>Fixed Band</i> pada seismik sintetis Q-Attenuated: (a) <i>stretched 10%</i> , (b) <i>stretched 20%</i> , (c) <i>stretched 30%</i> , (d) <i>squeezed 10%</i> , (e) <i>squeezed 20%</i> , dan (f) <i>squeezed 30%</i> ..	44
Gambar 4.9	Hasil <i>auto well tie</i> DTW <i>Marker Anchored</i> pada seismik sintetis Q-Attenuated: (a) <i>stretched 10%</i> , (b) <i>stretched 20%</i> , (c) <i>stretched 30%</i> , (d) <i>squeezed 10%</i> , (e) <i>squeezed 20%</i> , dan (f) <i>squeezed 30%</i>	45
Gambar 4.10	Jalur penyelarasan (<i>warping path</i>) DTW <i>Marker Anchored</i> pada seismik sintetis Q-Attenuated: (a) <i>stretched 10%</i> , (b) <i>stretched 20%</i> , (c) <i>stretched 30%</i> (d) <i>squeezed 10%</i> , (e) <i>squeezed 20%</i> , dan (f) <i>squeezed 30%</i>	47
Gambar 4.11	Hasil kurva waktu-kedalaman (<i>Time-Depth Relation</i>) DTW <i>Marker Anchored</i> pada seismik sintetis Q-Attenuated: (a) <i>stretched 10%</i> , (b) <i>stretched 20%</i> , (c) <i>stretched 30%</i> (d) <i>squeezed 10%</i> , (e) <i>squeezed 20%</i> , dan (f) <i>squeezed 30%</i> ...	48
Gambar 4.12	Kondisi awal <i>pre-tie</i> sumur NSR-1: (a) <i>Acoustic Impedance</i> (Corrected TWT), (b) <i>Reflectivity Coefficient</i> (Corrected TWT), dan (c) <i>Near-Well Seismic Trace</i> (Seismic Domain).	50
Gambar 4.13	Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor NSR-1: (a) <i>Frequency Recovery</i> , (b) <i>Wavelet Amplitude</i> (τ, f), (c) <i>Spectrogram</i> $ G(\tau, f) $, (d) <i>Wavelet Phase</i> (τ, f), dan (e) <i>Gabor Time-Variant Wavelet Waveform Overlay</i>	51
Gambar 4.14	Kondisi awal seismogram sintetis terhadap <i>trace</i> seismik NSR-1: (a) <i>Gabor Synthetic</i> (Gabor Convolution), (b) <i>Near-Well Seismic Trace</i> (Seismic Domain), dan (c) <i>Overlay</i>	52
Gambar 4.15	Hasil DTW <i>Fixed Band</i> NSR-1: (a) perbandingan <i>Synthetic Trace</i> (After DTW) terhadap <i>Seismic Trace</i> (Near-NSR-1), (b) kurva <i>Time Depth</i> sebelum dan sesudah DTW, dan (c) <i>warping path</i>	53
Gambar 4.16	Hasil DTW <i>Marker Anchored</i> NSR-1: (a) perbandingan <i>Synthetic Trace</i> (After DTW) terhadap <i>Seismic Trace</i> (Near-NSR-1), (b) kurva <i>Time Depth</i> sebelum dan sesudah koreksi, dan (c) <i>warping path</i>	54
Gambar 4.17	Kondisi awal <i>pre-tie</i> sumur Torosa-2: (a) <i>Acoustic Impedance</i> (Corrected TWT), (b) <i>Reflectivity Coefficient</i> (Corrected TWT), dan (c) <i>Near-Well Seismic Trace</i> (Seismic Domain).	55
Gambar 4.18	Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor Torosa-2: (a) <i>Frequency Recovery</i> , (b) <i>Wavelet Amplitude</i> (τ, f), (c) <i>Spectrogram</i> $ G(\tau, f) $, (d) <i>Wavelet Phase</i> (τ, f), dan (e) <i>Gabor Time-Variant Wavelet Waveform Overlay</i>	56
Gambar 4.19	ondisi awal seismogram sintetis terhadap <i>trace</i> seismik Torosa-2: (a) <i>Gabor Synthetic</i> (Gabor Convolution), (b) <i>Near-Well Seismic Trace</i> (Seismic Domain), dan (c) <i>Overlay</i>	57

Gambar 4.20	Hasil DTW <i>Fixed Band</i> Torosa-2: (a) perbandingan <i>Synthetic Trace</i> (After DTW) terhadap <i>Seismic Trace</i> (Near-Torosa-2), (b) kurva <i>Time Depth</i> sebelum dan sesudah koreksi, dan (c) <i>warping path</i>	58
Gambar 4.21	Hasil DTW <i>Marker Anchored</i> Torosa-2: (a) perbandingan <i>warped synthetic</i> terhadap <i>real seismic trace</i> , (b) kurva TDC sebelum dan sesudah koreksi, dan (c) <i>warping path</i> beserta <i>shift curve</i>	59
Gambar 4.22	Kondisi awal <i>pre-tie</i> sumur Torosa-3: (a) <i>Acoustic Impedance</i> (Corrected TWT), (b) <i>Reflectivity Coefficient</i> (Corrected TWT), dan (c) <i>Near-Well Seismic Trace</i> (Seismic Domain).	60
Gambar 4.23	Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor Torosa-3: (a) <i>Frequency Recovery</i> , (b) <i>Wavelet Amplitude</i> (τ, f), (c) <i>Spectrogram</i> $ G(\tau, f) $, (d) <i>Wavelet Phase</i> (τ, f), dan (e) <i>Gabor Time-Variant Wavelet Waveform Overlay</i>	61
Gambar 4.24	Kondisi awal seismogram sintetis terhadap <i>trace</i> seismik Torosa-3: (a) <i>Gabor Synthetic</i> (Gabor Convolution), (b) <i>Near-Well Seismic Trace</i> (Seismic Domain), dan (c) <i>Overlay</i>	62
Gambar 4.25	Hasil DTW <i>Fixed Band</i> Torosa-3: (a) perbandingan <i>Synthetic Trace</i> (After DTW) terhadap <i>Seismic Trace</i> (Near-Torosa-3), (b) kurva <i>Time Depth</i> sebelum dan sesudah koreksi, dan (c) <i>warping path</i>	63
Gambar 4.26	Hasil DTW <i>Marker Anchored</i> Torosa-3: (a) perbandingan <i>Synthetic Trace</i> (After DTW) terhadap <i>Seismic Trace</i> (Near-Torosa-3), (b) kurva <i>Time Depth</i> sebelum dan sesudah koreksi, dan (c) <i>warping path</i>	64
Gambar 4.27	Kondisi awal <i>pre-tie</i> sumur Torosa-4: (a) <i>Acoustic Impedance</i> (Corrected TWT), (b) <i>Reflectivity Coefficient</i> (Corrected TWT), dan (c) <i>Near-Well Seismic Trace</i> (Seismic Domain).	65
Gambar 4.28	Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor Torosa-4: (a) <i>Frequency Recovery</i> , (b) <i>Wavelet Amplitude</i> (τ, f), (c) <i>Spectrogram</i> $ G(\tau, f) $, (d) <i>Wavelet Phase</i> (τ, f), dan (e) <i>Gabor Time-Variant Wavelet Waveform Overlay</i>	66
Gambar 4.29	Kondisi awal seismogram sintetis terhadap <i>trace</i> seismik Torosa-4: (a) <i>Gabor Synthetic</i> (Gabor Convolution), (b) <i>Near-Well Seismic Trace</i> (Seismic Domain), dan (c) <i>Overlay</i>	67
Gambar 4.30	Hasil DTW <i>Fixed Band</i> Torosa-4: (a) perbandingan <i>Synthetic Trace</i> (After DTW) terhadap <i>Seismic Trace</i> (Near-Torosa-4), (b) kurva <i>Time Depth</i> sebelum dan sesudah koreksi, dan (c) <i>warping path</i>	68
Gambar 4.31	Hasil DTW <i>Marker Anchored</i> Torosa-4: (a) perbandingan <i>Synthetic Trace</i> (After DTW) terhadap <i>Seismic Trace</i> (Near-Torosa-4), (b) kurva <i>Time Depth</i> sebelum dan sesudah koreksi, dan (c) <i>warping path</i>	69
Gambar 4.32	Kondisi awal <i>pre-tie</i> sumur Torosa-5: (a) <i>Acoustic Impedance</i> (Corrected TWT), (b) <i>Reflectivity Coefficient</i> (Corrected TWT), dan (c) <i>Near-Well Seismic Trace</i> (Seismic Domain).	70
Gambar 4.33	Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor Torosa-5: (a) <i>Frequency Recovery</i> , (b) <i>Wavelet Amplitude</i> (τ, f), (c) <i>Spectrogram</i> $ G(\tau, f) $, (d) <i>Wavelet Phase</i> (τ, f), dan (e) <i>Gabor Time-Variant Wavelet Waveform Overlay</i>	71
Gambar 4.34	Kondisi awal seismogram sintetis terhadap <i>trace</i> seismik Torosa-5: (a) <i>Gabor Synthetic</i> (Gabor Convolution), (b) <i>Near-Well Seismic Trace</i> (Seismic Domain), dan (c) <i>Overlay</i>	72

Gambar 4.35	Hasil DTW <i>Fixed Band</i> Torosa-5: (a) perbandingan <i>Synthetic Trace</i> (After DTW) terhadap <i>Seismic Trace</i> (Near-Torosa-5), (b) kurva <i>Time Depth</i> sebelum dan sesudah koreksi, dan (c) <i>warping path</i>	73
Gambar 4.36	Hasil DTW <i>Marker Anchored</i> Torosa-5: (a) perbandingan <i>Synthetic Trace</i> (After DTW) terhadap <i>Seismic Trace</i> (Near-Torosa-5), (b) kurva <i>Time Depth</i> sebelum dan sesudah koreksi, dan (c) <i>warping path</i>	74
Gambar 4.37	Seismik 2D setelah <i>Dynamic Time Warping Constrain Fixed Band</i>	76
Gambar 4.38	Seismik 2D setelah <i>Dynamic Time Warping Constrain Marker Anchored</i>	77

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 <i>Well Data Availability</i>	16
Tabel 4.1 Ringkasan metrik evaluasi Dekonvolusi Gabor pada data sintetis <i>Q-attenuated</i>	39
Tabel 4.2 Ringkasan <i>dynamic time warping</i> terhadap seismik sintetis.	49
Tabel 4.3 Ringkasan metrik evaluasi Dekonvolusi Gabor pada data lapangan Torosa.....	75
Tabel 4.4 Ringkasan hasil DTW <i>Fixed Band</i> pada data lapangan Torosa.....	76
Tabel 4.5 Ringkasan hasil DTW <i>Marker Anchored</i> pada data lapangan Torosa.....	78

Halaman ini sengaja dikosongkan

GLOSSARIUM

Absorpsi anelastik	: Konversi energi mekanik gelombang seismik menjadi panas akibat sifat viskoelastis batuan.
Arbitrary line	: Lintasan penampang seismik 2D yang diekstrak dari volume seismik 3D melewati seluruh lokasi sumur penelitian.
Atenuasi seismik	: Penurunan amplitudo gelombang seismik seiring bertambahnya jarak tempuh akibat <i>geometrical spreading</i> dan absorpsi anelastik.
Backtracking	: Penelusuran balik pada matriks akumulasi DTW untuk mengidentifikasi jalur penyelarasan optimal dengan total biaya minimum.
Biaya kumulatif (accumulated cost)	: Total biaya minimum yang terakumulasi secara rekursif dari titik awal hingga sel tertentu dalam matriks DTW.
Biaya lokal (local cost)	: Kuadrat selisih amplitudo antara dua sampel yang berpasangan dari trace seismik dan seismogram sintetis pada titik tertentu dalam matriks DTW.
Bulk shift	: Penyesuaian waktu secara seragam pada seluruh seismogram sintetis dalam proses <i>well-seismic tie</i> manual.
Checkshot correction	: Kalibrasi log sonik terhadap data <i>checkshot</i> atau VSP untuk menghasilkan kurva waktu-kedalaman yang akurat.
Constraint Sakoe-Chiba	: Batasan global DTW yang membatasi jalur penyelarasan agar tidak menyimpang lebih dari w sampel dari diagonal utama matriks biaya.
Correlation coefficient (CC)	: Metrik yang mengukur kemiripan antara seismogram sintetis dan <i>trace</i> seismik, bernilai antara -1 hingga 1.
Dispersi fase	: Fenomena pada medium viskoelastis di mana komponen frekuensi berbeda dari wavelet yang sama tidak tiba bersamaan setelah menempuh suatu jarak.
Drift	: Selisih antara waktu tempuh integrasi log sonik dan waktu tempuh <i>checkshot</i> pada kedalaman yang sama.
Dynamic Time Warping (DTW)	: Metode penyelarasan dua deret waktu secara non-linier berbasis pemrograman dinamis, yang menemukan jalur penyelarasan optimal dengan total selisih amplitudo minimum antara kedua deret waktu.
Faktor kualitas Q	: Besaran tak berdimensi yang menyatakan tingkat atenuasi suatu medium; nilai Q tinggi menunjukkan absorpsi energi rendah.
Fixed Band	: Pendekatan <i>constraint</i> DTW dengan lebar pita w yang konstan di seluruh panjang <i>trace</i> tanpa mempertimbangkan batas formasi.
Forward Q filter	: Operator dalam domain frekuensi yang memodelkan efek atenuasi Q secara terkontrol pada seismogram sintetis.
Frekuensi Nyquist	: Frekuensi maksimum yang dapat direpresentasikan data digital, bernilai setengah dari <i>sampling rate</i> , sebagai batas atas estimasi fase Dekonvolusi Gabor.

<i>Geometrical spreading</i>	: Penurunan amplitudo gelombang seismik akibat penyebaran energi ke area yang semakin luas seiring bertambahnya jarak dari sumber.
<i>Grid search</i>	: Metode pencarian parameter optimal secara eksaustif dengan mengevaluasi seluruh kandidat nilai pada kisi yang telah ditentukan.
<i>Instantaneous bandwidth</i>	: Lebar spektral sinyal seismik pada setiap sampel waktu, digunakan bersama <i>instantaneous frequency</i> untuk menghitung <i>dominant frequency</i> dan lebar jendela Gabor.
<i>Instantaneous frequency</i>	: Turunan fasa sinyal seismik terhadap waktu dibagi 2π , merepresentasikan frekuensi sesaat pada setiap sampel.
Jalur penyelarasan (<i>warping path</i>)	: Rangkaian pasangan indeks yang memetakan sampel dari satu deret waktu ke satu atau lebih sampel deret waktu lainnya dengan total biaya minimum.
Matriks biaya (<i>cost matrix</i>)	: Matriks yang merepresentasikan selisih amplitudo antara setiap pasangan sampel dari trace seismik dan seismogram sintetis yang akan diselaraskan dalam algoritma DTW.
Optimasi Bayesian (<i>Optuna</i>)	Framework optimasi hyperparameter berbasis algoritma Tree-structured Parzen Estimator (TPE) yang mengarahkan pencarian parameter secara efisien berdasarkan hasil trial sebelumnya.
<i>Residual drift time</i>	: Pergeseran waktu <i>residual</i> yang terakumulasi secara progresif seiring kedalaman akibat <i>residual phase error</i> pada estimasi Dekonvolusi Gabor.
<i>Residual phase error</i>	: Kesalahan fasa yang tidak terkoreksi pada estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor karena transformasi Hilbert hanya mengoreksi fasa hingga frekuensi Nyquist seismik.
<i>Shift curve</i>	: Kurva yang menyatakan besaran koreksi waktu pada setiap sampel seismogram sintetis, dikonversi dari jalur penyelarasan DTW untuk memperbarui kurva waktu-kedalaman.
<i>Spectral smoothing</i>	: Penghalusan spektrum amplitudo dalam domain time-frequency dengan asumsi reflektivitas bumi bersifat white secara statistik, untuk mengestimasi wavelet per jendela waktu.
<i>Squeeze</i>	: Kondisi seismogram sintetis yang tampak lebih pendek dari trace seismik akibat kecepatan interval yang lebih tinggi dari referensi.
<i>Stretch</i>	: Kondisi seismogram sintetis yang tampak lebih panjang dari trace seismik akibat kecepatan interval yang lebih rendah dari referensi.
<i>Tops error</i>	: Selisih waktu antara posisi marker formasi pada trace seismik dan seismogram sintetis setelah penyelarasan DTW, dengan batas yang dapat diterima kurang dari 5 ms per marker.
Transformasi Hilbert	: Operator matematis yang digunakan dalam Dekonvolusi Gabor untuk menentukan spektrum fase wavelet dari logaritma natural spektrum amplitudo.
VSP (<i>Vertical Seismic Profile</i>)	: Data akuisisi seismik yang direkam oleh geofon di dalam lubang bor pada berbagai kedalaman, digunakan sebagai referensi waktu-kedalaman yang akurat.
Wiener filter	: Filter dalam domain time-frequency pada Dekonvolusi Gabor yang mengestimasi wavelet dengan meminimalkan selisih kuadrat antara trace seismik dan hasil konvolusi per segmen waktu.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Well-seismic tie merupakan tahapan mendasar dalam interpretasi seismik yang menghubungkan data log sumur dalam domain kedalaman dengan data seismik dalam domain waktu. Melalui proses ini dapat ditentukan kurva waktu-kedalaman, estimasi wavelet, serta validasi inversi seismik dan karakterisasi reservoir (White & Simm, 2003). Secara konvensional, proses ini melibatkan pembuatan seismogram sintetik melalui konvolusi wavelet dengan seri koefisien refleksi (RC), dilanjutkan penyesuaian fase dan waktu melalui *bulk shift*, *stretching*, dan *squeezing* secara manual. Ketergantungan pada penilaian subjektif interpreter menyebabkan hasil pengikatan sulit direproduksi secara konsisten, terutama ketika diterapkan pada banyak sumur sekaligus (Simm & Bacon, 2014).

Permasalahan lain yang sering dijumpai di lapangan adalah efek atenuasi seismik akibat faktor kualitas Q. Gelombang seismik yang merambat melalui batuan mengalami penyerapan energi yang bersifat *frequency-dependent*, menyebabkan frekuensi mengalami penurunan seiring bertambahnya kedalaman. Fenomena ini menghasilkan wavelet yang bervariasi terhadap waktu (*time-variant wavelet*), sehingga pendekatan ekstraksi wavelet stasioner tidak lagi memadai untuk data dengan atenuasi Q yang signifikan (Margrave & Lamoureux, 2001). Dekonvolusi Gabor dipilih sebagai metode estimasi wavelet karena bekerja dalam domain *time-frequency* menggunakan jendela Gaussian yang secara adaptif menyesuaikan resolusi terhadap perubahan spektral lokal, sehingga mampu menangani wavelet non-stasioner akibat atenuasi Q tanpa memerlukan nilai Q secara eksplisit (Margrave & Lamoureux, 2001).

Ketidakselarasan temporal antara seismogram sintetik dan *trace* seismik selama ini diselesaikan secara manual, di mana interpreter menerapkan *stretching* dan *squeezing* berdasarkan pengamatan visual. Kelemahan pendekatan ini terletak pada ketergantungannya terhadap penilaian subjektif, yang menyebabkan hasil koreksi sulit direproduksi secara konsisten ketika diterapkan pada banyak sumur (Simm & Bacon, 2014). *Dynamic Time Warping* (DTW) menawarkan pendekatan yang lebih terukur dengan memanfaatkan posisi marker formasi sebagai titik jangkar dalam proses penyelarasan non-linier, sehingga besaran koreksi waktu dapat ditentukan secara kuantitatif (Herrera et al., 2014).

Berdasarkan permasalahan di atas, penelitian ini menerapkan otomatisasi *well-seismic tie* melalui dua tahap yaitu estimasi wavelet non-stasioner menggunakan Dekonvolusi Gabor yang bekerja dalam domain *time-frequency*, serta penyelarasan seismogram sintetik terhadap *trace* seismik menggunakan *Dynamic Time Warping*. Validasi dilakukan terlebih dahulu menggunakan data sintesis terkontrol sebelum metode diimplementasikan pada data nyata Lapangan Torosa, Cekungan Browse.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka dapat ditentukan rumusan masalah dari penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

1. Bagaimana kemampuan Dekonvolusi Gabor dalam mengestimasi wavelet non-stasioner pada data seismik yang mengalami atenuasi Q?
2. Bagaimana kemampuan algoritma *Dynamic Time Warping* (DTW) dalam menyelaraskan seismogram sintetik terhadap *trace* seismik secara otomatis pada kondisi peregangan dan pemampatan (*stretch and squeeze*)?
3. Bagaimana akurasi metode *well-seismic tie* otomatis berbasis integrasi Dekonvolusi Gabor dan DTW pada data nyata Lapangan Torosa, Cekungan Browse?

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah yang telah didapatkan, maka dapat ditentukan Batasan masalah dari penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

1. Estimasi wavelet non-stasioner dilakukan menggunakan kerangka Dekonvolusi Gabor dengan jendela Gaussian adaptif dalam domain *time-frequency*, tanpa perbandingan dengan metode lain seperti STFT, CWT, atau dekonvolusi prediktif.
2. Algoritma DTW diterapkan dengan pendekatan *Fixed Band* (Sakoe-Chiba) dan *Marker Anchored*, tanpa perbandingan dengan metode penyelarasan lain seperti *Local Similarity* (LSIM) atau *Blocked Dynamic Warping* (BDW).
3. Koreksi *residual phase shift* pada estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor di zona dalam tidak dilakukan, karena fenomena ini merupakan keterbatasan inheren dari estimasi fasa melalui transformasi Hilbert.
4. Penelitian ini dibatasi pada evaluasi akurasi *well-seismic tie* otomatis dan tidak mencakup interpretasi geologi, karakterisasi reservoir, maupun inversi seismik.

1.4 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang didapatkan, maka dapat ditentukan tujuan dari penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

1. Menghasilkan estimasi wavelet non-stasioner dari data seismik yang mengalami atenuasi Q menggunakan Dekonvolusi Gabor untuk pembuatan seismogram sintetik.
2. Menyelaraskan seismogram sintetik terhadap *trace* seismik secara otomatis menggunakan algoritma DTW.
3. Menghasilkan kurva waktu-kedalaman (*time-depth curve*) dari proses *well-seismic tie* otomatis pada data nyata Lapangan Torosa, Cekungan Browse.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini, yaitu sebagai inovasi pengembangan metodologi *well-seismic tie* yang lebih objektif dan dapat direproduksi. Dari sisi terapan, hasil penelitian diharapkan mengurangi ketergantungan pada penilaian subjektif interpreter serta mempercepat alur kerja interpretasi seismik pada banyak sumur secara bersamaan.

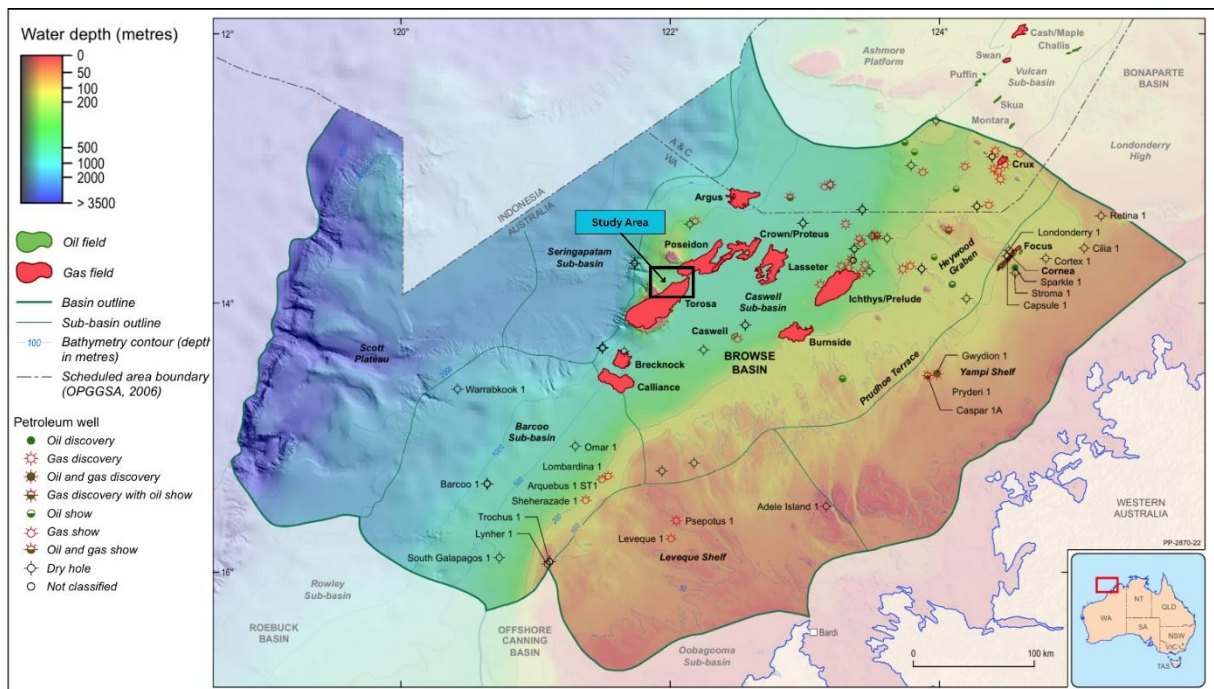
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

2.1.1 Geologi Regional

Cekungan Browse mencakup area seluas sekitar 140.000 km², terdiri dari Sub-cekungan Caswell, Barcoo, dan Seringapatam, *Scott Plateau*, serta Yampi Shelf dan Leveque Shelf sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.1. Cekungan ini berbatasan dengan Sub-cekungan Rowley di Cekungan Roebuck di barat daya, dan Sub-cekungan Vulcan dan Anjungan Ashmore di Cekungan Bonaparte di timur laut.

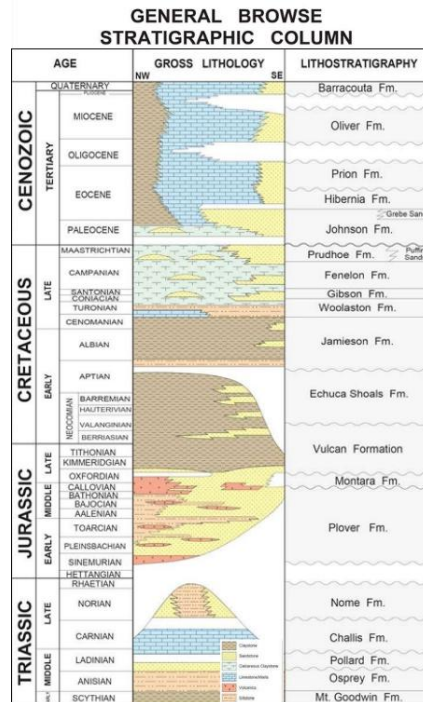


Gambar 2.1 Geologi Regional Cekungan Browse (Geoscience Australia, 2023).

Sub-cekungan Caswell menjadi pusat deposit utama, memuat suksesi sedimen Paleozoikum, Mesozoikum, dan Kenozoikum dengan ketebalan lebih dari 15.000 m. Di sinilah sebagian besar akumulasi hidrokarbon komersial berada (Rollet et al., 2016). Lapangan Torosa terletak pada *Scott Reef Trend* di bagian barat Sub-cekungan Barcoo, sekitar 3,6 km di barat laut lokasi pengeboran North Scott Reef-1. Jebakan Torosa berupa antiklin asimetris berarah NE–SW, dibatasi sistem sesar turun di sayap barat yang menggeser interval reservoir utama JP1 lebih dari 1.500 m (Woodside Energy Ltd, 2007).

2.1.1.1 Stratigrafi Regional

Urutan stratigrafi pada Cekungan Browse dari periode *Triassic* Awal hingga Kuartar dirangkum dalam kolom litostratigrafi pada Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Kolom Litostratigrafi Cekungan Browse (ConocoPhillips, 2011).

Dari formasi tertua hingga termuda, interval *Triassic* diwakili oleh batuan dasar yang menjadi batas bawah seluruh suksesi sedimen di Lapangan Torosa. Di atasnya terdapat Formasi Plover (*Hettangian–Callovian*) sebagai reservoir utama Lapangan Torosa, tersusun atas batupasir interkalasi serpih yang terendapkan di lingkungan fluvial-delta hingga *marginal marine*, mencakup unit Upper Plover dan Lower Plover. Di atasnya, Formasi Montara (*Jurassic* Akhir) tersusun atas batulanau, serpih, dan batupasir dengan sisipan batuan vulkanik yang terendapkan pada lingkungan delta hingga *shoreline* (Rollet et al., 2016). Formasi Vulcan (*Tithonian–Berriasian*) tersusun atas batulempung dan batupasir yang terendapkan pada lingkungan delta hingga *slope fan*, dan berperan sebagai batuan sumber sekunder cekungan (Rollet et al., 2016).

Interval *Cretaceous* dimulai dari Formasi Echuca Shoals (*Berriasian–Barremian*) yang didominasi batulempung dan batulanau pada lingkungan *slope fan*, diikuti Formasi Jamieson (*Aptian–Santonian*) berupa *claystone* masif yang berfungsi sebagai *seal* lokal di atas reservoir Plover. Di atasnya, Formasi Woolaston/Gibson (*Turonian–Maastrichtian*) tersusun atas *claystone* karbonat dan napal yang menjadi *seal* utama sistem petroleum *Jurassic* ((Rollet et al., 2016). Interval *Cenozoic* terdiri dari Formasi Johnson (*Maastrichtian–Paleocene*) berupa batulempung berkapur dan napal pada lingkungan *middle* hingga *outer shelf*, diikuti Formasi Grebe (*Paleocene–Eocene*), Formasi Prion (*Eocene–Oligocene*), dan Formasi Oliver (*Oligocene–Miocene*) yang ketiganya tersusun atas batugamping dominan dengan sisipan batupasir dan lempung pada lingkungan *outer shelf* (Stephenson & Cadman, 1994). Paling atas, Formasi Barracouta (*Pleistocene–Quaternary*) berupa batugamping dan material lepas yang masih terendapkan hingga saat ini.

2.1.2 Konsep Dasar Metode Seismik

2.1.2.1 Gelombang Seismik

Seismik Refleksi merupakan metode geofisika dengan prinsip mengukur waktu yang dibutuhkan oleh gelombang seismik untuk melaju dari sumber gelombang kemudian terpantul pada setiap batas lapisan dan kembali ke *receiver* (Yilmaz, 2001). Secara matematis, *trace* seismik dimodelkan sebagai hasil konvolusi wavelet sumber dengan koefisien refleksi bumi ditambah komponen *noise*:

$$S_{seis}(t) = W(t) * RC(t) + n(t) \quad (2.1)$$

dimana $S(t)$ adalah *trace* seismik dalam waktu, $W(t)$ adalah wavelet dalam waktu, $RC(t)$ adalah koefisien refleksi, dan $n(t)$ adalah *noise* dalam waktu.

2.1.2.2 Impedansi Akustik

Impedansi akustik merupakan kemampuan dari batuan untuk melewatkan gelombang akustik. Impedansi Akustik diperoleh dari persamaan berikut:

$$AI = \rho \times v \quad (2.2)$$

dimana AI adalah Impedansi akustik $((g/cc) (m/s))$, ρ adalah densitas batuan g/cc , dan v adalah kecepatan gelombang yang melalui suatu batuan m/s . Kecepatan gelombang memiliki peran penting dalam mengontrol nilai AI karena variasinya secara lateral maupun vertikal lebih signifikan dibandingkan variasi densitas (Brown, 2010). Selisih nilai impedansi akustik dapat dijadikan parameter adanya perbedaan litologi, nilai porositas dan kandungan fluida yang terdapat didalam batuan.

2.1.2.3 Koefisien Refleksi

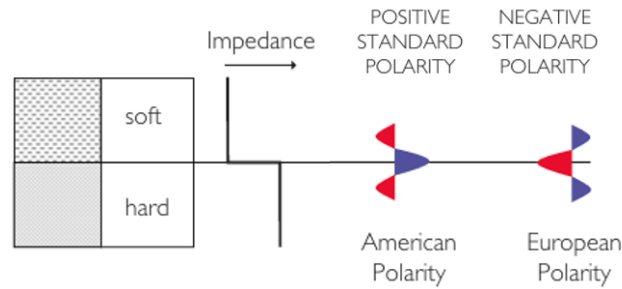
Gelombang seismik direfleksikan pada batas lapisan yang memiliki kontras nilai AI . Sehingga batas antar lapisan akan memiliki nilai koefisien refleksi dengan sudut datang 0° dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$RC = \frac{AI_2 - AI_1}{AI_2 + AI_1} \quad (2.3)$$

dimana RC adalah koefisien refleksi, ρ adalah densitas batuan (g/cc) , dan v adalah kecepatan gelombang yang melalui suatu batuan m/s . Nilai koefisien refleksi menentukan besaran amplitudo, fasa, dan polaritas pada setiap batas lapisan. dari reaksi dari amplitudo yang dihasilkan.

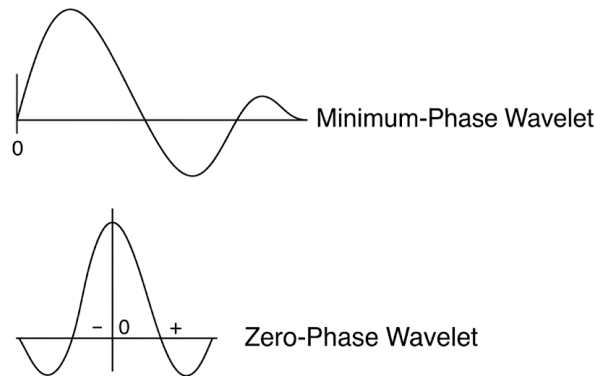
2.1.2.4 Polaritas dan Fasa

Polaritas dalam data seismik mengacu pada konvensi tanda amplitudo terhadap kontras impedansi akustik. Berdasarkan konvensi SEG, wavelet fasa nol yang berhadapan dengan reflektivitas positif (RC positif) ditampilkan sebagai *peak*, dan kondisi ini disebut *positive standard polarity* atau *SEG normal polarity* (Sheriff, 2002). Konvensi polaritas SEG untuk wavelet fasa nol diilustrasikan pada Gambar 2.3 berikut, yang memperlihatkan hubungan antara kontras impedansi akustik dengan tampilan amplitudo pada data seismik.



Gambar 2.3 SEG standard polarity zero phase wavelet (Sheriff, 2002).

Bahwa pada konvensi *positive standard polarity* (SEG normal), reflektivitas positif ditampilkan sebagai *peak*, sedangkan pada *negative standard polarity* (konvensi Eropa) reflektivitas positif ditampilkan sebagai *trough*. Pemahaman konvensi polaritas ini penting dalam proses well-seismic tie agar korelasi antara seismogram sintetis dan trace seismik dilakukan secara konsisten. Dua jenis fasa yang umum dijumpai dalam data seismik adalah *minimum phase* dan *zero phase*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 Wavelet minimum-phase dan zero-phase (Brown, 2010).

Trace fasa minimum memiliki energi yang terkonsentrasi di awal dan umumnya diasosiasikan dengan wavelet sumber ledakan. *Trace* fasa nol merupakan hasil *processing* dan memiliki puncak utama simetris dengan dua *side lobe* bertanda berlawanan di kedua sisinya. Pada *trace* fasa nol, batas koefisien refleksi terletak tepat pada puncak wavelet, sedangkan pada *trace* fasa minimum batas tersebut terletak pada *onset* wavelet (Brown, 2010).

2.1.2.5 Resolusi Vertikal

Kemampuan data seismik untuk menentukan atau membedakan ketebalan minimum lapisan berdasarkan panjang gelombang dan frekuensi data seismik. Jika ketebalan zona target lebih besar dari nilai resolusi vertikal, maka masing-masing reflektornya dapat terpisahkan dengan baik. Ketebalan dari suatu target harus mendekati atau di atas $\frac{\lambda}{4}$ yang disebut sebagai *tuning thickness*. Nilai panjang gelombang didefinisikan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.4)$$

dimana λ adalah panjang gelombang *m*, v adalah kecepatan gelombang *m/s*, dan f adalah frekuensi gelombang (Hz). Seiring bertambahnya kedalaman maka kecepatan akan semakin

tinggi, sementara frekuensi dominan menurun akibat atenuasi, sehingga *tuning thicknes* akan semakin besar (Sukmono, 1999).

2.1.2.6 Atenuasi dan Faktor Kualitas

Ketika gelombang seismik merambat melalui batuan, amplitudo mengalami penurunan seiring bertambahnya jarak dan waktu tempuh. Fenomena ini disebut atenuasi seismik, yang terjadi akibat dua mekanisme utama yaitu *geometrical spreading* dan absorpsi anelastik. Absorpsi anelastik adalah proses konversi energi mekanik gelombang menjadi panas akibat sifat viskoelastis batuan. Tingkat atenuasi suatu medium dinyatakan menggunakan faktor kualitas Q , yang didefinisikan sebagai (Toksoz et al., 1979):

$$Q = 2\pi \frac{E}{\Delta E} \quad (2.5)$$

dimana E adalah energi total gelombang dan ΔE adalah energi yang hilang per siklus. Nilai Q yang tinggi menunjukkan medium yang sedikit menyerap energi (atenuasi rendah), sedangkan nilai Q yang rendah menunjukkan absorpsi tinggi.

Mekanisme absorpsi anelastik bersifat bergantung frekuensi, di mana komponen frekuensi tinggi diserap lebih cepat dibandingkan komponen frekuensi rendah selama propagasi. Akibatnya, bandwidth wavelet menyempit secara progresif seiring bertambahnya kedalaman, dan wavelet seismik tidak lagi bersifat stasioner melainkan berubah bentuk secara kontinu terhadap waktu. Kondisi inilah yang menjadi dasar perlunya metode dekonvolusi yang mampu menangani wavelet non-stasioner, sebagaimana diuraikan pada Sub-bab 2.1.4.

2.1.3 Well Seismic Tie

Well-seismic tie adalah proses penghubungan data log sumur dalam domain kedalaman dengan data seismik dalam domain waktu di lokasi sumur. Secara umum, proses ini mencakup konversi domain kedalaman ke domain waktu menggunakan kurva waktu-kedalaman, pembuatan seismogram sintetik dari log impedansi akustik, dan penyelarasan seismogram sintetik terhadap trace seismik untuk menghasilkan korelasi yang optimal. Proses ini bertujuan membangun hubungan waktu-kedalaman yang konsisten, mengestimasi wavelet seismik, serta memvalidasi kualitas data seismik terhadap data sumur (White & Simm, 2003). Mengingat perbedaan domain, resolusi, dan sumber kesalahan antara kedua jenis data tersebut, *well-seismic tie* menjadi langkah kritis sebelum interpretasi seismik dan inversi seismik (Russell, 1988).

2.1.3.1 Sintetis Seismogram

Seismogram sintetik adalah representasi buatan dari respons seismik suatu sumur, dihasilkan melalui konvolusi wavelet dengan seri koefisien refleksi (RC) yang diturunkan dari log impedansi akustik sumur. Seismogram sintetik diperoleh melalui konvolusi:

$$S_{syn}(t) = W(t) * RC(t) \quad (2.6)$$

dimana $W(t)$ adalah wavelet yang digunakan. Kualitas sintetis seismogram sangat bergantung pada ketepatan estimasi wavelet baik dalam hal amplitudo, fasa, maupun panjang wavelet (Simm & Bacon, 2014).

2.1.3.2 Kurva Waktu-Kedalaman

Kurva waktu-kedalaman (*time-depth curve*) merupakan fungsi yang memetakan setiap kedalaman pada log sumur ke waktu dua-arah (TWT) pada data seismik. Kurva ini dibangun dari data *checkshot* atau integrasi log sonik, dan menjadi dasar konversi domain kedalaman ke domain waktu dalam proses *well-seismic tie*. Dalam praktiknya, integrasi log sonik menghasilkan kurva waktu-kedalaman yang memiliki penyimpangan (*drift*) terhadap data *checkshot* akibat akumulasi kesalahan pengukuran log pada setiap sampel kedalaman. Ketidakakuratan kurva waktu-kedalaman awal ini menyebabkan ketidakselarasan antara seismogram sintetik dan trace seismik, yang selanjutnya dikoreksi melalui proses penyelarasan seperti *bulk shift* atau DTW.

2.1.4 Dekonvolusi Gabor

Dekonvolusi Gabor adalah metode dekonvolusi yang beroperasi dalam domain waktu-frekuensi dengan memanfaatkan Gabor Transform untuk menangani wavelet seismik yang bersifat non-stasioner (Margrave & Lamoureux, 2001). Dekonvolusi Gabor memungkinkan estimasi wavelet yang bervariasi terhadap waktu sehingga mampu mengestimasi dan menghilangkan efek wavelet yang bersifat non-stasioner akibat atenuasi Q secara simultan (Chen et al., 2013).

2.1.4.1 Konsep Dasar Dekonvolusi

Dekonvolusi seismik secara umum bertujuan untuk membalik proses konvolusi guna memisahkan wavelet dari koefisien refleksi bumi. Pendekatan konvensional seperti dekonvolusi *spiking* dan dekonvolusi prediktif bekerja dalam domain waktu dengan asumsi bahwa wavelet bersifat stasioner. Asumsi ini tidak terpenuhi pada kondisi nyata di mana atenuasi Q menyebabkan peluruhan frekuensi tinggi secara progresif seiring bertambahnya kedalaman, sehingga wavelet berubah bentuk secara kontinu (Margrave & Lamoureux, 2001).

2.1.4.2 Transformasi Gabor

Transformasi Gabor mengadopsi prinsip *Short Time Fourier Transform* (STFT) dengan menggunakan jendela Gaussian yang digeser secara bertahap terhadap waktu. Penggunaan jendela Gaussian dipilih karena memberikan keseimbangan optimal antara resolusi waktu dan resolusi frekuensi sesuai prinsip ketidakpastian Heisenberg. Jendela yang terlalu sempit menghasilkan resolusi waktu tinggi tetapi resolusi frekuensi rendah, sedangkan jendela yang terlalu lebar menghasilkan resolusi waktu rendah tetapi resolusi frekuensi tinggi (Margrave & Lamoureux, 2001). Lebar jendela Gaussian bersifat adaptif terhadap kedalaman, menyesuaikan perubahan frekuensi dominan sinyal dari zona dangkal ke zona dalam. Hasil transformasi berupa matriks kompleks yang merepresentasikan kandungan frekuensi sinyal pada setiap titik waktu, sehingga variasi spektral wavelet akibat atenuasi Q dapat terlacak secara lokal pada setiap segmen waktu.

2.1.4.3 Estimasi Wavelet Non-Stasioner

Dalam kerangka Dekonvolusi Gabor, estimasi wavelet dilakukan secara lokal pada setiap jendela waktu melalui *spectral smoothing*, yaitu penghalusan spektrum amplitudo dalam domain *time-frequency* dengan asumsi bahwa koefisien refleksi bumi bersifat *white* secara statistik (Margrave & Lamoureux, 2001). Wavelet pada setiap segmen waktu diestimasi dari spektrum lokal trace seismik, sehingga perubahan kandungan frekuensi akibat atenuasi Q dapat dikompensasi secara bertahap dari dangkal ke dalam. Wavelet yang dihasilkan bersifat *time-*

variant dan merepresentasikan kondisi propagasi gelombang yang sesungguhnya pada setiap kedalaman.

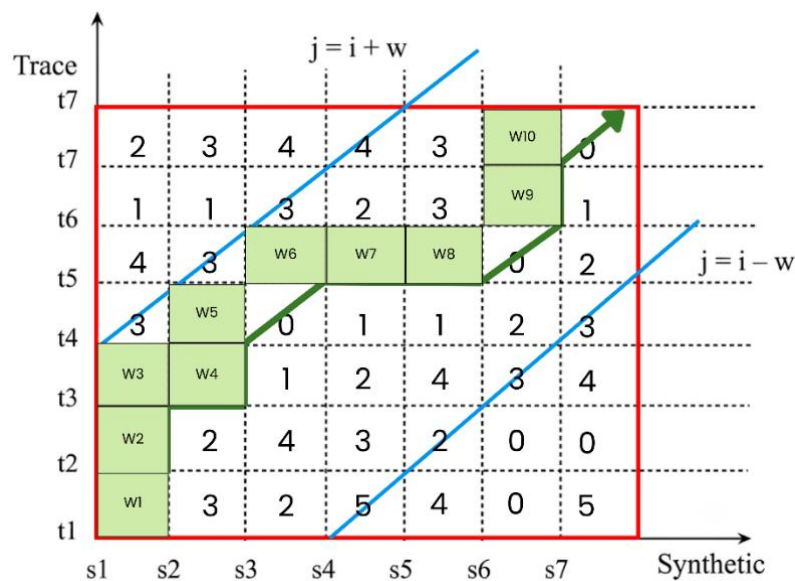
Pendekatan lain dalam estimasi wavelet pada kerangka Gabor adalah penggunaan Wiener filter dalam domain *time-frequency*, di mana wavelet diestimasi sebagai filter yang meminimalkan selisih kuadrat antara trace seismik dan hasil konvolusi wavelet dengan koefisien refleksi secara lokal pada setiap segmen waktu (Margrave & Lamoureux, 2001). Pendekatan ini memanfaatkan informasi koefisien refleksi yang diturunkan dari log sumur sebagai referensi estimasi, sehingga tidak bergantung pada asumsi *white reflectivity*. Parameter regularisasi pada Wiener filter berperan dalam menstabilkan estimasi terutama pada zona dalam di mana kandungan frekuensi tinggi telah terdegradasi akibat atenuasi Q (Chen et al., 2013).

2.1.5 Dynamic Time Warping

Dynamic time warping (DTW) adalah metode untuk menyesuaikan sumbu waktu secara non-linier dan menyelaraskan urutan deret waktu (*time series*) (Berndt & Clifford, 1994). Dalam konteks pencocokan sumur ke seismik, metode ini dapat melakukan pergeseran waktu pada peristiwa seismik dalam seismogram sintetik untuk menyelaraskan dengan trace seismik (Herrera et al., 2014). Tujuan utama DTW adalah menentukan jalur penyelarasan optimal antara dua urutan dengan total jarak minimum di antara keduanya. Jalur penyelarasan ini merupakan serangkaian pasangan indeks yang memetakan setiap elemen dari satu urutan ke satu atau lebih elemen dari urutan lainnya (*one-to-many*).

2.1.5.1 Prinsip Kerja Dynamic Time Warping

Algoritma DTW bekerja dengan membangun *cost matrix* yang merepresentasikan selisih amplitudo antara setiap pasangan sampel dari dua deret waktu yang akan diselaraskan (Berndt & Clifford, 1994). Prinsip kerja algoritma DTW dalam membangun *cost matrix* dan menentukan jalur penyelarasan optimal diilustrasikan pada Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Matriks biaya *Dynamic Time Warping* (modifikasi dari Chen et al., 2013).

Matriks biaya terbentuk dari selisih amplitudo antara trace seismik dan seismogram sintetik. *accumulated cost matrix* dihitung secara rekursif dari sudut kiri bawah matriks menggunakan

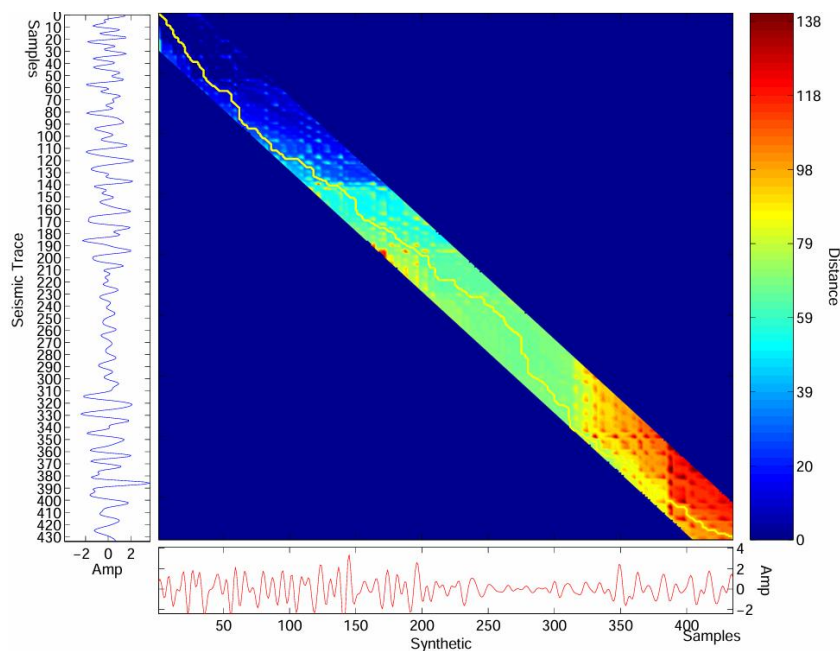
pendekatan pemrograman dinamis, di mana setiap sel menyimpan total *minimum cost matrix* yang dapat dicapai dari titik awal hingga sel tersebut. Proses akumulasi ini mempertimbangkan tiga arah pergerakan yang diizinkan, yaitu horizontal, vertikal, dan diagonal.

Setelah matriks akumulasi terbentuk, dilakukan *backtracking* dari sudut kanan atas menuju sudut kiri bawah untuk mengidentifikasi *warping path*, yaitu rangkaian pasangan indeks dengan total biaya akumulatif minimum. *warping path* ditandai dengan sel-sel berwarna hijau pada Gambar 2.5 dalam *constraint* Sakoe-Chiba yang dibatasi oleh garis diagonal $j = i + w$ dan $j = i - w$, ditunjukkan dengan garis biru.

Warping path tersebut kemudian dikonversi menjadi kurva pergeseran waktu (*shift curve*) yang menyatakan besaran koreksi waktu pada setiap sampel seismogram sintetik agar selaras dengan trace seismik. Kurva pergeseran waktu ini selanjutnya digunakan untuk memperbarui kurva waktu-kedalaman, sehingga ketidakselarasan residual antara seismogram sintetik dan trace seismik dapat diminimalkan secara kuantitatif (Herrera et al., 2014).

2.1.5.2 Constraint Sakoe-Chiba

Tanpa pembatasan, DTW dapat menghasilkan deformasi sumbu waktu yang tidak realistis secara geologis. Untuk mencegah hal ini, diterapkan *global constraint* Sakoe-Chiba (Sakoe, 1978), yang membatasi jalur penyelarasan agar tidak menyimpang terlalu jauh dari diagonal utama matriks biaya, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.6.



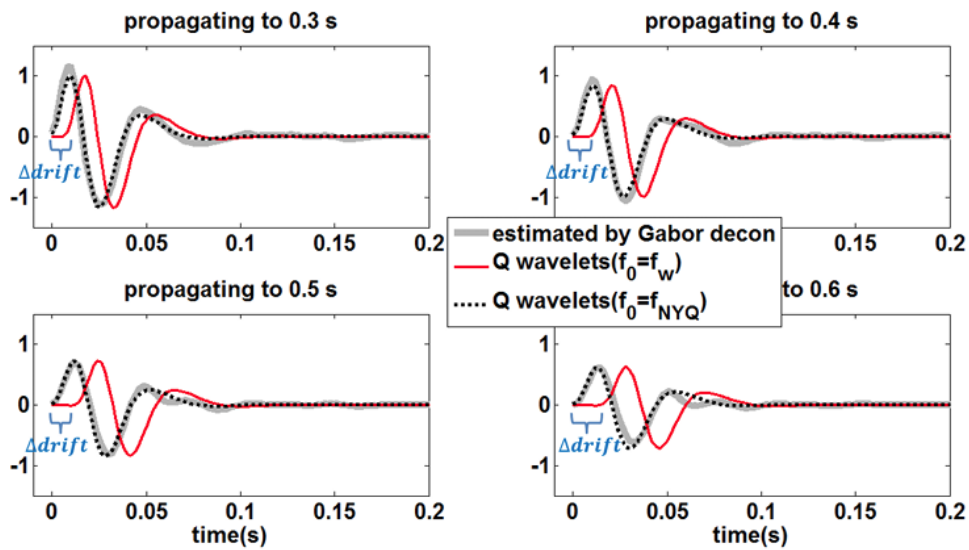
Gambar 2.6 Perbandingan propagating wavelet estimasi dan wavelet Q dalam domain waktu (Chen et al., 2013).

Dapat dilihat bahwa jalur penyelarasan dibatasi dalam pita diagonal yang lebarnya ditentukan oleh parameter w , sehingga pergeseran waktu maksimum yang diizinkan terkontrol secara eksplisit. Selain pendekatan *fixed band*, terdapat pendekatan yang mengintegrasikan informasi geologi berupa marker formasi ke dalam kerangka DTW sebagai *hard constraint*. Wang et al. (2017) mengembangkan *Blocked Dynamic Warping* (BDW) yang membatasi perubahan kecepatan interval agar konstan atau linear di dalam setiap lapisan geologi, sehingga

menghasilkan kurva waktu-kedalaman yang lebih realistis secara geologis. (Yao et al., 2025) mengembangkan kerangka DTW dengan *hard constraint* berbasis marker stratigrafi, di mana penyelarasan diselesaikan per segmen antar titik jangkar sehingga jalur penyelarasan dijamin melewati posisi marker yang diketahui. Meskipun demikian, kurva pergeseran waktu pada pendekatan tersebut tetap diturunkan dari *warping path* melalui tahap *postprocessing*, sehingga nilai pergeseran waktu pada posisi marker tidak secara eksplisit dijamin bernilai nol. Pendekatan yang secara langsung menjamin pergeseran waktu bernilai nol pada posisi marker tanpa tahap *postprocessing* tambahan belum ditemukan dalam literatur yang ada.

2.1.6 Dispersi Fase Akibat Atenuasi Q

Atenuasi anelastik tidak hanya menyebabkan peluruhan amplitudo pada frekuensi tinggi, tetapi juga memperkenalkan dispersi fase yang bersifat *causal* sesuai hubungan Kramers-Kronig (Aki & Richards, 2002). Dalam medium viskoelastis, kecepatan gelombang seismik bergantung pada frekuensi, sehingga komponen frekuensi berbeda dari wavelet yang sama tidak tiba bersamaan setelah menempuh jarak tertentu. Wavelet yang merambat melalui medium dengan nilai Q rendah tidak hanya mengalami penyempitan bandwidth, tetapi juga mengakumulasi pergeseran fase yang semakin besar seiring kedalaman (Cui & Margrave, 2015). Perbandingan antara *propagating wavelet* hasil estimasi Gabor Dekonvolusi dengan wavelet Q sesungguhnya pada beberapa waktu tempuh diilustrasikan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Perbandingan *propagating wavelet* hasil estimasi Gabor Dekonvolusi dengan wavelet Q pada empat waktu tempuh berbeda (Cui dan Margrave, 2015).

Wavelet hasil estimasi Gabor Dekonvolusi secara konsisten muncul lebih awal dibandingkan wavelet Q sesungguhnya, dengan selisih waktu Δdrift yang semakin besar seiring bertambahnya waktu tempuh. Dalam kerangka Gabor Dekonvolusi, fenomena ini terjadi karena estimasi fase wavelet dilakukan melalui transformasi Hilbert terbatas pada pita frekuensi seismik, sehingga koreksi fase hanya berlaku terhadap frekuensi Nyquist seismik (Cui & Margrave, 2015). Selisih fase yang tersisa antara kedua referensi frekuensi tersebut disebut *residual phase error*, yang dalam domain waktu bermanifestasi sebagai *residual drift time* yang nilainya bervariasi terhadap kedalaman. Secara matematis, *residual drift time* dinyatakan sebagai:

$$\Delta drift(t) = \frac{t}{\pi Q} \ln \left(\frac{f_w}{f_{NYQ}} \right) \quad (2.7)$$

dimana $\Delta drift(t)$ adalah *residual drift time* (s), t adalah waktu tempuh dua arah (s), Q adalah faktor kualitas medium, f_w adalah frekuensi *well logging* (Hz), dan f_{NYQ} adalah frekuensi Nyquist seismik (Hz). Persamaan (2.7) menunjukkan bahwa untuk nilai Q konstan, *residual drift time* merupakan fungsi linear terhadap waktu tempuh t sehingga semakin dalam, semakin besar koreksi yang diperlukan.

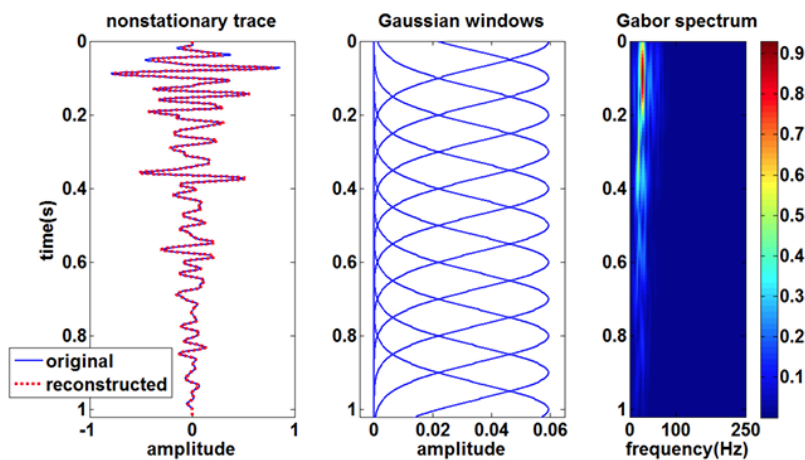
Pada zona dalam, *residual phase error* yang tidak terkoreksi dapat muncul sebagai pembalikan polaritas parsial atau pergeseran puncak wavelet terhadap reflektor yang seharusnya bersesuaian. Dalam proses *well-seismic tie*, kondisi ini menyebabkan ketidakselarasan residual yang tidak dapat diatasi hanya melalui penyelarasan waktu semata, karena sumbernya bukan dari kesalahan kurva waktu-kedalaman melainkan dari kesalahan fase wavelet yang bersifat *time-variant* (Cui & Margrave, 2015). Fenomena ini menjadi salah satu limitasi inheren dari pendekatan Gabor Dekonvolusi dan perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil *well-seismic tie*.

2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

Berikut beberapa penelitian terdahulu mengenai Dekonvolusi Gabor dan *Dynamic Time Warping* yang menjadi referensi dalam penelitian ini.

2.2.1 Cui dan Margrave., (2015) — "*Phase Correction of Gabor Deconvolution*"

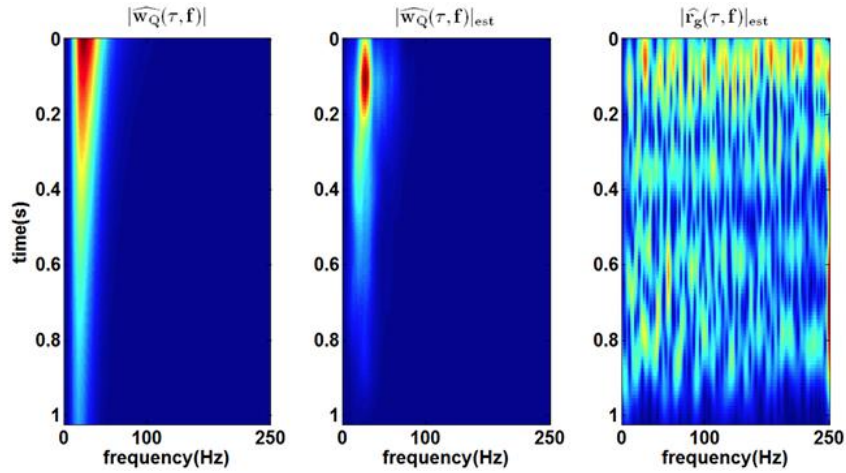
Cui dan Margrave (2015) mengkaji proses estimasi *wavelet* non-stasioner dan koreksi fase pada Gabor Dekonvolusi menggunakan *trace* seismik sintesis non-stasioner. Data sintesis dibangun dari model Q konstan dengan *wavelet* sumber *minimum-phase*, di mana efek atenuasi Q dimodelkan melalui *forward Q filter* sehingga *wavelet* yang merambat (*propagating wavelet*) berubah bentuk secara progresif seiring waktu tempuh frekuensi mengalami penurunan dan fase bergeser semakin besar seiring kedalaman. *Trace* non-stasioner yang dihasilkan selanjutnya menjadi masukan proses Gabor Dekonvolusi, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 *Forward Gabor transform* dari *trace* non-stasioner (Cui & Margrave, 2015).

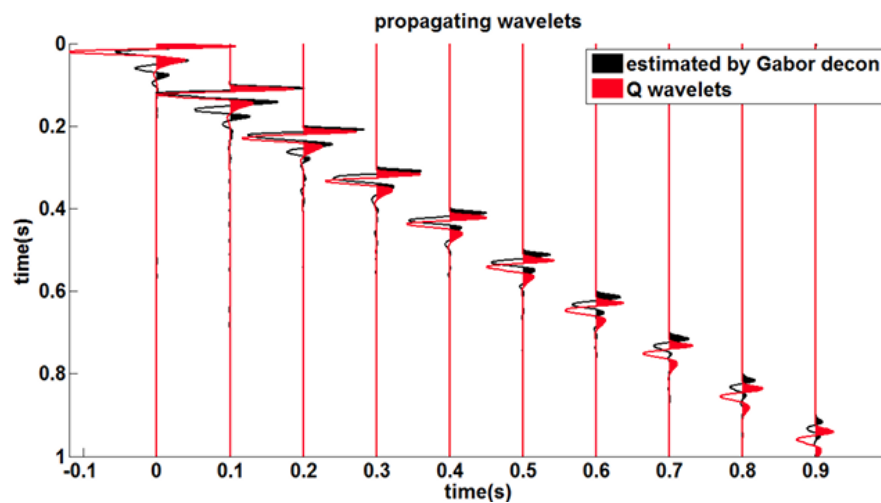
Spektrum Gabor dari *trace* non-stasioner menunjukkan kandungan energi terbesar pada waktu awal dan frekuensi rendah, sementara fluktuasi cepat pada spektrum mencerminkan

kontribusi reflektivitas. Gambar 2.9 menunjukkan bahwa *smoothing* spektrum Gabor berhasil mengestimasi spektrum amplitudo *propagating wavelet* dengan akurat, di mana spektrum estimasi mendekati spektrum wavelet Q sesungguhnya, sementara spektrum reflektivitas hasil dekonvolusi menunjukkan *whitening* yang kuat di seluruh rentang frekuensi. Hal ini mengkonfirmasi bahwa Gabor Dekonvolusi mampu mengkompensasi efek atenuasi Q pada amplitudo secara simultan tanpa memerlukan nilai Q secara eksplisit (Chen et al., 2013).



Gambar 2.9 Perbandingan spektrum Gabor *propagating wavelet* estimasi dan aktual (Cui & Margrave, 2015).

Namun demikian, ketika wavelet estimasi dibandingkan terhadap wavelet Q sesungguhnya dalam domain waktu, ditemukan perbedaan yang signifikan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.10. Wavelet estimasi secara konsisten muncul lebih awal dibandingkan wavelet Q sesungguhnya, dengan selisih Δ drift yang semakin besar seiring bertambahnya waktu tempuh. Fenomena ini terjadi karena estimasi fase wavelet melalui transformasi Hilbert hanya mengoreksi fase hingga frekuensi Nyquist seismik, sedangkan frekuensi *well logging* yang menjadi acuan reflektivitas sumur tidak terkompensasi.

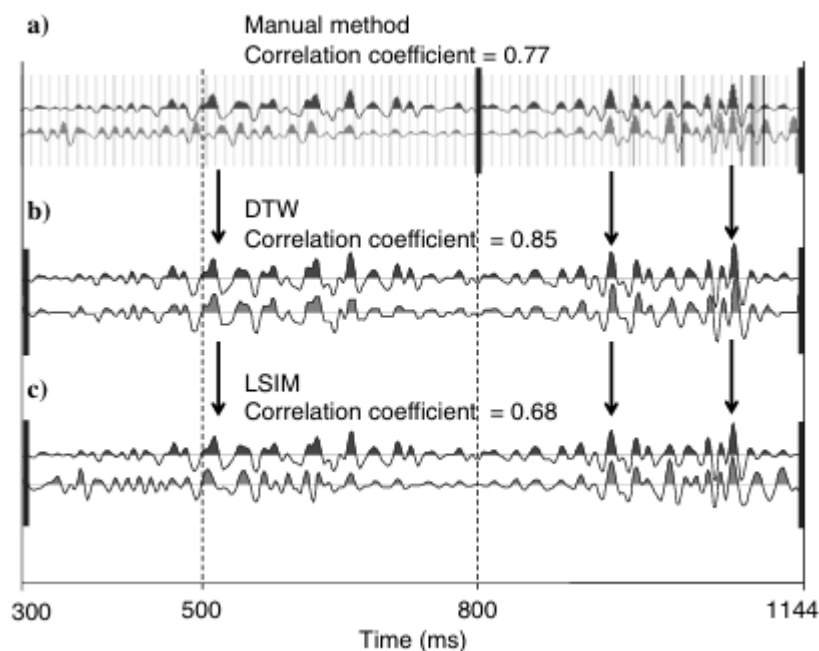


Gambar 2.10 Perbandingan *propagating wavelet* estimasi dan wavelet Q dalam domain waktu (Cui & Margrave, 2015)

Cui dan Margrave (2015) menguji dua pendekatan koreksi. Apabila nilai Q dan frekuensi *well logging* diketahui, koreksi dapat dilakukan secara analitik langsung di domain Gabor dengan hasil yang presisi. Tanpa informasi tersebut, *Smooth Dynamic Time Warping* (SDTW) digunakan untuk mengestimasi *residual drift time* secara empiris, dengan hasil yang lebih mulus dan akurat dibandingkan *time-variant cross-correlation* (TVCC). Keterbatasan penelitian ini adalah koreksi analitik memerlukan nilai Q yang diketahui secara eksplisit, sedangkan pada kondisi lapangan nilai Q umumnya tidak tersedia secara langsung.

2.2.2 Herrera et al., (2014) — "Automatic approaches for seismic to well tying"

Herrera et al., (2014) mengevaluasi dua metode otomatis untuk menggantikan langkah *stretch and squeeze* manual pada proses *well-seismic tie*, yaitu *Dynamic Time Warping* (DTW) dan *Local Similarity* (LSIM). Pengujian dilakukan menggunakan data seismik *poststack 3D time-migrated* dengan 13 sumur. DTW diterapkan menggunakan *constraint* Sakoe-Chiba dengan lebar jendela $w = 10$ sampel untuk membatasi pergeseran maksimum yang diizinkan. Sebagai kendali kualitas, perubahan kecepatan relatif (*relative velocity change*) dihitung dari turunan *warping path* untuk memverifikasi bahwa penyelarasan yang dihasilkan secara fisika masih dapat dibenarkan.



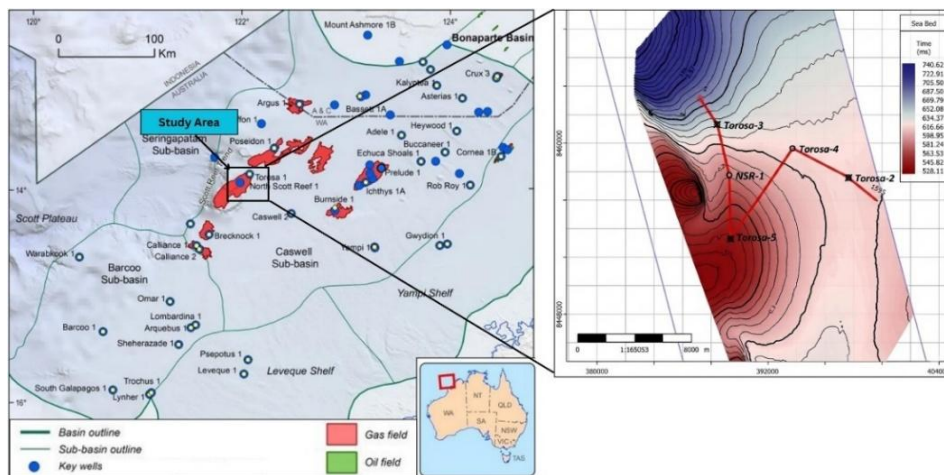
Gambar 2.11 Perbandingan metode *well-seismic tie*: (a) Hasil *well-seismic tie* manual, (b) hasil DTW dengan *warping window* (c) hasil LSIM pada seluruh panjang *trace* (Herrera et al., 2014).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa DTW menghasilkan koefisien korelasi sebesar 0,85 menunjukkan korelasi yang lebih tinggi dibandingkan metode manual dengan koefisien korelasi 0,77 maupun LSIM dengan koefisien korelasi 0,68 sehingga DTW terbukti lebih andal dalam menyelaraskan seismogram sintetik terhadap *trace* seismik. Meskipun demikian, DTW cenderung menghasilkan variasi kecepatan lokal yang lebih besar dibandingkan LSIM karena sifat penyelarannya yang *one-to-many* dari titik ke titik, sehingga penentuan lebar jendela *warping* yang tepat menjadi parameter kritis yang memerlukan kendali ketat untuk menghindari *stretching* dan *squeezing* yang tidak realistis.

BAB 3 METODOLOGI

3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Lapangan Torosa yang terletak pada *Scott Reef Trend* di bagian barat Sub-cekungan Barcoo, Cekungan Browse, lepas pantai barat laut Australia. Secara geografis, lapangan ini berada pada koordinat 388.000–404.000 mE dan 8.440.000–8.465.000 mN. Peta lokasi penelitian beserta posisi sumur dan lintasan *arbitrary line* seismik disajikan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Peta lokasi penelitian Lapangan Torosa beserta posisi sumur dan lintasan arbitrary line seismik.

Data yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari *National Offshore Petroleum Information Management System* (NOPIMS), sebuah portal data publik yang dikelola oleh *National Offshore Petroleum Titles Administrator* (NOPTA), Pemerintah Australia (*National Offshore Petroleum Titles Administrator*, n.d.). Seluruh data sumur dan seismik yang digunakan merupakan data yang telah tersedia untuk publik dan digunakan semata-mata untuk keperluan akademis dalam penelitian ini.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Perangkat Lunak

Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari dua komponen utama. Python digunakan sebagai platform komputasi untuk implementasi algoritma Dekonvolusi Gabor dan *Dynamic Time Warping*, dengan memanfaatkan *library* NumPy, SciPy, dan dtw-python untuk pengolahan sinyal dan penyelarasan deret waktu.

3.2.2 Data

3.2.2.1 Data Sumur

Data sumur yang digunakan mencakup lima sumur, yaitu North Scott Reef-1, Torosa-2, Torosa-3, Torosa-4, dan Torosa-5, dengan koordinat dan kelengkapan log sebagaimana tercantum pada Tabel 3.1. Setiap sumur memiliki kelengkapan data berupa log *gamma ray* (GR), *neutron porosity* (NPHI), densitas (RHOB), sonik (DT), resistivitas (LLD), dan data VSP (*Vertical Seismic Profile*). Data sumur secara keseluruhan terdiri dari empat jenis, yaitu data *composite*

log sebagai input utama perhitungan impedansi akustik dan koefisien refleksi, data VSP sebagai referensi hubungan waktu-kedalaman pada tiap kedalaman, data *trajectory* sebagai informasi geometri lintasan sumur, dan data marker formasi sebagai batas antar formasi yang digunakan sebagai titik jangkar dalam algoritma DTW.

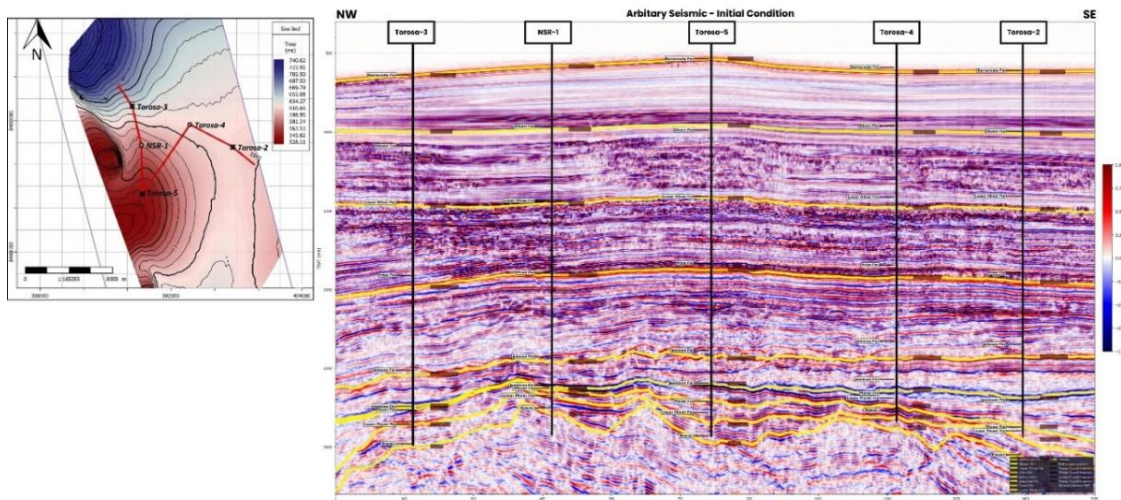
Tabel 3.1 *Well Data Availability.*

<i>Well Name</i>	<i>X (m)</i>	<i>Y (m)</i>	<i>KB (m)</i>	<i>GR</i>	<i>NPHI</i>	<i>RHOB</i>	<i>DT</i>	<i>LLD</i>	<i>VSP</i>
NSR -1	389279.51	8457749.02	8	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TOROSA-2	397655.2	8457559.9	22.92	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TOROSA-3	388421	8461309.6	29	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TOROSA-4	393707.92	8459634.89	28.3	✓	✓	✓	✓	✓	X
TOROSA-5	389381.91	8453273.01	26.4	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabel 3.1 menunjukkan bahwa seluruh sumur penelitian memiliki kelengkapan log yang memadai, yaitu GR, NPHI, RHOB, DT, dan LLD, sehingga seluruh sumur dapat digunakan dalam perhitungan impedansi akustik dan koefisien refleksi. Dari sisi data VSP, empat sumur yaitu NSR-1, Torosa-2, Torosa-3, dan Torosa-5 memiliki data VSP yang lengkap sehingga *checkshot correction* dapat dilakukan secara langsung menggunakan data pengukuran *first break* VSP sebagai referensi waktu-kedalaman. Sumur Torosa-4 merupakan satu-satunya sumur yang tidak memiliki data VSP, sehingga kurva waktu-kedalaman awal untuk sumur tersebut dibangun menggunakan pendekatan *pseudo-checkshot* melalui interpolasi dari sumur-sumur terdekat, yang berimplikasi pada tingkat ketidakpastian TDC awal yang lebih tinggi dibandingkan sumur lainnya.

3.2.2.2 Data Seismik

Data seismik yang digunakan adalah *arbitrary line* 2D yang diekstrak dari volume seismik *Final Post-Stack Time Migration* (PSTM) Torosa 3D MSS dalam domain waktu dua-arah (TWT) dengan *sampling rate* 4 ms. *Arbitrary line* ini ditarik melewati seluruh lokasi sumur penelitian dengan arah *Northwest–Southeast* sehingga seluruh sumur dapat dianalisis dalam satu penampang seismik, ditunjukkan pada Gambar 3.2.

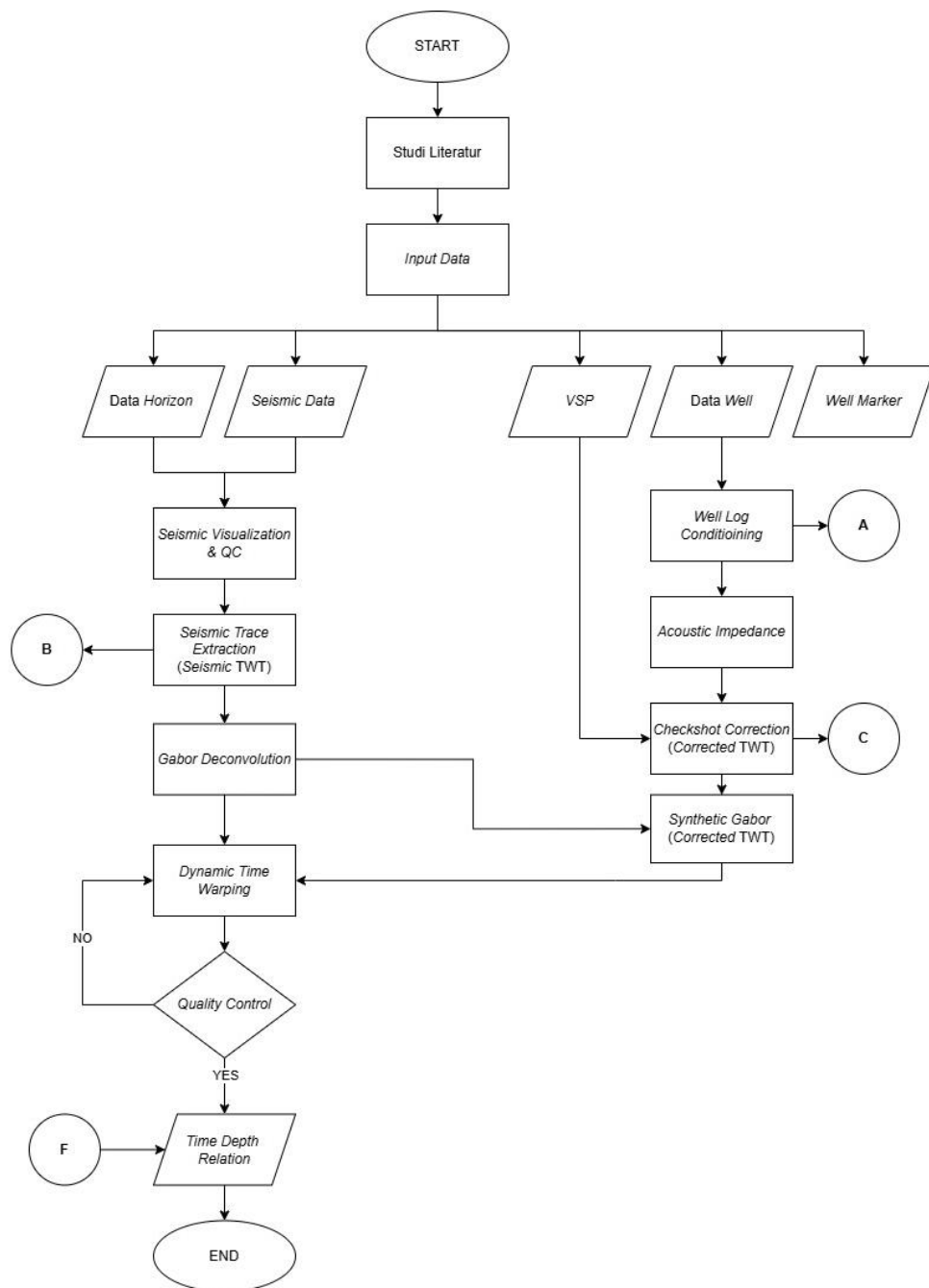


Gambar 3.2 *Arbitrary line* seismik sepanjang lintasan sumur.

Data seismik menggunakan polatiras *reverse polarity*, di mana kontras impedansi akustik positif ditampilkan sebagai *trough* dan kontras negatif ditampilkan sebagai *peak*. Data seismik ini juga mencakup informasi penampang horizon yang telah diinterpretasi sebelumnya oleh Woodside Energy Ltd (2015), yang digunakan sebagai referensi batas formasi dalam penelitian ini.

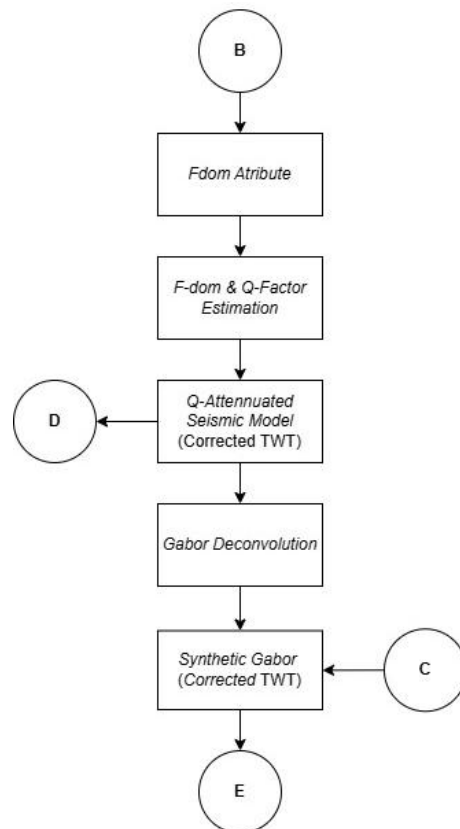
3.3 Diagram Alir

Penelitian ini terdiri dari tiga tahapan utama yang saling berkaitan, yaitu tahapan *Gabor Deconvolution Test*, tahapan *Dynamic Time Warping Test*, dan tahapan *Auto Well Tie* pada data lapangan. Alur keseluruhan penelitian disajikan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Diagram Alir Penelitian.

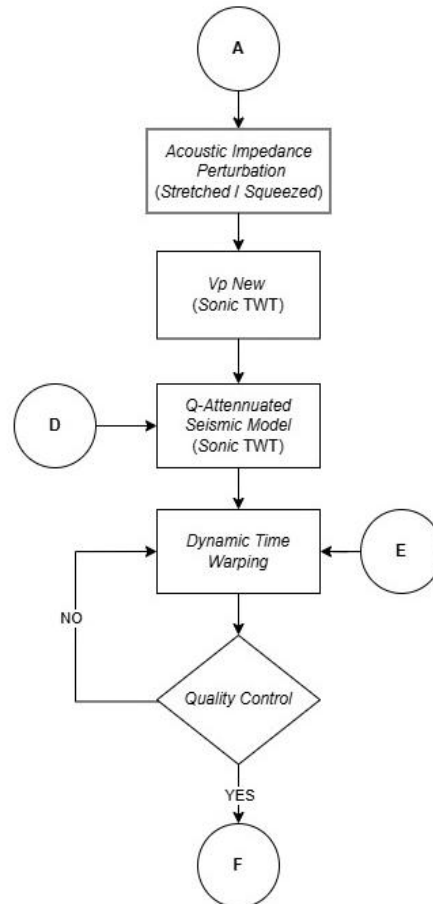
Gambar 3.3 merupakan diagram alir penelitian secara keseluruhan yang terdiri dari tiga jalur proses utama. Jalur pertama adalah jalur data seismik, dimulai dari input *Seismic Data* dan *Data Horizon*, dilanjutkan dengan *Seismic Visualization & QC*, kemudian *Seismic Trace Extraction* untuk menghasilkan trace seismik dalam domain TWT (konektor B). Jalur kedua adalah jalur data sumur, dimulai dari input *Data Well*, *VSP*, dan *Well Marker*, dilanjutkan dengan *Well Log Conditioning* (konektor A) untuk menghasilkan *Acoustic Impedance*, kemudian *Checkshot Correction* untuk menghasilkan kurva waktu-kedalaman terkoreksi (konektor C). Kedua jalur ini kemudian bergabung pada tahapan *Gabor Deconvolution*, di mana trace seismik (B) dan seismogram sintetik Gabor (C) digunakan sebagai input bersama. Output Dekonvolusi Gabor selanjutnya digunakan dalam proses *Dynamic Time Warping* bersama model seismik teratenuasi (konektor D). Hasil penyelarasan DTW dievaluasi pada tahapan *Quality Control*; apabila kriteria kualitas belum terpenuhi, proses DTW diulang, sedangkan apabila telah terpenuhi, *Time Depth Relation* yang diperbarui (konektor F) diekspor sebagai output akhir penelitian. Diagram alir pengujian Dekonvolusi Gabor pada data sintetis terkontrol disajikan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Diagram Alir *Gabor Deconvolution Test*.

Gambar 3.4 merupakan diagram alir pengujian Dekonvolusi Gabor pada data sintetis terkontrol. Proses dimulai dari konektor B yang menerima trace seismik dalam domain TWT. Tahap pertama adalah ekstraksi atribut *Fdom* (*dominant frequency*) dari trace seismik untuk memperoleh karakteristik spektral *time-variant*. Selanjutnya dilakukan estimasi *f-dom* dan faktor kualitas Q secara bersamaan (*F-dom & Q-Factor Estimation*) menggunakan model eksponensial sebagaimana dijelaskan pada Persamaan (3.3) dan (3.4). Hasil estimasi tersebut digunakan bersama konektor D untuk membangun *Q-Attenuated Seismic Model* dalam domain

TWT terkoreksi, yang merepresentasikan kondisi atenuasi Q yang diketahui secara terkontrol. Model ini kemudian menjadi input pada proses *Gabor Deconvolution*, yang menghasilkan estimasi *time-variant* wavelet dan seri reflektivitas secara simultan. Keluaran akhir tahapan ini adalah *Synthetic Gabor* dalam domain TWT terkoreksi (konektor C dan konektor E), yang kemudian digunakan sebagai input pada tahapan *Dynamic Time Warping Test*. Diagram alir pengujian *Dynamic Time Warping* disajikan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Diagram Alir Dynamic Time Warping Test.

Gambar 3.5 menunjukkan diagram alir pengujian DTW untuk mengevaluasi kemampuan algoritma dalam menyelaraskan seismogram sintetik terhadap trace seismik yang mengalami kondisi perenggangan (*stretch*) dan pemampatan (*squeeze*) secara terkontrol. Proses dimulai dari konektor A yang menerima log impedansi akustik sumur. Tahap pertama adalah *Acoustic Impedance Perturbation*, yaitu penerapan modifikasi kecepatan interval secara terkontrol untuk mensimulasikan enam skenario *stretch/squeeze* ($\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $\pm 30\%$) sehingga menghasilkan log Vp baru (*Vp New*) dalam domain TWT sonik. Log Vp yang telah diperturb ini digunakan bersama model seismik teratenuasi (konektor D) untuk membangun *Q-Attenuated Seismic Model* dalam domain TWT sonik, yang berfungsi sebagai trace seismik target dalam pengujian. Seismogram sintetik Gabor (konektor E) kemudian diselaraskan terhadap trace ini menggunakan algoritma DTW. Hasil penyelarasan dievaluasi pada tahapan *Quality Control* dimana apabila belum memenuhi kriteria, proses DTW diulang dengan parameter yang diperbarui, sedangkan apabila telah terpenuhi, koreksi kurva waktu-kedalaman diteruskan ke konektor F sebagai *output* pengujian.

3.4 Tahapan Penelitian

3.4.1 Studi Literatur

. Tahapan studi literatur dilakukan sebagai landasan teoritis sebelum implementasi metode. Pada tahapan ini dikaji literatur yang berkaitan dengan tiga topik utama, yaitu konsep dasar *well-seismic tie* dan pembuatan seismogram sintetik, teori dan implementasi Dekonvolusi Gabor untuk estimasi wavelet non-stasioner pada data seismik yang mengalami atenuasi Q, serta algoritma *Dynamic Time Warping* (DTW) dan penerapannya dalam konteks penyelarasan seismogram sintetik terhadap trace seismik. Referensi utama yang digunakan mencakup Margrave dan Lamoureux (2001) untuk kerangka Dekonvolusi Gabor, Chen et al. (2013) untuk implementasi dan validasi metode pada data sintetis dan data lapangan, serta Herrera et al. (2014) untuk pendekatan otomatisasi *well-seismic tie* berbasis DTW. Hasil studi literatur ini menjadi dasar dalam perancangan alur pengolahan dan penentuan parameter yang digunakan pada tahapan selanjutnya.

3.4.2 Gabor Deconvolution Test

Tahapan ini merupakan tahapan validasi metode menggunakan data sintetis terkontrol sebelum diimplementasikan pada data nyata Lapangan Torosa. Tujuannya adalah memverifikasi bahwa Dekonvolusi Gabor mampu memulihkan wavelet non-stasioner dan menyelaraskan seismogram sintetik secara akurat pada kondisi atenuasi Q yang diketahui.

3.4.2.1 Pembuatan *Q-Attenuated Seismic Model*

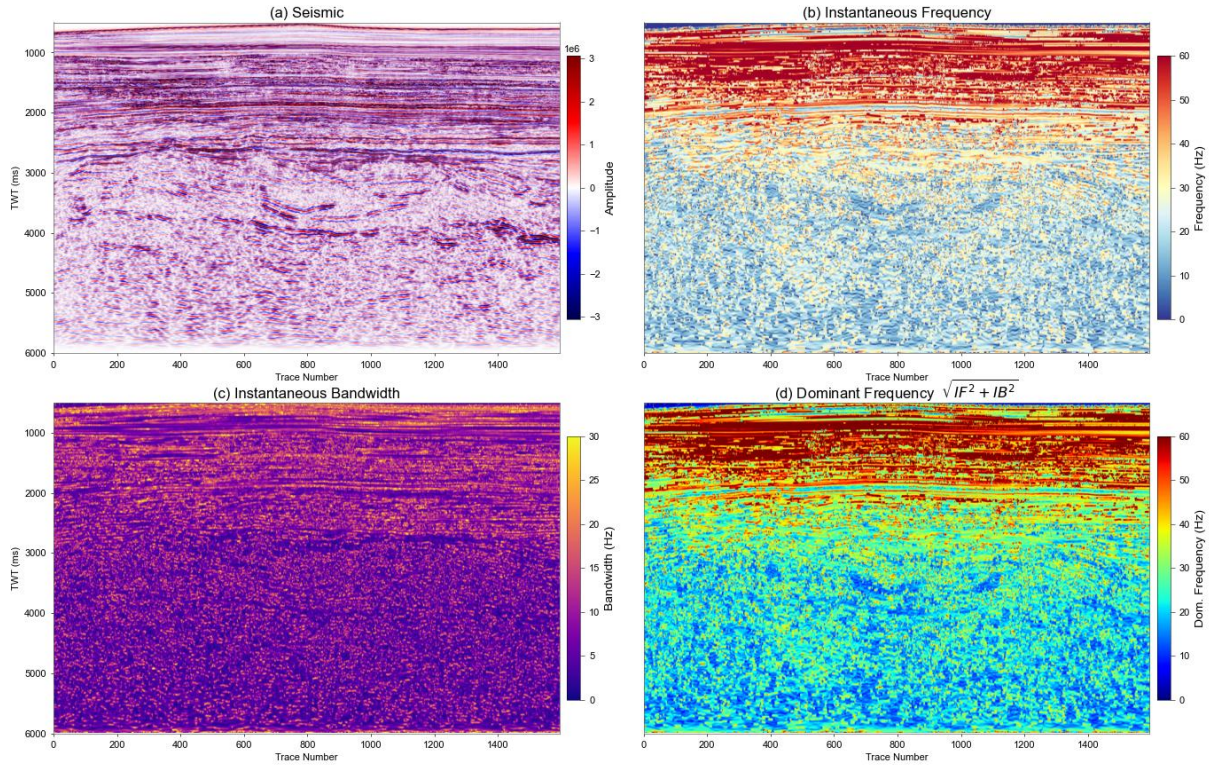
Pembuatan model seismik teratenuasi dimulai dari ekstraksi tren frekuensi dominan pada data seismik asli Lapangan Torosa. Ekstraksi dilakukan menggunakan atribut seismik *dominant frequency* yang dihitung dari kombinasi *instantaneous frequency* dan *instantaneous bandwidth* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.6. *Instantaneous frequency* didefinisikan sebagai turunan fasa terhadap waktu:

$$f_{inst}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Sedangkan, *dominant frequency* diperoleh dari:

$$f_{dom}(t) = \sqrt{f_{inst}^2(t) + b_{inst}^2(t)} \quad (3.2)$$

dimana $b_{inst}(t)$ adalah *instantaneous bandwidth*. Nilai $f_{dom}(t)$ kemudian dirata-ratakan secara lateral pada setiap sampel waktu untuk menghasilkan kurva tren frekuensi dominan terhadap TWT (Barnes, 1993). Pada Gambar 3.6 dapat dilihat bahwa *dominant frequency* menurun secara progresif seiring bertambahnya TWT, mencerminkan peluruhan kandungan frekuensi tinggi akibat atenuasi Q sepanjang kolom batuan.



Gambar 3.6 Ekstraksi atribut seismik: (a) data seismik, (b) *instantaneous frequency*, (c) *instantaneous bandwidth*, dan (d) *dominant frequency*.

Gambar 3.6 memperlihatkan hasil ekstraksi empat atribut seismik pada penampang *arbitrary line* Lapangan Torosa. Panel (a) menampilkan data seismik asli sebagai referensi, memperlihatkan variasi amplitudo lateral yang mencerminkan heterogenitas litologi di sepanjang lintasan sumur. Panel (b) menunjukkan distribusi *instantaneous frequency*, di mana nilai frekuensi cenderung menurun dari zona dangkal ke zona dalam seiring dengan efek absorpsi anelastik. Panel (c) memperlihatkan *instantaneous bandwidth* yang menggambarkan lebar spektral sinyal pada setiap sampel waktu, sedangkan panel (d) menampilkan atribut *dominant frequency* yang diperoleh melalui Persamaan (3.2) sebagai kombinasi kedua atribut sebelumnya. Tren penurunan *dominant frequency* yang tampak pada panel (d) menjadi dasar pemodelan eksponensial pada tahap estimasi Q berikutnya.

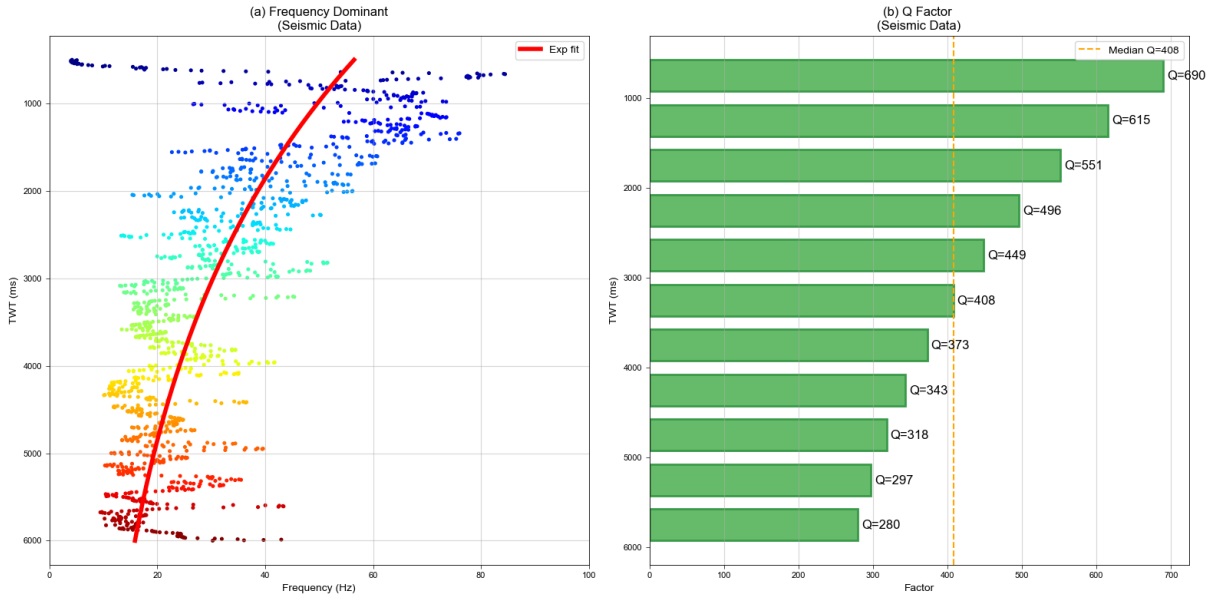
Kurva tren frekuensi dominan terhadap TWT yang diperoleh selanjutnya dimodelkan menggunakan model eksponensial. Model eksponensial dipilih karena sesuai dengan mekanisme absorpsi anelastik yang menyebabkan peluruhan frekuensi dominan secara bertahap seiring bertambahnya kedalaman (Kjartansson, 1979):

$$f_{dom}(t) = f_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (3.3)$$

dimana f_0 adalah frekuensi dominan pada waktu nol (Hz) dan α adalah koefisien peluruhan temporal (s^{-1}). Nilai faktor kualitas Q diestimasi per interval waktu menggunakan hubungan:

$$Q(t) = \frac{\pi f_{dom}(t)}{\alpha} \quad (3.4)$$

dimana $f_{dom}(t)$ adalah frekuensi dominan pada waktu t yang diperoleh dari Persamaan (3.3), dan α adalah koefisien peluruhan hasil *exponential fit*. Berbeda dengan formulasi spasial Kjartansson (1979) yang menggunakan koefisien atenuasi dalam satuan Np/m, α pada Persamaan (3.4) merupakan koefisien peluruhan dalam domain TWT sehingga estimasi Q dapat dihitung tanpa memerlukan informasi kecepatan interval. Hasil estimasi ini ditunjukkan pada Gambar 3.7.



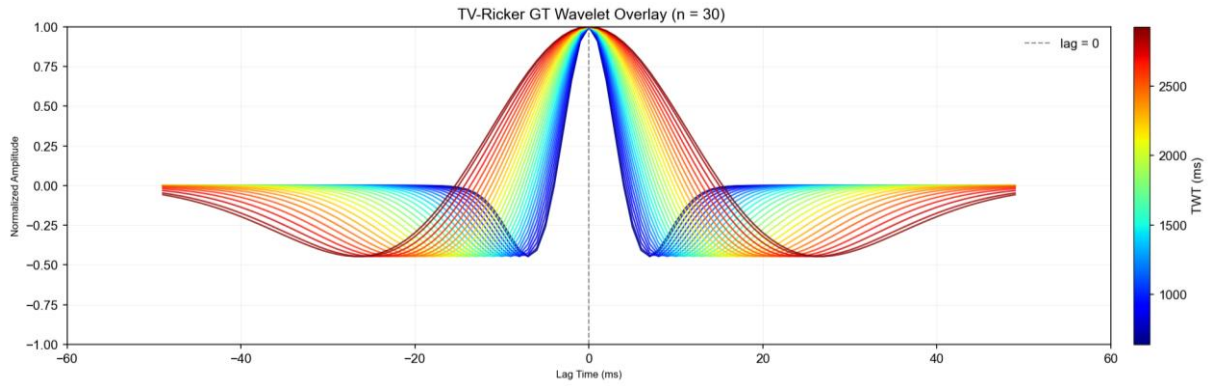
Gambar 3.7 Estimasi tren frekuensi dominan dan faktor kualitas Q: (a) kurva *exponential fit* frekuensi dominan terhadap TWT, dan (b) distribusi nilai Q per interval waktu.

Berdasarkan Gambar 3.8, frekuensi dominan wavelet menurun seiring bertambahnya TWT, konsisten dengan tren peluruhan eksponensial pada Persamaan (3.3). Seluruh wavelet TV-Ricker bersifat *zero-phase* dengan puncak tepat pada lag = 0 ms, sementara lebar puncak melebar secara bertahap ke arah zona dalam mencerminkan peluruhan kandungan frekuensi tinggi. Seismogram sintetis $S(t)$ yang dihasilkan kemudian menjadi input pada tahapan *forward Q filter* sebagaimana pada Persamaan (3.6).

Nilai $Q(t)$ yang diperoleh dari Persamaan (3.4) selanjutnya digunakan untuk membangun model seismik sintetis teratenuasi. Sebelum atenuasi diterapkan, terlebih dahulu dibangun seismogram sintetis stasioner $S(t)$ sebagai *ground truth* melalui konvolusi non-stasioner antara *time-variant* wavelet Ricker (TV-Ricker) yang frekuensi dominannya mengikuti kurva $f_{dom}(t)$ dari Persamaan (3.3) dengan koefisien refleksi $RC_{well}(\tau)$ yang diturunkan dari log impedansi akustik sumur menggunakan Persamaan (2.3):

$$S(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W_{Ricker}(\tau, t - \tau) \cdot RC_{well}(\tau) d\tau \quad (3.5)$$

dimana $S(t)$ adalah seismogram sintetis stasioner sebagai *ground truth*, $W_{Ricker}(\tau, t - \tau)$ adalah *time-variant* wavelet Ricker dengan frekuensi dominan $f_{dom}(\tau)$ pada waktu τ . Visualisasi *time-variant* Ricker wavelet yang digunakan disajikan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 *Time-variant* Ricker wavelet yang digunakan dalam pembuatan seismogram sintetis stasioner.

Gambar 3.8 menunjukkan bahwa frekuensi dominan wavelet menurun secara progresif seiring bertambahnya TWT, konsisten dengan tren peluruhan eksponensial pada Persamaan (3.3). Seismogram sintetis yang dihasilkan bersifat *zero-phase* karena wavelet Ricker merupakan wavelet simetris dengan energi terpusat pada $lag = 0$. Seismogram ini kemudian menjadi input pada tahapan *forward Q filter*, yang diimplementasikan dalam domain frekuensi sebagai:

$$s_{att}(t) = \mathcal{F}^{-1}\{S(f) \cdot e^{-\pi f t / Q(t)}\} \quad (3.6)$$

dimana $\mathcal{F}^{-1}\{\}$ adalah operator *inverse* Fourier Transform, $S(f)$ adalah spektrum Fourier dari seismogram stasioner $S(t)$ pada Persamaan (3.5), f adalah frekuensi (Hz), t adalah waktu tempuh TWT (s), dan $Q(t)$ adalah faktor kualitas *time-variant* dari Persamaan (3.4). Untuk setiap nilai t , operator $e^{-\pi f t / Q(t)}$ diterapkan secara independen pada spektrum $S(f)$ sehingga efek atenuasi Q dapat diterapkan secara terkontrol pada kondisi dengan *ground truth* yang diketahui.

3.4.2.2 Gabor Deconvolution

Dekonvolusi Gabor diterapkan pada seismik sintetis teratenuasi yang dihasilkan pada tahapan sebelumnya. Proses dimulai dengan penerapan Gabor Transform pada seismik teratenuasi $s(t)$ untuk menghasilkan representasi *time-frequency* domain:

$$S_g(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot g(t - \tau) \cdot e^{-2\pi i f t} dt \quad (3.7)$$

dimana $g(t - \tau)$ adalah jendela Gaussian yang berpusat pada waktu τ :

$$g(t - \tau) = \frac{1}{T\sqrt{\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2}{T^2}} \quad (3.8)$$

dengan T adalah lebar setengah jendela Gaussian. Nilai T tidak ditetapkan secara global, melainkan diestimasi secara otomatis pada setiap interval antar marker dari karakteristik

spektral lokal trace seismik melalui kombinasi *instantaneous frequency* $f_{inst}(\tau)$ dan *instantaneous bandwidth* $b_{inst}(\tau)$ (Barnes, 1993):

$$T(\tau) = \beta \cdot \frac{1}{f_{inst}(\tau)} + (1 - \beta) \cdot \frac{1}{b_{inst}(\tau)} \quad (3.9)$$

dimana $\beta \in [0,1]$ adalah parameter blending dengan nilai $\beta = 0.5$, $f_{inst}(\tau)$ adalah *instantaneous frequency* pada waktu τ , dan $b_{inst}(\tau)$ adalah *instantaneous bandwidth* pada waktu τ . Pendekatan ini menghasilkan nilai T yang bersifat *depth-variant* sehingga resolusi waktu-frekuensi menyesuaikan perubahan kandungan spektral sinyal dari zona dangkal ke zona dalam.

Estimasi spektrum amplitudo *propagating wavelet* $|\hat{W}_Q|_{est}$ dilakukan melalui dua pendekatan yang saling melengkapi. Pendekatan pertama adalah *regularized smoothing* terhadap $|S_g(\tau, f)|$, yang dirumuskan sebagai *least-squares problem*:

$$\mathbf{m} = (\mathbf{I} + \varepsilon^2 \mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{d} \quad (3.10)$$

dimana $\mathbf{d}$ adalah vektor spektrum *time-frequency* dari seismik, $\mathbf{D}$ adalah operator regularisasi diferensial, dan ε^2 adalah parameter *smoothing*. Pendekatan kedua adalah Wiener filter yang dirumuskan dalam domain Gabor:

$$\hat{W}_Q(\tau, f) = \frac{S_g(\tau, f) \cdot \overline{RC_g(\tau, f)}}{|RC_g(\tau, f)|^2 + \varepsilon(\tau)} \quad (3.11)$$

dimana $RC_g(\tau, f)$ adalah spektrum Gabor dari seri koefisien refleksi, $\overline{RC_g(\tau, f)}$ adalah konjugat kompleksnya, dan $\varepsilon(\tau)$ adalah parameter regularisasi yang dioptimalkan secara independen pada setiap zona *marker* melalui prosedur *grid search* (Bergstra et al., 2011), yaitu dengan mengevaluasi sejumlah kandidat nilai ε pada skala logaritmik dan memilih kandidat yang memaksimalkan koefisien korelasi antara seismogram sintetik hasil rekonstruksi dan trace seismik referensi pada zona tersebut.

Spektrum fase wavelet ditentukan melalui transformasi Hilbert dari logaritma natural spektrum amplitudo:

$$\phi(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ln(|\hat{W}_Q|_{est} + \mu |\hat{W}_Q|_{max})}{f - f'} df' \quad (3.12)$$

dimana μ adalah parameter stabilisasi untuk mencegah instabilitas numerik. Operator Dekonvolusi Gabor dibangun dengan menggabungkan koreksi amplitudo dan koreksi fasa (Chen et al., 2013):

$$D(\tau, f) = \frac{1}{|\hat{W}_Q|_{est} + \mu |\hat{W}_Q|_{max}} e^{-i\phi(\tau, f)} \quad (3.13)$$

Operator ini diaplikasikan pada spektrum Gabor seismik teratenuasi untuk menghasilkan estimasi spektrum reflektivitas:

$$R_g(\tau, f) = S_g(\tau, f) \cdot D(\tau, f). \quad (3.14)$$

Secara simultan, estimasi *time-variant* wavelet diperoleh sebagai kebalikan dari operator dekonvolusi:

$$W_Q(\tau, f) = \left(|\hat{W}_Q|_{est} + \mu |\hat{W}_Q|_{max} \right) e^{i\phi(\tau, f)} \quad (3.15)$$

Inverse Gabor Transform kemudian diterapkan pada $R_g(\tau, f)$ dan $W_Q(\tau, f)$ untuk memulihkan keduanya ke domain waktu (Margrave dan Lamoureux, 2001):

$$RC(t) = \int_{-\infty}^{\infty} R_g(\tau, f) \cdot e^{2\pi i f t} df \quad (3.16)$$

$$W(\tau, t - \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} W_Q(\tau, f) \cdot e^{2\pi i f (t - \tau)} df \quad (3.17)$$

Proses Dekonvolusi Gabor dengan demikian menghasilkan dua output, yaitu seri reflektivitas $RC(t)$ hasil dekonvolusi dari trace seismik pada persamaan (3.16), serta *time-variant wavelet* $W(\tau, t - \tau)$ yang merepresentasikan estimasi wavelet non-stasioner pada persamaan (3.17). Nilai parameter Dekonvolusi Gabor yang dihasilkan untuk data sintetis disajikan pada Lampiran 8.

3.4.2.3 Gabor Synthetic Trace Generation

Seismogram sintetis dihasilkan melalui konvolusi non-stasioner antara *time-variant* wavelet $W(\tau, t - \tau)$ hasil estimasi Dekonvolusi Gabor dari Persamaan (3.17) dengan seri koefisien refleksi $RC_{well}(t)$ yang diturunkan dari log impedansi akustik sumur menggunakan Persamaan (2.3):

$$S_{syn}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W(\tau, t - \tau) \cdot RC_{well}(t) d\tau \quad (3.18)$$

Pendekatan non-stasioner ini memastikan bahwa efek atenuasi Q yang menyebabkan perubahan bentuk wavelet seiring kedalaman dapat diakomodasi secara akurat dalam seismogram sintetis yang dihasilkan.

3.4.3 Dynamic Time Warping Test

Tahapan ini merupakan pengujian kemampuan algoritma *Dynamic Time Warping* (DTW) dalam menyelaraskan seismogram sintetis terhadap trace seismik pada kondisi *stretch* dan *squeeze* yang diketahui secara terkontrol. Pengujian dilakukan pada enam skenario perturbasi kecepatan interval, yaitu *stretch* dan *squeeze* masing-masing sebesar $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, dan $\pm 30\%$, menggunakan dua pendekatan *constraint* DTW secara paralel yaitu *Fixed Band* (Sakoe-Chiba) dan *Marker-Anchored*.

3.4.3.1 Pembuatan Data Sintetis *Stretch* / *Squeeze*

Pembuatan data sintetis *stretch/squeeze* dilakukan dengan memodifikasi kecepatan interval V_p pada log impedansi akustik sumur, sehingga waktu tempuh sonik bergeser dari kondisi referensi dengan besaran yang diketahui secara terkontrol. Perturbasi diterapkan pada log impedansi akustik $AI_{clean} = V_p \cdot \rho$ menggunakan faktor modifikasi global:

$$AI_{perturbed} = AI_{clean} \cdot f_{global}(z) \cdot (1 + \eta(z)) \quad (3.19)$$

dimana $f_{global}(z)$ adalah faktor modifikasi deterministik yang bersifat *depth-variant* dan $\eta(z)$ adalah komponen *noise* kecil bersifat *zero-mean* untuk menambahkan variasi tekstur realistis. Faktor modifikasi deterministik didefinisikan sebagai:

$$f_{global}(z) = \begin{cases} 1 - B_u - B_d \cdot \bar{z}^p & (stretch) \\ 1 + B_u + B_d \cdot \bar{z}^p & (squeeze) \end{cases} \quad (3.20)$$

dimana B_u adalah komponen *uniform bias* yang berlaku di seluruh kedalaman, B_d adalah komponen yang tumbuh seiring kedalaman (*depth-growing*), $\bar{z} = (z - z_{min}) / (z_{max} - z_{min}) \in [0,1]$ adalah kedalaman ternormalisasi, dan p adalah eksponen tren kedalaman ($p = 1$ untuk tren linear). Pada penelitian ini digunakan nilai $B_u = 0.10, 0.20$, dan 0.30 untuk skenario $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, dan $\pm 30\%$, dengan $B_d = 0$ sehingga perturbasi bersifat seragam di seluruh kedalaman.

Kecepatan interval baru $V_{p,new}$ diperoleh dari $AI_{perturbed}$ dengan mempertahankan log densitas ρ tetap:

$$V_{p,new}(z) = \frac{AI_{perturbed}(z)}{\rho(z)} \quad (3.21)$$

TWT sonik dihitung melalui integrasi kecepatan interval terhadap kedalaman:

$$TWT_{clean}(z) = 2 \sum_i \frac{\Delta z_i}{V_{p,clean,i}}, \quad TWT_{new}(z) = 2 \sum_i \frac{\Delta z_i}{V_{p,new,i}} \quad (3.22)$$

Pergeseran TWT yang dihasilkan didefinisikan sebagai:

$$\Delta TWT(z) = TWT_{new}(z) - TWT_{clean}(z) \quad (3.23)$$

dimana Δz_i adalah interval kedalaman sampling (m) dan $V_{p,i}$ adalah kecepatan interval pada sampel ke- i (m/s). Pada kondisi *stretch* ($V_{p,new} < V_{p,clean}$), gelombang merambat lebih lambat sehingga $TWT_{new} > TWT_{clean}$ dan $\Delta TWT > 0$ menghasilkan seismogram sintetik tampak lebih panjang dibandingkan referensi. Sebaliknya pada kondisi *squeeze* ($V_{p,new} > V_{p,clean}$), $\Delta TWT < 0$ dan seismogram sintetik tampak lebih pendek. Besaran ΔTWT inilah yang menjadi *ground truth* pergeseran waktu yang harus dipulihkan oleh algoritma DTW, sehingga akurasi pemulihan dapat dievaluasi secara kuantitatif. Seismogram sintetis teratenuasi digunakan sebagai *trace* target dalam pengujian DTW.

3.4.3.2 Dynamic Time Warping

Diasumsikan bahwa $S = s_1, s_2, \dots, s_n$ adalah deret waktu trace seismik dan $T = t_1, t_2, \dots, t_m$ adalah deret waktu seismogram sintetik. Jalur *warping* $W = w_1, w_2, \dots, w_k$ adalah urutan titik-titik penyelarasan di mana setiap elemen w_k merepresentasikan pasangan koordinat $(i, j)_k$ yang menghubungkan indeks sampel s_i dari trace seismik dengan indeks sampel t_j dari seismogram sintetik. Tujuan algoritma ini adalah menemukan jalur W yang meminimalkan total biaya kumulatif (Berndt & Clifford, 1994; Herrera et al., 2014):

$$DTW(S, T) = \min_W \left[\sum_{k=1}^P \delta(w_k) \right] \quad (3.24)$$

dimana $\delta(s_i, t_j)$ adalah biaya lokal (*local cost*) pada titik (i, j) yang didefinisikan sebagai kuadrat selisih amplitudo antara kedua deret waktu:

$$\delta(i, j) = (s_i - t_j)^2 \quad (3.25)$$

Untuk menyelesaikan masalah minimisasi ini secara efisien, digunakan pendekatan pemrograman dinamis. Biaya kumulatif $\gamma(i, j)$ untuk mencapai setiap titik dalam matriks dihitung secara rekursif:

$$\gamma(i, j) = \delta(s_i, t_j) + \min[\gamma(i-1, j), \gamma(i-1, j-1), \gamma(i, j-1)] \quad (3.26)$$

dimana i adalah indeks sampel *trace* seismik, j adalah indeks sampel seismogram sintetis, s_i adalah amplitudo *trace* seismik pada sampel ke- i , dan t_j adalah amplitudo seismogram sintetis pada sampel ke- j . Tiga argumen dalam operator *min* merepresentasikan tiga arah pergerakan yang diperbolehkan vertikal $(i-1, j)$, diagonal $(i-1, j-1)$, dan horizontal $(i, j-1)$. Pergerakan vertikal merepresentasikan operasi *squeeze*, pergerakan horizontal merepresentasikan operasi *stretch*, sedangkan pergerakan diagonal merepresentasikan penyelarasan satu-satu tanpa deformasi waktu. Ketiga arah ini secara bersama-sama memastikan terpenuhinya syarat monotonisitas dan kontinuitas jalur penyelarasan sehingga urutan waktu tetap terjaga dan tidak ada sampel yang terlewat.

Sebelum penerapan *constraint*, parameter bandwidth penyelarasan σ_{auto} ditentukan secara otomatis dari frekuensi dominan *trace* seismik:

$$\sigma_{auto} = \frac{1000}{2 \cdot f_{dom} \cdot \pi} \quad (3.27)$$

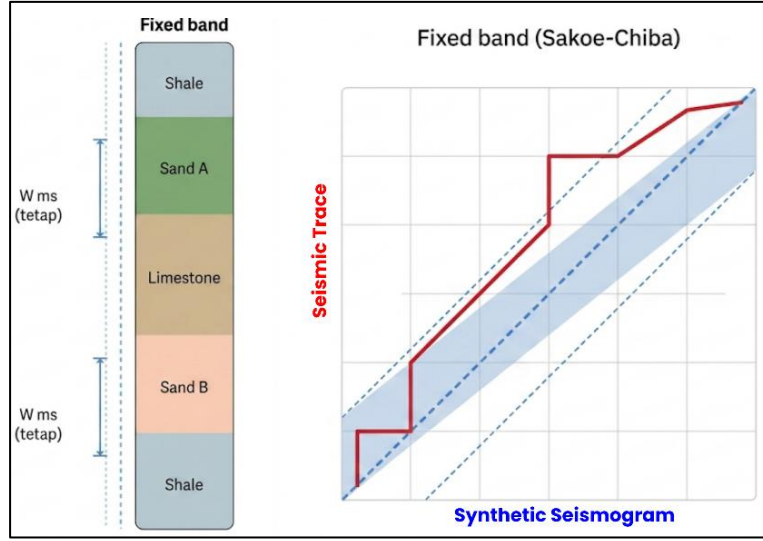
dimana f_{dom} adalah median *instantaneous frequency* sepanjang *trace* dalam satuan Hz, dan σ_{auto} dinyatakan dalam ms. Nilai ini merepresentasikan setengah periode gelombang dominan dan digunakan sebagai batas atas pergeseran waktu yang realistis secara geologis. Dalam penelitian ini diterapkan dua pendekatan *constraint* pada algoritma DTW sebagai berikut.

3.4.3.3 Fixed Band Constraint (Sakoe–Chiba)

Constraint ini adalah *global constraint* Sakoe–Chiba (Herrera et al., 2014; Sakoe, 1978) yang membatasi jalur penyelarasan agar tidak menyimpang lebih dari w sampel dari diagonal utama matriks biaya di seluruh panjang *trace* :

$$|i - j| \leq w \quad (3.28)$$

Ilustrasi penerapan *fixed band constraint* Sakoe–Chiba pada proses penyelarasan seismogram sintetis terhadap *trace* seismik disajikan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Ilustrasi *Fixed Band Constraint* (Sakoe-Chiba).

Dalam ilustrasi *fixed band constraint* jalur penyelarasan dibatasi dalam pita diagonal dengan lebar w yang konstan di seluruh panjang trace, sehingga pergeseran waktu maksimum yang diizinkan terkontrol secara eksplisit di setiap segmen.

Nilai r tidak ditetapkan secara manual melainkan dioptimalkan melalui prosedur *iterative refinement*. Pada setiap iterasi k , parameter w dan koefisien korelasi dievaluasi dengan kriteria konvergensi:

$$|CC_k - CC_{k-1}| < \delta_{CC} \quad \text{dan} \quad |w_k - w_{k-1}| < \delta_w \quad (3.29)$$

dimana CC_k adalah koefisien korelasi antara seismogram sintetis yang telah diselaraskan dan trace seismik pada iterasi ke- k , w_k adalah nilai bandwidth pada iterasi ke- k , serta δ_{CC} dan δ_w adalah ambang batas konvergensi. Apabila kriteria (3.23) belum terpenuhi, nilai w diperbarui per segmen marker dan proses diulang hingga maksimum 8 iterasi. Nilai parameter Fixed Band Constraint untuk data sintetis dan data lapangan disajikan pada Lampiran 9."

3.4.3.4 Marker-Anchored Constraint

Constraint ini memanfaatkan posisi marker formasi sebagai titik jangkar yang memaksa jalur penyelarasan melewati titik-titik yang diketahui secara geologi. Untuk segmen antara marker ke- k dan ke- $k + 1$, DTW diselesaikan sebagai sub-masalah tersendiri dengan kondisi batas (Wang et al., 2017) :

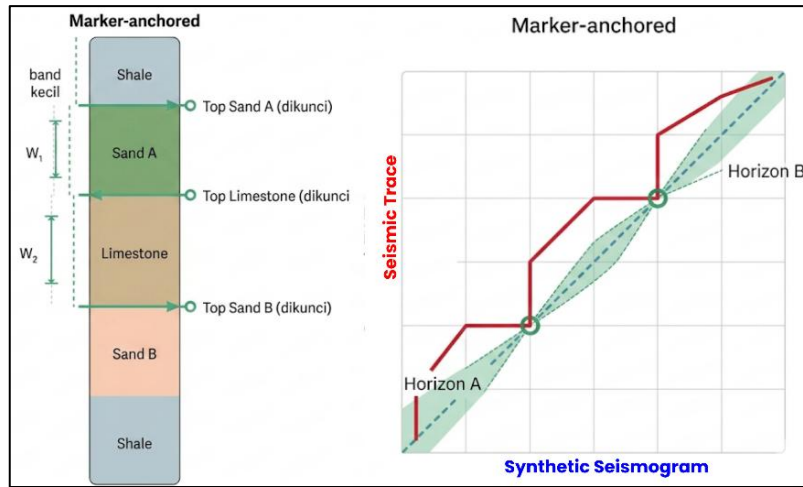
$$\gamma(i_k, j_k) = 0 \quad \text{dan} \quad \gamma(i_{k+1}, j_{k+1}) = 0 \quad (3.30)$$

dimana (i_k, j_k) dan (i_{k+1}, j_{k+1}) adalah posisi titik jangkar pada matriks biaya. Koreksi waktu di antara dua titik jangkar dinyatakan sebagai fungsi *piecewise-linear* yang menjamin kontinuitas pergeseran waktu di sepanjang trace:

$$\Delta t(z) = \Delta t_k + \frac{z - z_k}{z_{k+1} - z_k} \cdot (\Delta t_{k+1} - \Delta t_k), \quad z_k \leq z < z_{k+1} \quad (3.31)$$

dimana Δt_k dan Δt_{k+1} adalah pergeseran waktu pada marker ke- k dan ke- $k + 1$, dan z adalah posisi kedalaman interpolasi. Representasi ini secara matematis menjamin bahwa *tops error*

pada setiap *marker* bernilai nol ($E_{top,k} = 0$ ms). Ilustrasi penerapan *marker-anchored constraint* pada proses penyelarasan disajikan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Ilustrasi *Marker-Anchored Constraint*.

Dalam ilustrasi *marker-anchored constraint* jalur penyelarasan dipaksa melewati posisi *marker* formasi yang telah diketahui sebagai titik jangkar, sehingga lebar pita penyelarasan di setiap segmen antar marker dapat bervariasi menyesuaikan karakteristik lokal data.

Warping path optimal yang dihasilkan dari kedua pendekatan kemudian dikonversi menjadi koreksi kurva waktu-kedalaman dengan memetakan pergeseran indeks sampel $\Delta(i, j) = j - i$ ke pergeseran waktu Δt sesuai interval sampling seismik, sehingga TDC yang diperbarui diperoleh sebagai:

$$TDC_{updated}(z) = TDC_{initial}(z) + \Delta t_{DTW}(z) \quad (3.32)$$

dimana $\Delta t_{DTW}(z)$ adalah koreksi waktu yang diturunkan dari *warping path* pada kedalaman z . Nilai parameter *Marker-Anchored Constraint* untuk keenam skenario sintetis disajikan pada Lampiran 9.

3.4.4 *Auto Well Tie* pada Data Lapangan

Tahapan ini merupakan implementasi penuh *kerangka kerja well-seismic tie* otomatis pada data nyata Lapangan Torosa, menggunakan kerangka Dekonvolusi Gabor dan DTW yang telah divalidasi pada tahapan 3.4.2 dan 3.4.3 dengan data sintetis terkontrol. Nilai parameter *Marker-Anchored Constraint* untuk data sintetis dan data lapangan disajikan pada Lampiran 9 dan Lampiran 11.

3.4.4.1 *Conditioning Data Sumur*

Tahapan ini merupakan *quality control* data log sumur sebelum digunakan dalam perhitungan impedansi akustik dan koefisien refleksi. Data log sumur pada kondisi lapangan umumnya mengalami efek *badhole* akibat *washout* atau *caving* pada saat pengeboran, yang ditandai oleh nilai log *caliper* yang melebihi diameter bit (Rider, 2002). Parameter yang paling rentan terhadap efek ini adalah log sonik (DT) dan log densitas (RHOB). Prediksi nilai log pada interval *badhole* dilakukan menggunakan dua pendekatan empiris. Kecepatan gelombang P diprediksi menggunakan persamaan Faust (Faust, 1953):

$$V_p = a \times (Z \times R_t)^{\frac{1}{6}} \quad (3.33)$$

dimana V_p adalah kecepatan gelombang P (m/s), a adalah konstanta regresi, Z adalah kedalaman (m), dan R_t adalah resistivitas (ohm-m). Densitas diprediksi menggunakan persamaan Gardner (Gardner et al., 1974):

$$\rho = a \times V_p^b \quad (3.34)$$

dimana ρ adalah densitas (g/cc) dan a , b adalah konstanta yang diperoleh dari hubungan regresi *power* antara log densitas dan log sonik pada interval yang tidak mengalami *badhole*.

3.4.4.2 Pseudo Checkshot

Sumur Torosa-4 tidak memiliki data VSP sehingga kurva waktu-kedalaman awal tidak dapat dibangun dari pengukuran *first break* secara langsung. Sebagai alternatif, *pseudo checkshot* dibangun melalui integrasi log sonik yang dikalibrasi menggunakan nilai *One-Way Time* (OWT) referensi dari tiga sumur tetangga yang memiliki data VSP, yaitu Torosa-2, Torosa-3, dan Torosa-5.

Proses dimulai dengan konversi log sonik DTC ($\mu\text{s}/\text{ft}$) menjadi kecepatan interval V_p (m/s):

$$V_p = \frac{10^6}{DTC} \times 0,3048 \quad (3.35)$$

Log V_p yang diperoleh kemudian diproses melalui *despiking* berbasis *rolling median z-score* dan *smoothing* Gaussian untuk menghilangkan artefak pengukuran sebelum digunakan dalam integrasi. OWT pada titik teratas log Torosa-4 (TVD_{top}) diestimasi sebagai rata-rata OWT dari ketiga sumur tetangga pada kedalaman yang sama:

$$OWT_{anchor} = \frac{1}{3} \sum_{w \in \{T2, T3, T5\}} OWT_w(TVD_{top}) \quad (3.36)$$

dimana $OWT_w(TVD_{top})$ adalah OWT sumur tetangga w yang diperoleh melalui interpolasi linear dari data VSP. OWT pada setiap sampel kedalaman dihitung secara kumulatif:

$$OWT(z_i) = OWT_{anchor} + \sum_{k=1}^i \frac{\Delta z_k}{\bar{V}_{p,k}} \quad (3.37)$$

dimana Δz_k adalah interval kedalaman sampling (m) dan $\bar{V}_{p,k} = \frac{1}{2}(V_{p,k-1} + V_{p,k})$ adalah kecepatan interval rata-rata pada segmen ke- k . TWT terkoreksi diperoleh sebagai:

$$TWT(z) = 2 \times OWT(z) \quad (3.38)$$

Kualitas *pseudo checkshot* yang dihasilkan dikontrol melalui perbandingan kecepatan interval per formasi antara Torosa-4 dan ketiga sumur tetangga, untuk memverifikasi bahwa tren kecepatan yang dihasilkan konsisten secara geologis.

3.4.4.3 Checkshot Correction

Tahapan ini merupakan kalibrasi log sonik terhadap data *checkshot* atau VSP untuk menghasilkan kurva waktu-kedalaman (*Time-Depth Curve*, TDC) yang akurat. Waktu tempuh satu arah (*One-Way Time*, OWT) dari permukaan datum ke kedalaman z diperoleh melalui integrasi log sonik (White & Simm, 2003):

$$T_{sonic}(z) = \sum_{i=0}^N (\Delta t_i \times \Delta z_i) \quad (3.39)$$

dimana Δt_i adalah nilai *sonic slowness* pada sampel ke- i ($\mu s/ft$) dan Δz_i adalah interval kedalaman sampling (m). Selisih antara waktu integrasi sonik dan waktu *checkshot* pada titik kedalaman yang sama didefinisikan sebagai *drift*:

$$T_{drift}(z_{cs}) = T_{checkshot}(z_{cs}) - T_{sonic}(z_{cs}) \quad (3.40)$$

Distribusi nilai *drift* di antara dua titik *checkshot* diinterpolasi menggunakan interpolasi polinomial Lagrange (Herrera et al., 2014) sehingga koreksi dapat diterapkan pada seluruh interval log sonik:

$$T_{corrected}(z) = T_{sonic}(z) + \Delta t_{drift}(z) \quad (3.41)$$

$$\Delta t_{drift}(z) = \sum_{k \in \{A, B, C, \dots\}} \Delta t_k \cdot L_k(z) \quad (3.42)$$

dimana, Δt_k adalah nilai *drift checkshot* di titik tertentu dan $L_k(z)$ merupakan basis polinomial Lagrange, contohnya untuk titik A :

$$L_A(z) = \frac{(z-z_B)(z-z_C)}{(z_A-z_B)(z_A-z_C)} \quad (3.43)$$

Selanjutnya, nilai $T_{corrected}$ dikonversi ke *Two-Way Time* (TWT) sebagai berikut:

$$TWT_{corrected}(z) = 2 \times T_{corrected}(z) \quad (3.44)$$

Setelah diperoleh kurva waktu terkoreksi $TWT_{corrected}(z)$, dilakukan diferensiasi kurva terhadap kedalaman untuk menghitung kembali nilai log sonik yang sudah terkalibrasi:

$$\Delta t_{calibrated}(z) = \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{dz} (TWT_{corrected}(z)) \quad (3.45)$$

3.4.4.4 Seismic Trace Extraction

Trace seismik diekstrak dari *arbitrary line* 2D pada posisi koordinat masing-masing sumur. sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.1. Untuk sumur yang posisinya tidak tepat berada pada *bin* seismik, dilakukan interpolasi dari *bin* terdekat menggunakan rata-rata berbobot jarak (Yilmaz, 2001). *Trace* yang diekstrak kemudian dipotong pada jendela waktu yang mencakup seluruh interval dari Formasi Barracouta hingga batuan dasar *Triassic*, sesuai dengan rentang marker yang digunakan sebagai titik jangkar DTW.

3.4.4.5 Gabor Deconvolution

Dekonvolusi Gabor diterapkan pada trace seismik yang telah diekstrak menggunakan kerangka yang telah ditentukan pada tahapan validasi sintetis (3.4.2.2). Proses mengikuti alur yang sama, meliputi Gabor Transform, estimasi σ otomatis per zona, *regularized smoothing*, estimasi operator Wiener adaptif, dan *inverse Gabor Transform*. Perbedaan dengan tahapan sintetis adalah bahwa pada data lapangan nilai Q tidak diketahui secara eksplisit, sehingga estimasi *propagating wavelet* sepenuhnya bergantung pada proses *smoothing* spektrum Gabor secara data-driven. Nilai basis parameter regularisasi ε pada Persamaan (3.11) ditentukan melalui optimasi Bayesian dengan algoritma *Tree-structured Parzen Estimator* (Akiba et al., 2019) yang diimplementasikan menggunakan *framework Optuna* (Akiba et al., 2019), memaksimalkan koefisien korelasi pasca-DTW bersama empat parameter Dekonvolusi Gabor lainnya (σ dangkal, σ dalam, jumlah zona, dan jumlah sampel frekuensi). Output tahapan ini adalah wavelet non-stasioner $W(\tau, t)$ yang merepresentasikan kombinasi wavelet sumber dan efek atenuasi Q pada setiap segmen waktu di sepanjang trace sumur. Nilai parameter Dekonvolusi Gabor yang dihasilkan untuk kelima sumur Lapangan Torosa disajikan pada Lampiran 10.

3.4.4.6 Gabor Synthetic Trace Generation

Seismogram sintetis dihasilkan melalui konvolusi non-stasioner antara wavelet hasil Dekonvolusi Gabor dengan seri koefisien refleksi yang diturunkan dari log impedansi akustik sumur yang telah dikondisikan dan dikonversi ke domain waktu menggunakan TDC hasil *checkshot correction*, mengikuti Persamaan (3.18). Pendekatan non-stasioner ini menghasilkan seismogram sintetis yang lebih representatif dibandingkan konvolusi stasioner konvensional, karena perubahan kandungan frekuensi wavelet akibat atenuasi Q dapat diakomodasi secara lokal pada setiap segmen waktu.

3.4.4.7 Dynamic Time Warping

DTW diterapkan untuk menyelaraskan seismogram sintetis terhadap trace seismik menggunakan dua pendekatan *constraint* yang telah dijelaskan pada sub-bab 3.4.3.3 dan 3.4.3.4, yaitu *Fixed Band* dan *Marker-Anchored*. Pada data lapangan, parameter bandwidth penyelarasan σ_{auto} dihitung dari median *instantaneous frequency* trace seismik nyata menggunakan Persamaan (3.27), sehingga batas pergeseran waktu yang diterapkan menyesuaikan karakteristik frekuensi data secara otomatis. *Warping path* optimal yang dihasilkan kemudian dikonversi menjadi koreksi kurva waktu-kedalaman menggunakan Persamaan (3.32), sehingga diperoleh $TDC_{updated}(z)$ yang mencerminkan koreksi temporal hasil penyelarasan DTW pada seluruh kedalaman sumur. Nilai parameter Fixed Band dan Marker-Anchored Constraint untuk kelima sumur Lapangan Torosa disajikan pada Lampiran 11.

3.4.4.8 Well Tie Quality Control

Kualitas hasil *well-seismic tie* dievaluasi secara kuantitatif menggunakan tiga metrik utama. Metrik pertama adalah *correlation coefficient* (CC) antara seismogram sintetis yang telah diselaraskan dan *trace* seismik pada jendela waktu yang mencakup seluruh interval seismik:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s}) (t_i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}} \quad (3.46)$$

dimana s_i adalah amplitudo *trace* seismik pada sampel ke- i , t_i adalah amplitudo seismogram sintetis pada sampel ke- i , $\bar{s}$ dan $\bar{t}$ adalah nilai rata-rata masing-masing deret, dan N adalah jumlah sampel dalam jendela evaluasi. Selain CC secara global, evaluasi CC juga dilakukan per segmen antar marker untuk mengidentifikasi interval dengan kualitas penyelarasan yang rendah.

Metrik kedua adalah *tops error* per marker, yang mengukur akurasi posisi formasi setelah penyelarasan DTW:

$$E_{tops,k} = |TWT_{seis,k} - TWT_{syn,k}| \quad (3.47)$$

dimana $TWT_{seis,k}$ adalah posisi waktu marker ke- k pada *trace* seismik dan $TWT_{syn,k}$ adalah posisi waktu marker ke- k pada seismogram sintetis setelah penyelarasan. Nilai $E_{tops,k}$ yang dapat diterima adalah kurang dari 5 ms untuk setiap marker (Herrera dan van der Baan, 2014).

Metrik ketiga adalah *root mean square error* (RMSE) tren frekuensi dominan, yang mengevaluasi akurasi estimasi *wavelet* Gabor dalam merepresentasikan karakteristik atenuasi Q sepanjang kolom sumur:

$$RMSE_{f_{dom}} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (f_{est,j} - f_{gt,j})^2} \quad (3.48)$$

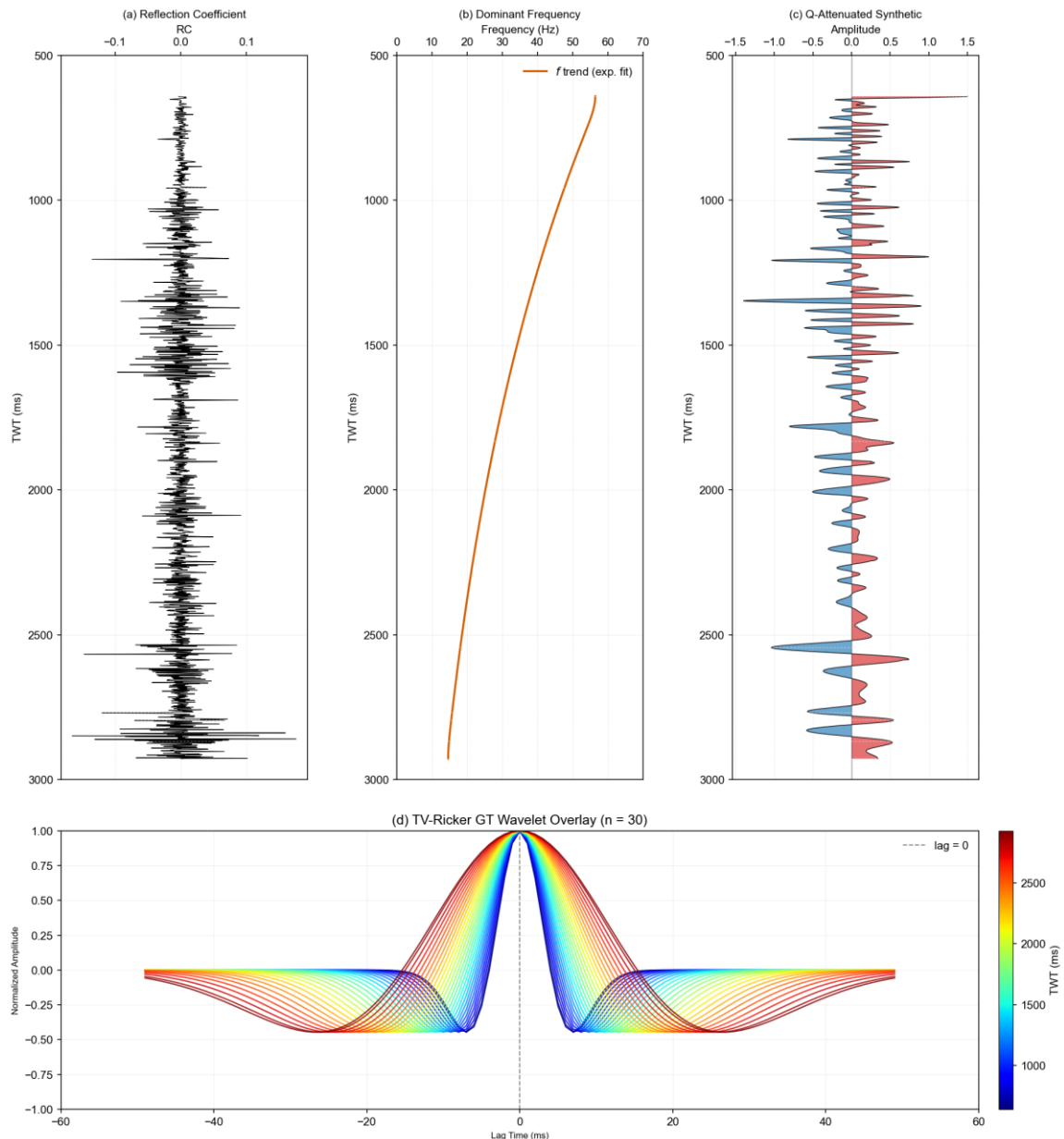
dimana $f_{est,j}$ adalah frekuensi dominan yang diestimasi dari *wavelet* Gabor pada segmen ke- j , $f_{gt,j}$ adalah frekuensi dominan referensi pada segmen yang sama, dan M adalah jumlah segmen evaluasi. Hasil *well-seismic tie* juga dikontrol secara geologis dengan memverifikasi bahwa koreksi waktu yang dihasilkan tidak menghasilkan variasi kecepatan interval yang tidak realistis secara fisika batuan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Gabor Deconvolution Test

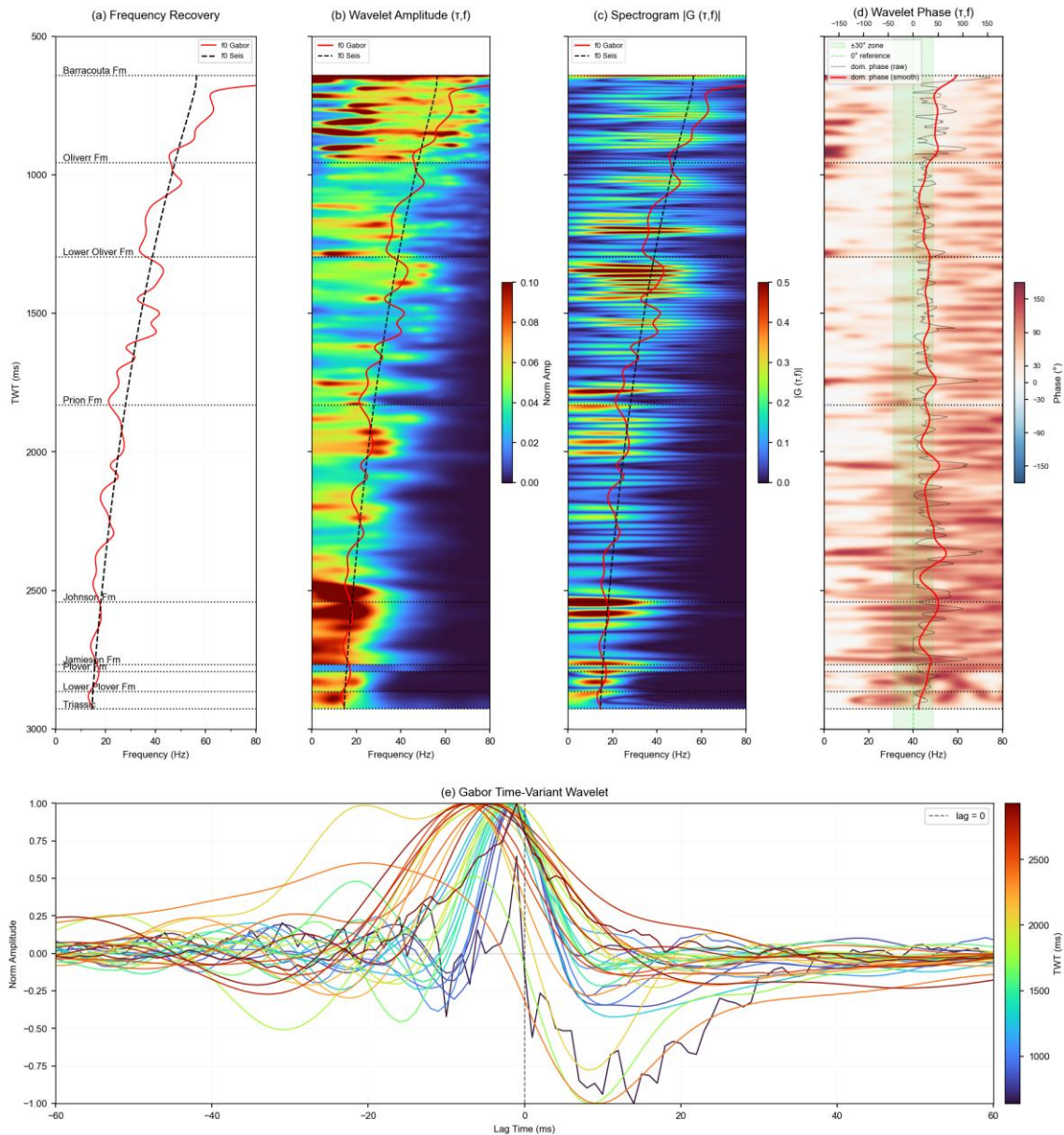
Dekonvolusi Gabor diterapkan pada data sintesis Q -attenuated yang dibangun menggunakan wavelet TV-Ricker dengan tren frekuensi dominan Lapangan Torosa sebagaimana pada Persamaan (3.3). Model seismik Q -attenuated dan wavelet TV-Ricker yang menjadi masukan pengujian disajikan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Model seismik Q -attenuated: (a) Koefisien Refleksi, (b) Frekuensi Dominan, (c) Seismik Q -attenuated, dan (d) Time-Variant Ricker Wavelet.

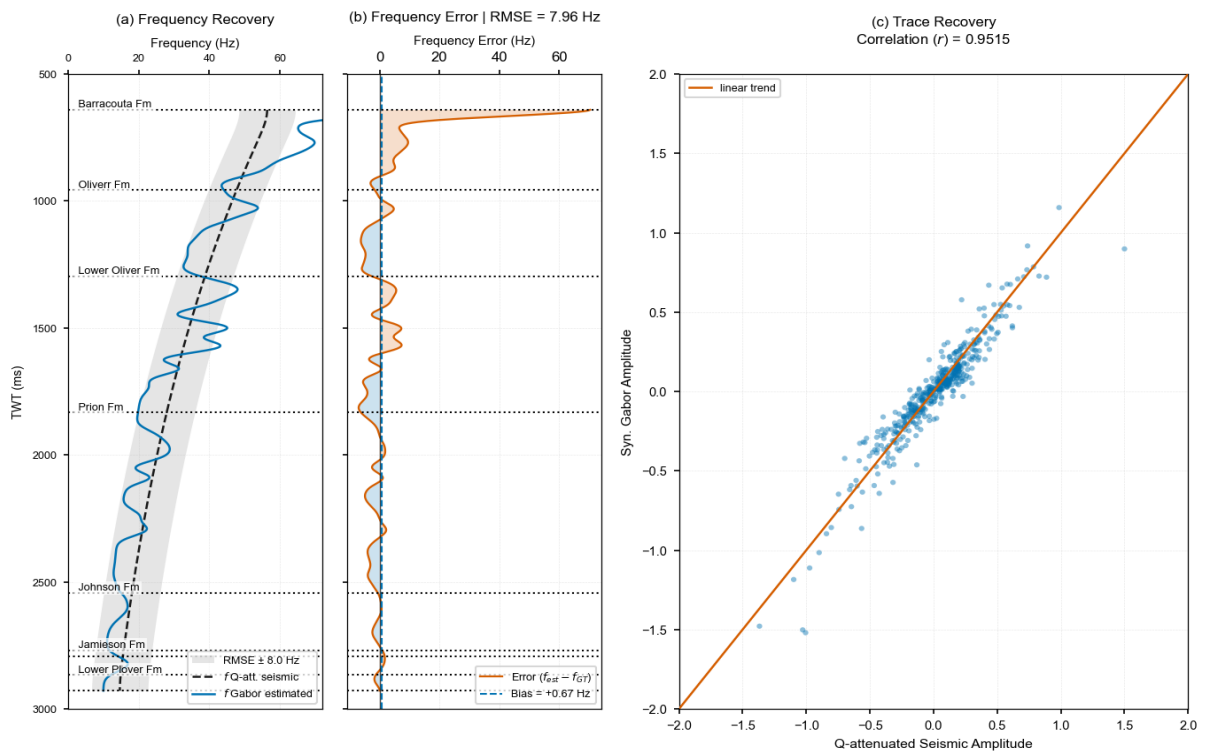
Model seismik Q -attenuated pada Gambar 4.1 dibangun menggunakan wavelet *Time-Variant Ricker* (TV-Ricker) yang frekuensi dominannya menurun secara eksponensial

mengikuti tren frekuensi dominan data seismik Lapangan Torosa sebagaimana pada Persamaan (3.3), dari 56 Hz pada zona dangkal hingga 15 Hz pada zona dalam. Pada panel (a), seluruh wavelet TV-Ricker bersifat *zero-phase* dengan puncak tepat pada lag = 0 ms, sementara lebar puncak melebar secara progresif seiring pertambahan TWT, mencerminkan peluruhan kandungan frekuensi tinggi akibat atenuasi Q yang dimodelkan. Wavelet ini selanjutnya dikonvolusikan dengan koefisien refleksi (RC), kemudian diterapkan efek atenuasi Q kumulatif per blok menggunakan *forward Q filter* pada Persamaan (3.6) dengan rasio sinyal terhadap *noise* (SNR) sebesar 20,0 dB. Panel (b) menunjukkan *trace* seismik sintesis *Q-attenuated* yang dihasilkan dari proses tersebut, yang selanjutnya menjadi masukan Dekonvolusi Gabor. Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor disajikan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor pada data seismik *Q-attenuated*: (a) *Frequency Recovery*, (b) *Wavelet Amplitude* (τ, f), (c) *Spectrogram* $|G(\tau, f)|$, (d) *Wavelet Phase* (τ, f), dan (e) *Gabor Time-Variant Wavelet*.

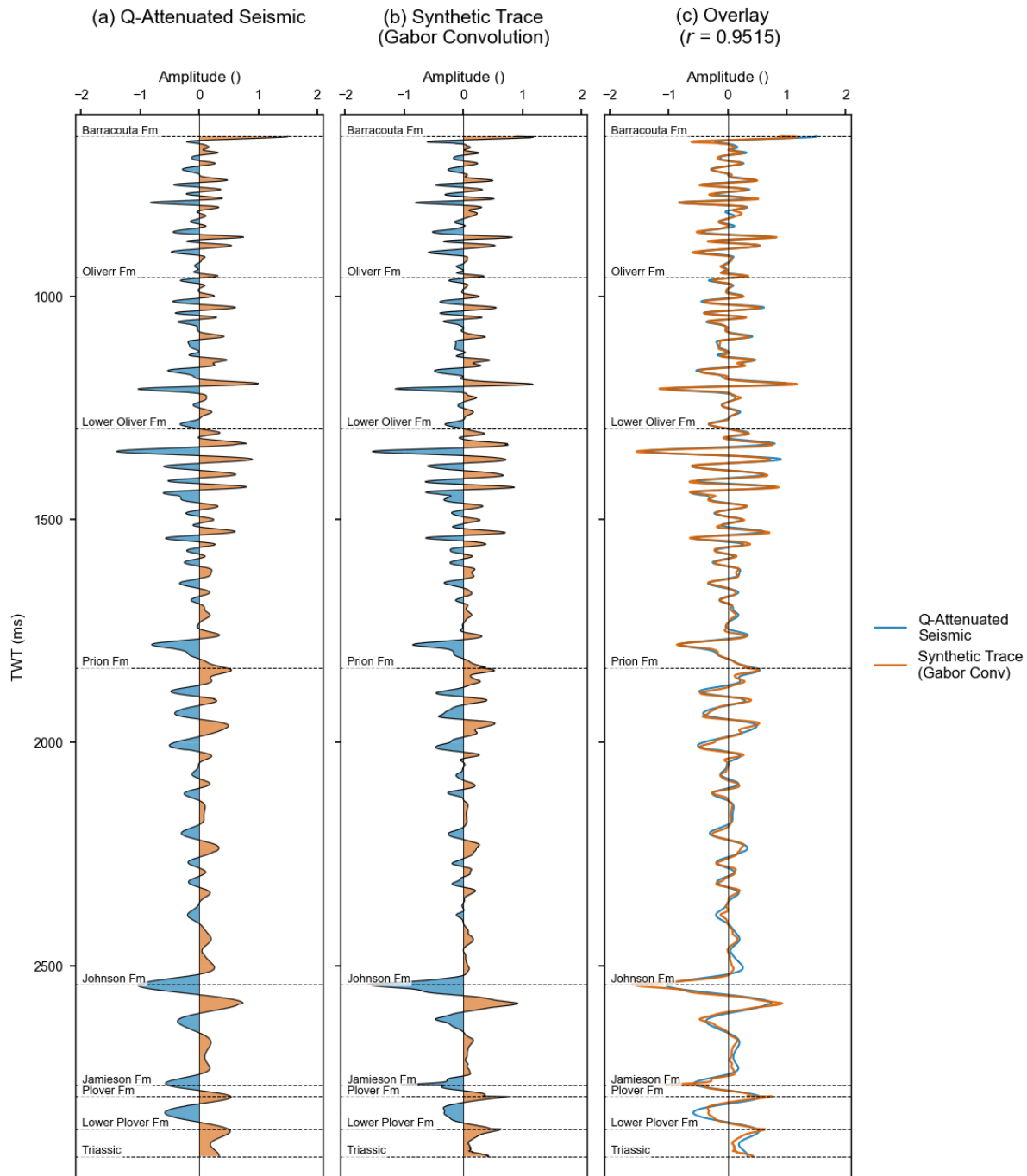
Berdasarkan Gambar 4.2, estimasi wavelet *time-variant* hasil Dekonvolusi Gabor pada data seismik *Q-attenuated* menunjukkan karakteristik yang konsisten dengan model atenuasi Q yang diterapkan. Panel (a) menunjukkan kurva frekuensi dominan terestimasi yang mengikuti tren penurunan frekuensi *instantaneous* seismik *Q-attenuated* dari zona dangkal hingga zona dalam, mengkonfirmasi bahwa parameter lebar jendela Gaussian $T(\tau)$ yang diestimasi secara otomatis per interval marker pada Persamaan (3.9) berhasil menyesuaikan resolusi *time-frequency* sesuai karakteristik spektral lokal. Panel (b) dan (c) memperlihatkan konsentrasi energi spektral yang bergeser ke frekuensi lebih rendah seiring bertambahnya TWT, konsisten dengan efek atenuasi Q yang dimodelkan. Panel (d) menunjukkan *residual phase shift* yang meningkat secara progresif ke zona dalam, yang berakar pada instabilitas transformasi Hilbert akibat penekanan amplitudo spektral pada frekuensi tinggi oleh atenuasi Q kumulatif sebagaimana pada Persamaan (3.12), sesuai dengan teori dispersi fasa akibat atenuasi Aki & Richards (2002), dan Cui dan Margrave (2015). Panel (e) menunjukkan kumpulan wavelet terestimasi dalam domain waktu yang lebar puncaknya melebar seiring pertambahan TWT, dengan bentuk yang semakin kompleks dan asimetris pada zona dalam, mencerminkan akumulasi *residual phase shift* yang tidak terkoreksi pada interval tersebut. Evaluasi kuantitatif hasil rekonstruksi Dekonvolusi Gabor disajikan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Evaluasi hasil Dekonvolusi Gabor: (a) *Frequency Recovery*, (b) *Frequency Error*, dan (c) *Trace Recovery Correlation*.

Berdasarkan Gambar 4.3, Dekonvolusi Gabor berhasil memulihkan *trace* seismik dengan koefisien korelasi global sebesar $r = 0,951$ dan RMSE frekuensi sebesar 7,96 Hz dengan *bias* sebesar +0,67 Hz. Nilai korelasi yang mendekati satu tersebut menunjukkan bahwa 95,15% variasi amplitudo *trace* seismik *Q-attenuated* berhasil direpresentasikan kembali oleh hasil Dekonvolusi Gabor. Nilai *bias* positif sebesar +0,67 Hz mencerminkan kecenderungan estimasi frekuensi yang sedikit lebih tinggi dari nilai sebenarnya, yang dapat dikaitkan dengan

keterbatasan kompensasi Q pada zona dalam di mana amplifikasi Wiener filter dibatasi oleh nilai epsilon minimum per zona. Pada panel (a), kurva frekuensi dominan hasil estimasi Gabor mengikuti tren frekuensi *Q*-attenuated dengan baik pada seluruh rentang TWT, meskipun terdapat deviasi lokal yang lebih besar pada interval Barracouta Fm hingga Oliverr Fm di zona dangkal. Panel (b) memperlihatkan distribusi *frequency error* yang relatif simetris di sekitar nilai *bias* +0,67 Hz dengan rentang RMSE $\pm 8,0$ Hz, mengindikasikan bahwa kesalahan estimasi frekuensi tidak bersifat sistematis pada satu arah tertentu melainkan tersebar di seluruh rentang TWT. Perbandingan *trace* seismik hasil rekonstruksi disajikan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Perbandingan trace seismik: (a) Seismik *Q*-attenuated, (b) *trace* sintetis hasil konvolusi Gabor (*Gabor Convolution*), dan (c) *overlay*.

ebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.4, seismogram sintetis yang dibentuk melalui konvolusi non-stasioner antara wavelet Gabor terestimasi dengan koefisien refleksi data sumur menggunakan Persamaan (3.18) menunjukkan kesesuaian pola amplitudo yang baik terhadap *trace* seismik *Q-attenuated* pada rentang TWT 500--3000 ms dengan koefisien korelasi sebesar $r = 0,9515$. Pada panel (c), kedua *trace* memperlihatkan keselarasan yang konsisten mulai dari Formasi Barracouta hingga Formasi Triassic. Perbedaan amplitudo yang teramati pada zona Johnson Fm ke bawah (sekitar TWT 2500 ms) mengindikasikan adanya *residual* atenuasi *Q* yang tidak sepenuhnya terkompensasi pada zona dalam, sejalan dengan nilai *bias* frekuensi sebesar +0,67 Hz yang diperoleh pada tahap evaluasi. Ringkasan metrik evaluasi Dekonvolusi Gabor pada data sintetis disajikan pada Tabel 4.1.

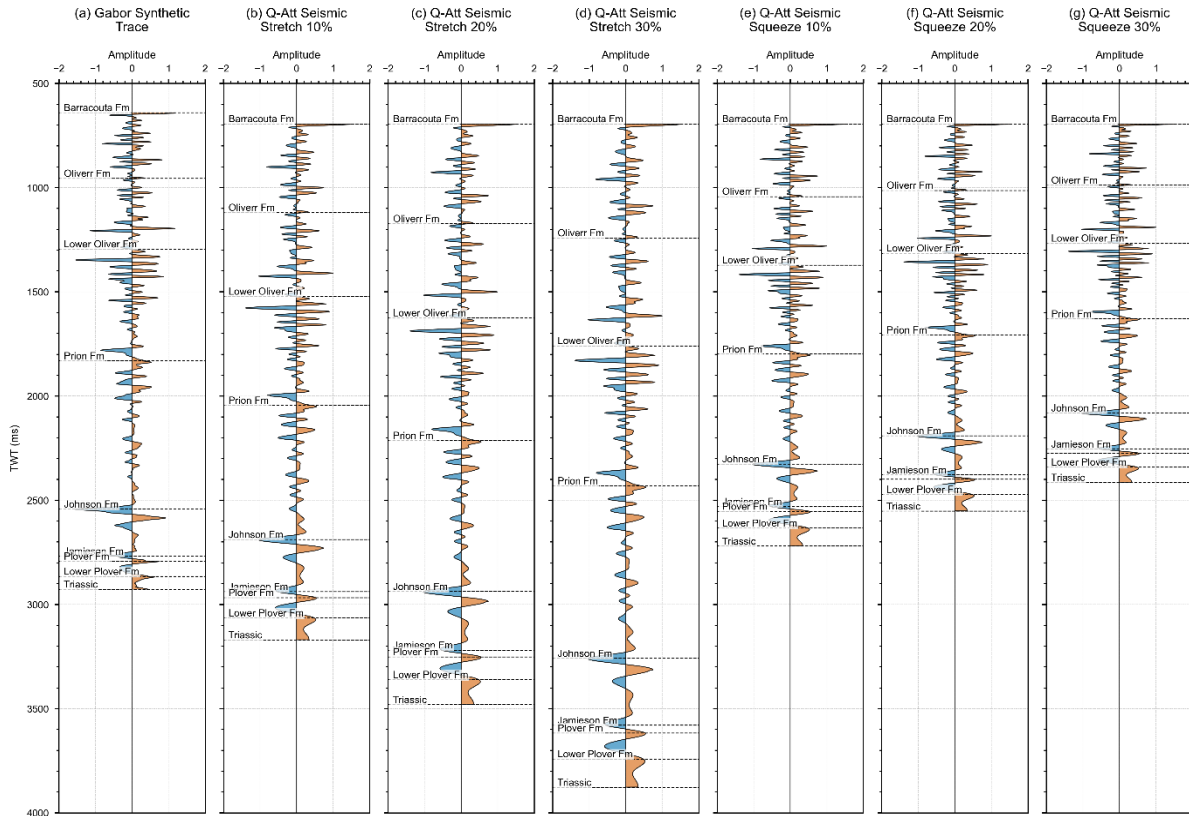
Tabel 4.1 Ringkasan metrik evaluasi Dekonvolusi Gabor pada data sintetis *Q-attenuated*.

Metrik Evaluasi	Nilai
Koefisien korelasi global (r)	0,951
RMSE frekuensi (Hz)	7,96
<i>Bias</i> frekuensi (Hz)	+0,67
Rentang TWT (ms)	500-3000

Berdasarkan Tabel 4.1, Dekonvolusi Gabor pada data sintetis menghasilkan koefisien korelasi global yang tinggi ($r = 0,951$) dengan RMSE frekuensi sebesar 7,96 Hz. Nilai *bias* positif sebesar +0,67 Hz mengindikasikan estimasi frekuensi yang sedikit lebih tinggi dari nilai referensi, yang konsisten dengan keterbatasan kompensasi *Q* pada zona dalam akibat pembatasan nilai epsilon minimum pada Wiener filter. Secara keseluruhan, Dekonvolusi Gabor berhasil *me-recover* komponen frekuensi dan amplitudo wavelet secara akurat, meskipun estimasi komponen fasa pada zona dalam menunjukkan *residual phase shift* yang tidak sepenuhnya terkoreksi akibat degradasi SNR kumulatif sebagaimana dijelaskan pada Persamaan (3.12). Seismogram sintetis hasil Dekonvolusi Gabor ini selanjutnya digunakan sebagai masukan pada tahapan *auto well tie* menggunakan DTW.

4.2 Dynamic Time Warping Test

Dynamic Time Warping (DTW) diterapkan pada data seismik *Q-attenuated* yang mengalami perubahan posisi waktu secara terkontrol, yaitu peregangan waktu (*stretch*) dan pemampatan waktu (*squeeze*) dengan besaran 10%, 20%, dan 30%. Kondisi awal keenam skenario sebelum penerapan DTW disajikan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Kondisi awal seismik *Q-attenuated* sebelum DTW: (a) *Gabor Synthetic Trace*, (b) *Q-Att Seismic Stretch 10%*, (c) *Q-Att Seismic Stretch 20%*, (d) *Q-Att Seismic Stretch 30%*, (e) *Q-Att Seismic Squeeze 10%*, (f) *Q-Att Seismic Squeeze 20%*, dan (g) *Q-Att Seismic Squeeze 30%*.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.5, keenam skenario pengujian menunjukkan kondisi awal yang bervariasi. Panel (b) menunjukkan kondisi *stretched* 10% dengan *mean shift* sebesar +176,8 ms dan korelasi awal $r = 0,142$. Pada tahap ini pergeseran masih relatif kecil sehingga pola refleksi kedua *trace* masih dapat dibedakan secara visual. Panel (c) menunjukkan kondisi *stretched* 20% dengan pergeseran yang meningkat menjadi +370,7 ms dan korelasi awal $r = -0,071$. Panel (d) menunjukkan kondisi *stretched* 30% sebagai skenario pergeseran terbesar, dengan *mean shift* mencapai +620,1 ms dan korelasi awal $r = -0,096$. Panel (e) menunjukkan kondisi *squeezed* 10% dengan *mean shift* sebesar -105,3 ms dan korelasi awal $r = 0,012$. Tanda negatif pada nilai *mean shift* mencerminkan bahwa seismogram sintesis berada pada posisi TWT yang lebih dangkal terhadap sumur. Panel (f) menunjukkan kondisi *squeezed* 20% dengan pergeseran -210,6 ms dan korelasi awal $r = 0,076$, dan panel (g) menunjukkan kondisi *squeezed* 30% dengan pergeseran sebesar -297,1 ms dan korelasi awal $r = 0,106$. Keenam kondisi ini selanjutnya digunakan untuk menguji kemampuan DTW dalam mengembalikan keselarasan antara seismik *Q-attenuated* dan seismogram sintesis hasil Dekonvolusi Gabor.

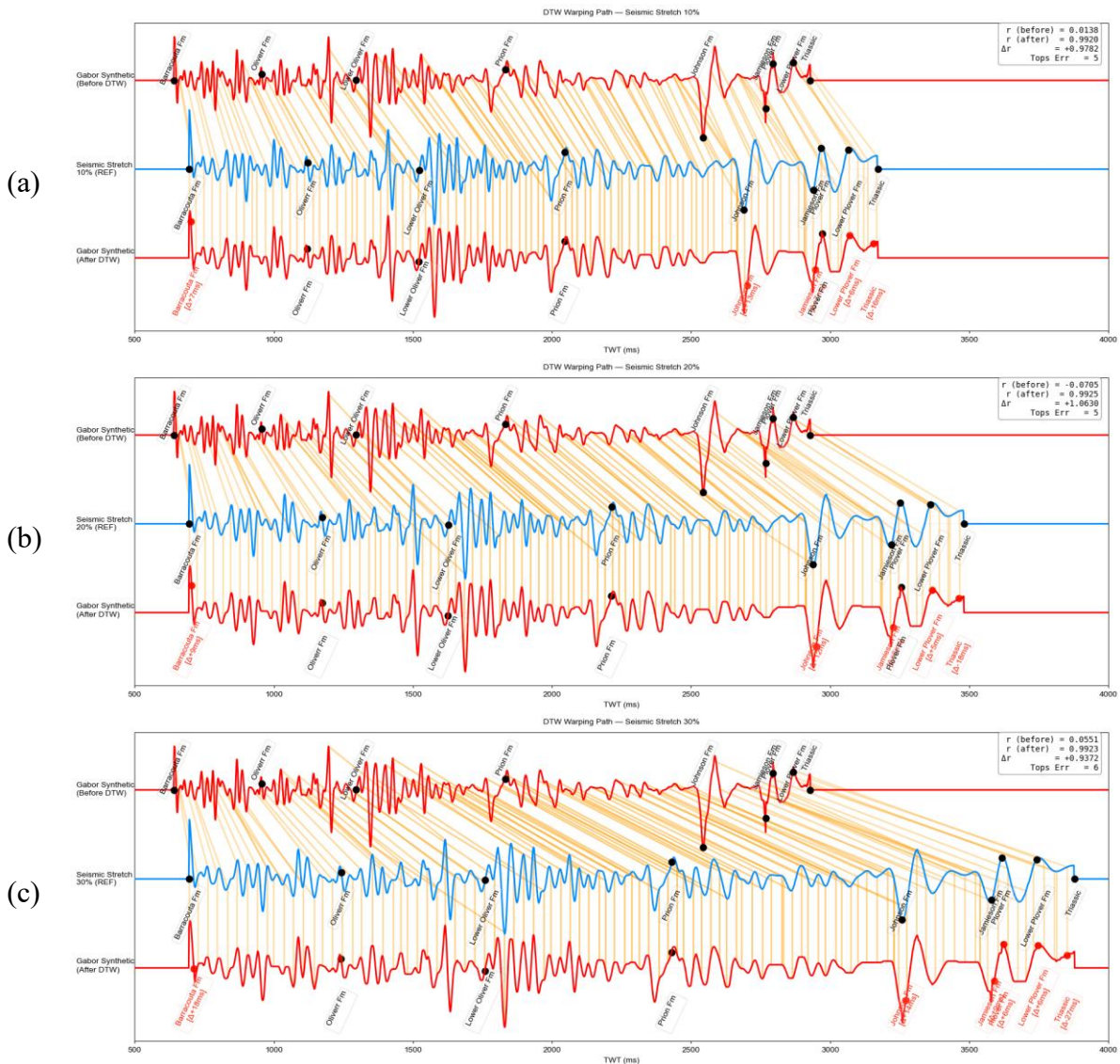
4.2.1 Dynamic Time Warping Q-Attenuated Seismic Synthetic Constrains Fixed Band

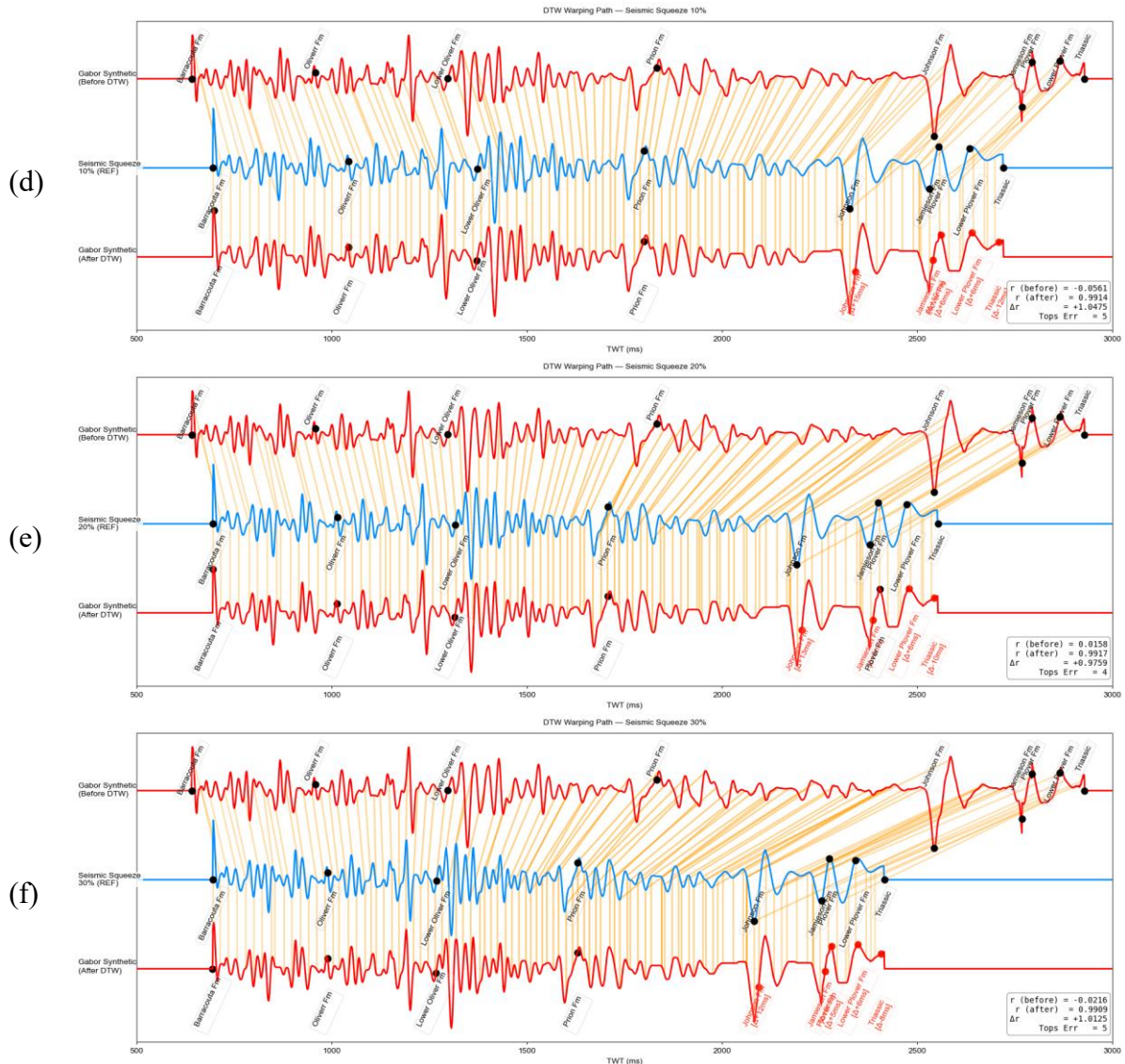
Hasil *auto well tie* DTW *Fixed Band* pada keenam skenario pengujian disajikan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Hasil *auto well tie* DTW *Fixed Band* pada seismik Q-Attenuated: (a) stretched 10%, (b) stretched 20%, (c) stretched 30%, (d) squeezed 10%, (e) squeezed 20%, dan (f) squeezed 30%.

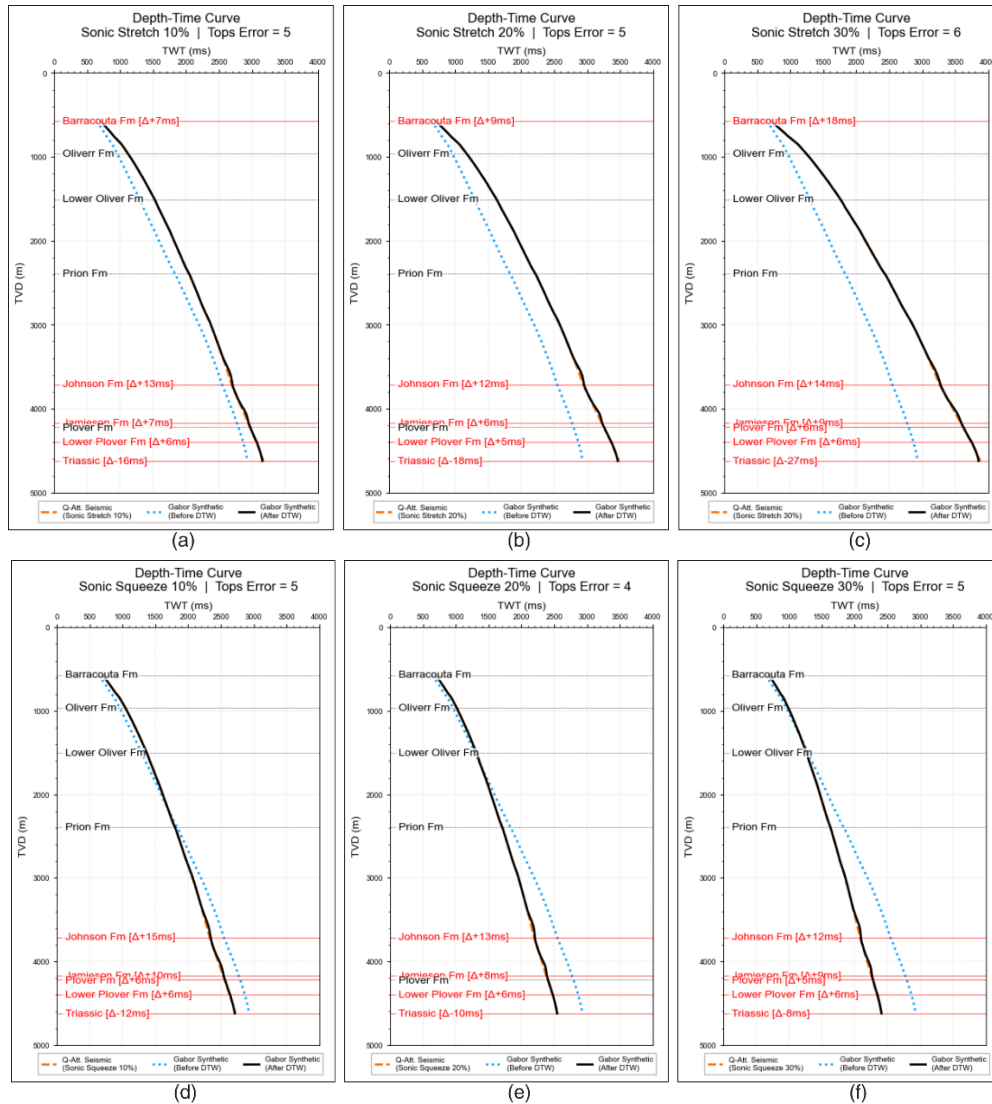
Berdasarkan hasil *auto well tie* DTW *Fixed Band* pada keenam kondisi pengujian sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.6, seluruh skenario menghasilkan peningkatan korelasi yang substansial. Pada kondisi *stretched*, korelasi akhir mencapai $r = 0,992$ untuk *stretched* 10% dan 20% dengan *tops error* masing-masing 5 marker, serta $r = 0,992$ untuk *stretched* 30% dengan *tops error* 6 marker. Pada kondisi *squeezed*, korelasi akhir sebesar $r = 0,991$ untuk *squeezed* 10% dengan *tops error* 5 marker, $r = 0,992$ untuk *squeezed* 20% dengan *tops error* 4 marker, dan $r = 0,991$ untuk *squeezed* 30% dengan *tops error* 5 marker. Peningkatan ini konsisten di seluruh skenario terlepas dari besaran dan arah pergeseran waktu, yang menunjukkan bahwa *constraint* Sakoe-Chiba pada Persamaan (3.28) berhasil membatasi jalur penyelarasan dalam koridor yang realistis secara geologis. Jalur penyelarasan (*warping path*) DTW *Fixed Band* pada keenam skenario disajikan pada Gambar 4.7.





Gambar 4.7 Jalur penyelarasan (*warping path*) DTW *Fixed Band* pada seismik Q-Attenuated: (a) *stretched* 10%, (b) *stretched* 20%, (c) *stretched* 30%, (d) *squeezed* 10%, (e) *squeezed* 20%, dan (f) *squeezed* 30%.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.7, jalur penyelarasan memperlihatkan pola yang konsisten dengan arah pergeseran yang diterapkan. Pada kondisi *stretched*, panel (a), (b), dan (c) menunjukkan deviasi jalur yang konsisten ke arah kiri dari diagonal utama, mencerminkan pemampatan sumbu waktu seismogram sintetis untuk mengkompensasi peregangan dengan besaran deviasi yang meningkat proporsional sesuai pertambahan *mean shift*. Pada kondisi *squeezed*, panel (d), (e), dan (f) menunjukkan pola yang berlawanan di mana deviasi ke arah kanan mencerminkan peregangan sumbu waktu untuk mengkompensasi pemampatan. Variasi lokal yang cukup besar pada jalur penyelarasan terutama di zona dalam teramati pada seluruh panel, yang dapat dikaitkan dengan perubahan karakteristik spektral wavelet Gabor di zona tersebut akibat *residual* atenuasi Q yang tidak sepenuhnya terkompensasi oleh proses dekonvolusi. Kurva waktu-kedalaman (*Time-Depth Relation*) hasil koreksi DTW *Fixed Band* pada keenam skenario disajikan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Hasil kurva waktu-kedalaman (*Time-Depth Relation*) DTW *Fixed Band* pada seismik sintesis *Q-Attenuated*: (a) *stretched* 10%, (b) *stretched* 20%, (c) *stretched* 30%, (d) *squeezed* 10%, (e) *squeezed* 20%, dan (f) *squeezed* 30%.

Berdasarkan Gambar 4.8, kurva waktu-kedalaman yang dihasilkan dari koreksi DTW *Fixed Band* menunjukkan bahwa pada kondisi *stretched*, kurva TDC hasil DTW bergeser ke kiri dari TDC awal, mencerminkan percepatan waktu tempuh yang diperlukan untuk mengkompensasi peregangan. Sebaliknya pada kondisi *squeezed*, kurva bergeser ke kanan dengan besaran yang meningkat proporsional terhadap tingkat pemampatan yang diterapkan. Meskipun korelasi akhir tinggi, kurva TDC pada beberapa panel menunjukkan deviasi lokal yang cukup besar terutama pada zona Johnson Fm ke bawah, konsisten dengan *tops error* yang teramati. Pada kondisi *stretched* 10%, deviasi marker yang tidak terkoreksi antara lain Barracouta Fm ($\Delta+7$ ms), Johnson Fm ($\Delta+13$ ms), dan Triassic ($\Delta-16$ ms). Pada *stretched* 30%, deviasi terbesar terjadi pada Triassic ($\Delta-27$ ms). Pola ini menunjukkan bahwa *Fixed Band* tidak cukup untuk mengakomodasi variasi koreksi waktu yang berbeda antar segmen stratigrafi, karena *constraint* Sakoe-Chiba diterapkan secara global tanpa mempertimbangkan batas formasi sebagai kondisi batas. Maka dari itu dilakukan pendekatan menggunakan *Marker Anchored*, di mana batas formasi dalam kerangka DTW digunakan sebagai *hard constraint* sesuai Persamaan (3.30).

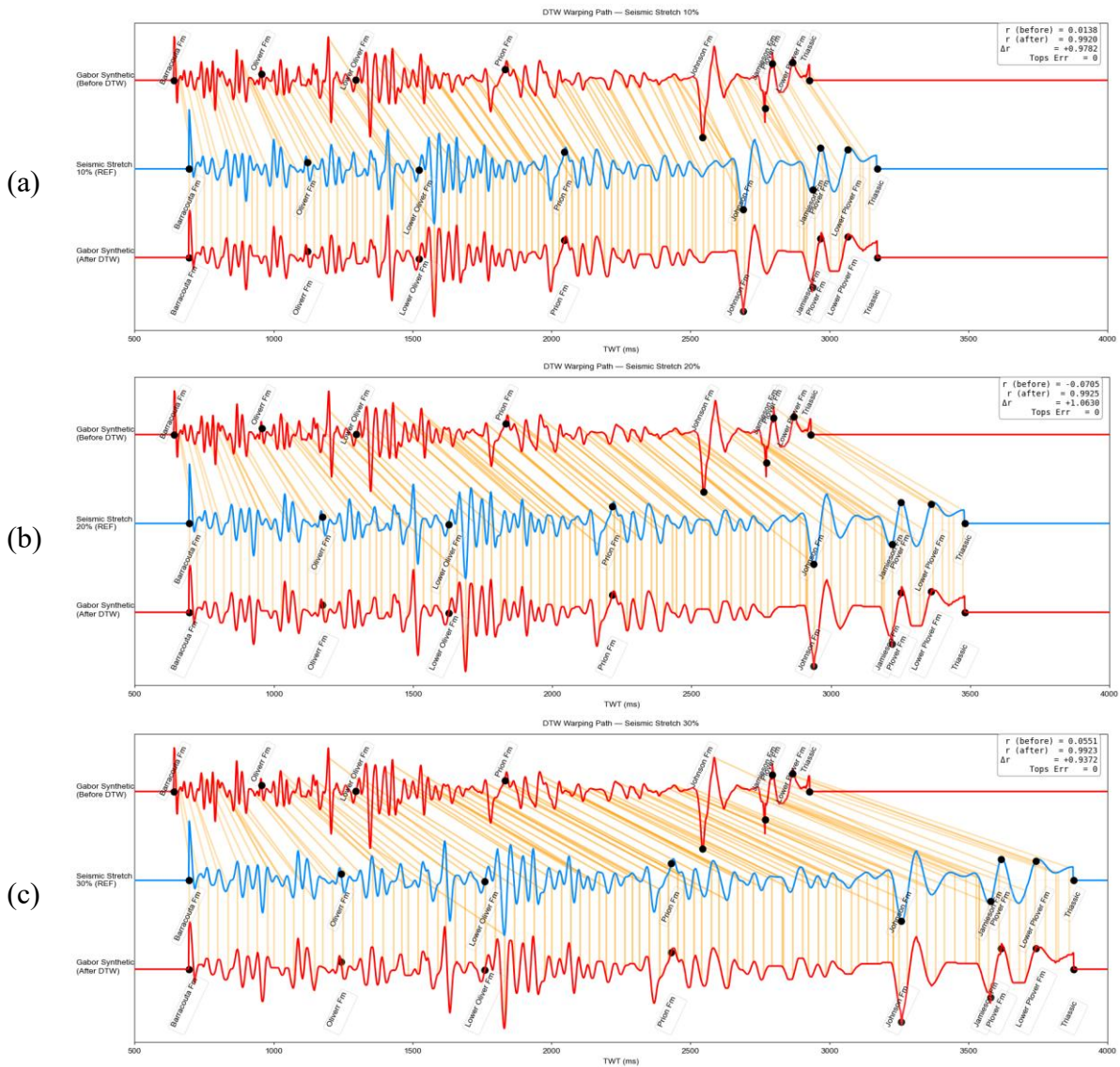
4.2.2 Dynamic Time Warping Q-Attenuated Seismic Synthetic Constrains Marker Anchored

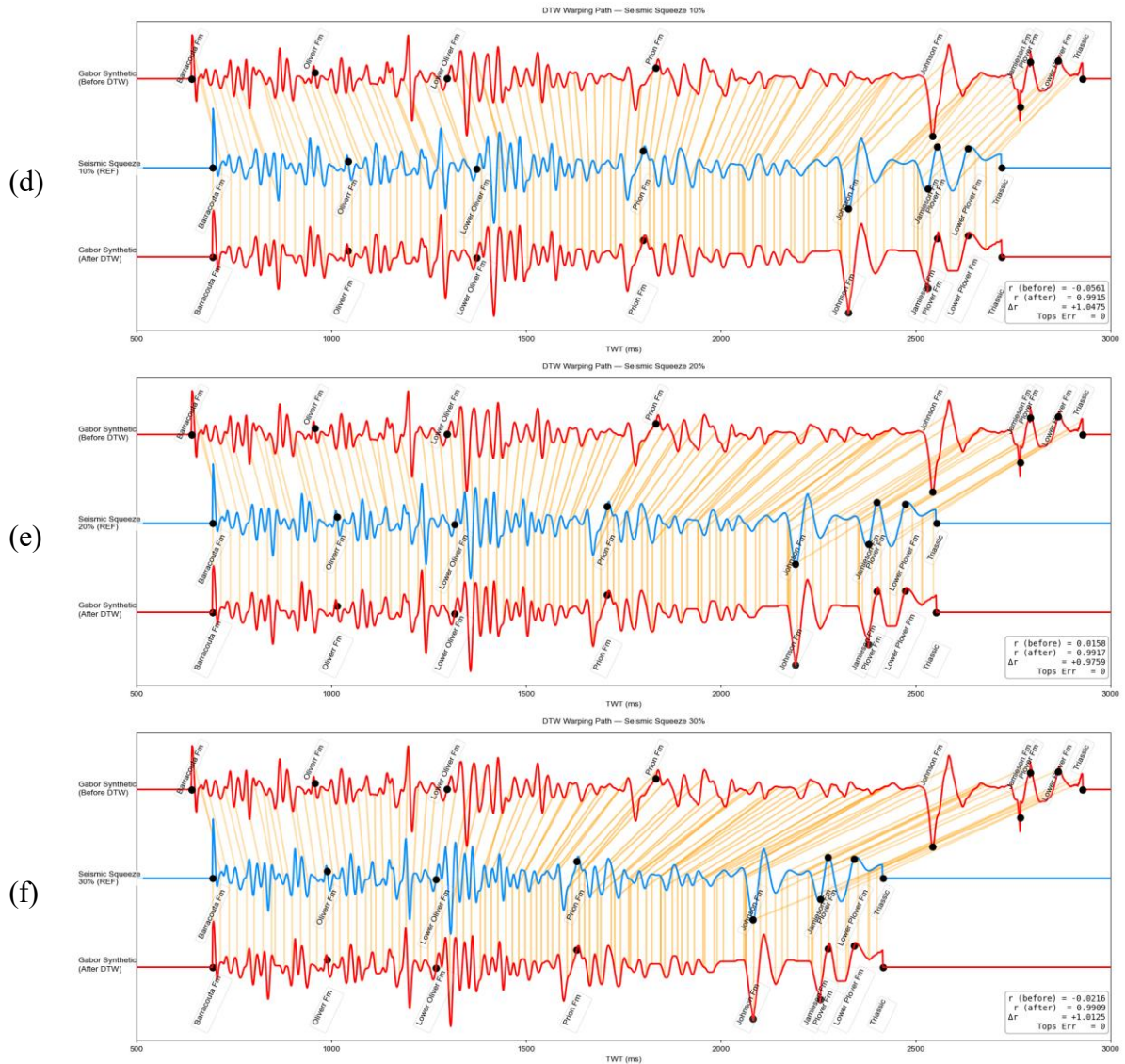
Hasil *auto well tie* DTW Marker Anchored pada keenam skenario pengujian disajikan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Hasil *auto well tie* DTW Marker Anchored pada seismik sintesis Q-Attenuated: (a) stretched 10%, (b) stretched 20%, (c) stretched 30%, (d) squeezed 10%, (e) squeezed 20%, dan (f) squeezed 30%.

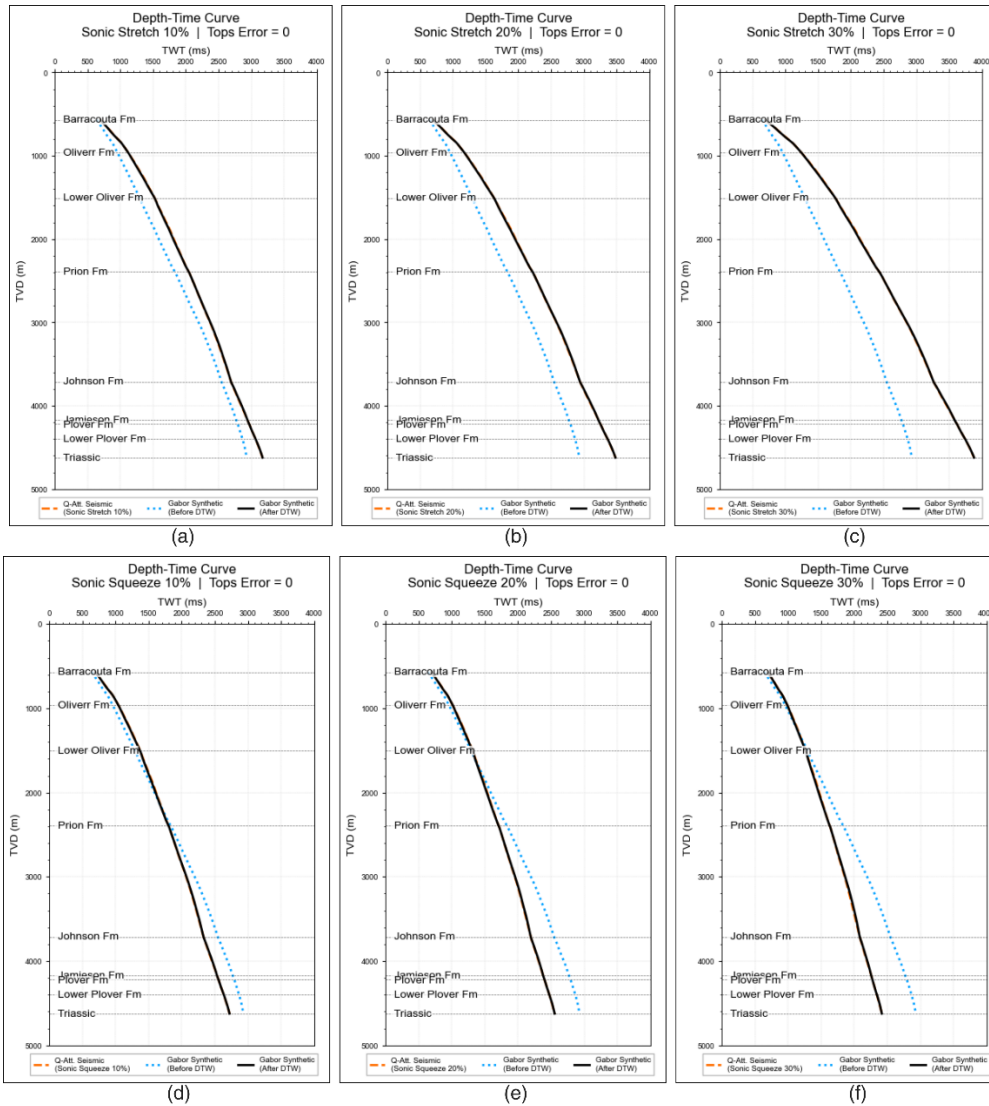
Berdasarkan hasil *auto well tie* DTW Marker Anchored pada keenam kondisi pengujian sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.9, korelasi akhir yang dicapai sebanding dengan *Fixed Band*, yaitu $r = 0,992$ pada *stretched* 10%, $r = 0,993$ pada *stretched* 20%, $r = 0,992$ pada *stretched* 30%, $r = 0,991$ pada *squeezed* 10%, $r = 0,992$ pada *squeezed* 20%, dan $r = 0,991$ pada *squeezed* 30%. Perbedaan yang paling mencolok dibandingkan *Fixed Band* adalah *tops error* = 0 pada seluruh panel baik *stretched* maupun *squeezed*, menunjukkan bahwa seluruh marker formasi berhasil diselaraskan tepat pada posisi geologisnya. Hal tersebut sesuai dengan jaminan matematis pada Persamaan (3.30) dan (3.31), di mana penyelesaian DTW secara terpisah per segmen antar marker dengan kondisi batas *piecewise-linear* memastikan *tops error* = 0 ms pada setiap marker. Jalur penyalarsan (*warping path*) DTW Marker Anchored pada keenam skenario disajikan pada Gambar 4.10.





Gambar 4.10 Jalur penyelarasan (*warping path*) DTW *Marker Anchored* pada seismik sintetis *Q-Attenuated*: (a) *stretched* 10%, (b) *stretched* 20%, (c) *stretched* 30% (d) *squeezed* 10%, (e) *squeezed* 20%, dan (f) *squeezed* 30%.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.10, jalur penyelarasan DTW *Marker Anchored* menunjukkan pola yang lebih terstruktur dibandingkan *Fixed Band*. Jalur terbagi menjadi segmen-segmen yang dibatasi oleh titik jangkar marker formasi, sehingga deviasi pada setiap segmen bersifat lokal dan tidak menyebar ke segmen lain. Pada kondisi *stretched*, deviasi antar segmen bervariasi mengikuti karakteristik atenuasi *Q* masing-masing interval formasi, berbeda dengan *Fixed Band* yang menerapkan *constraint* seragam di seluruh *trace*. Pola ini mengkonfirmasi bahwa pendekatan *Marker Anchored* lebih adaptif terhadap variasi koreksi waktu antar interval stratigrafi. Kurva waktu-kedalaman (*Time-Depth Relation*) hasil koreksi DTW *Marker Anchored* pada keenam skenario disajikan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Hasil kurva waktu-kedalaman (*Time-Depth Relation*) DTW *Marker Anchored* pada seismik sintesis *Q-Attenuated*: (a) *stretched* 10%, (b) *stretched* 20%, (c) *stretched* 30% (d) *squeezed* 10%, (e) *squeezed* 20%, dan (f) *squeezed* 30%.

Berdasarkan Gambar 4.11, kurva waktu-kedalaman yang dihasilkan dari koreksi DTW *Marker Anchored* menunjukkan transisi yang lebih mulus antar segmen marker karena koreksi waktu dipaksakan melewati titik-titik jangkar yang diketahui secara geologi. Seluruh marker dari Barracouta Fm hingga Triassic terposisi tepat pada kurva TDC yang diperbarui, konsisten dengan *tops error* = 0 yang dicapai, tanpa deviasi residual pada interval manapun. Hasil ini menegaskan bahwa pendekatan *Marker Anchored* menghasilkan kurva waktu-kedalaman yang lebih representatif secara geologis dibandingkan *Fixed Band*, terutama pada kondisi *stretch* dan *squeeze* yang besar. Ringkasan hasil pengujian DTW pada seluruh skenario *stretch* dan *squeeze* disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Ringkasan *dynamic time warping* terhadap seismik sintetis.

Parameter	Seismic Stretched			Seismic Squeezed		
	10%	20%	30%	10%	20%	30%
Korelasi sebelum DTW	0.142	-0.071	-0.096	-0.056	0.016	-0.022
Mean shift (ms)	176.8	370.7	620.1	-105.3	-210.7	-297.1
Korelasi DTW Fixed-Band	0.992	0.992	0.992	0.991	0.992	0.991
Tops Error	5	5	6	5	4	5
Korelasi DTW Marker-Anchored	0.992	0.993	0.992	0.991	0.992	0.991
Tops Error	0	0	0	0	0	0

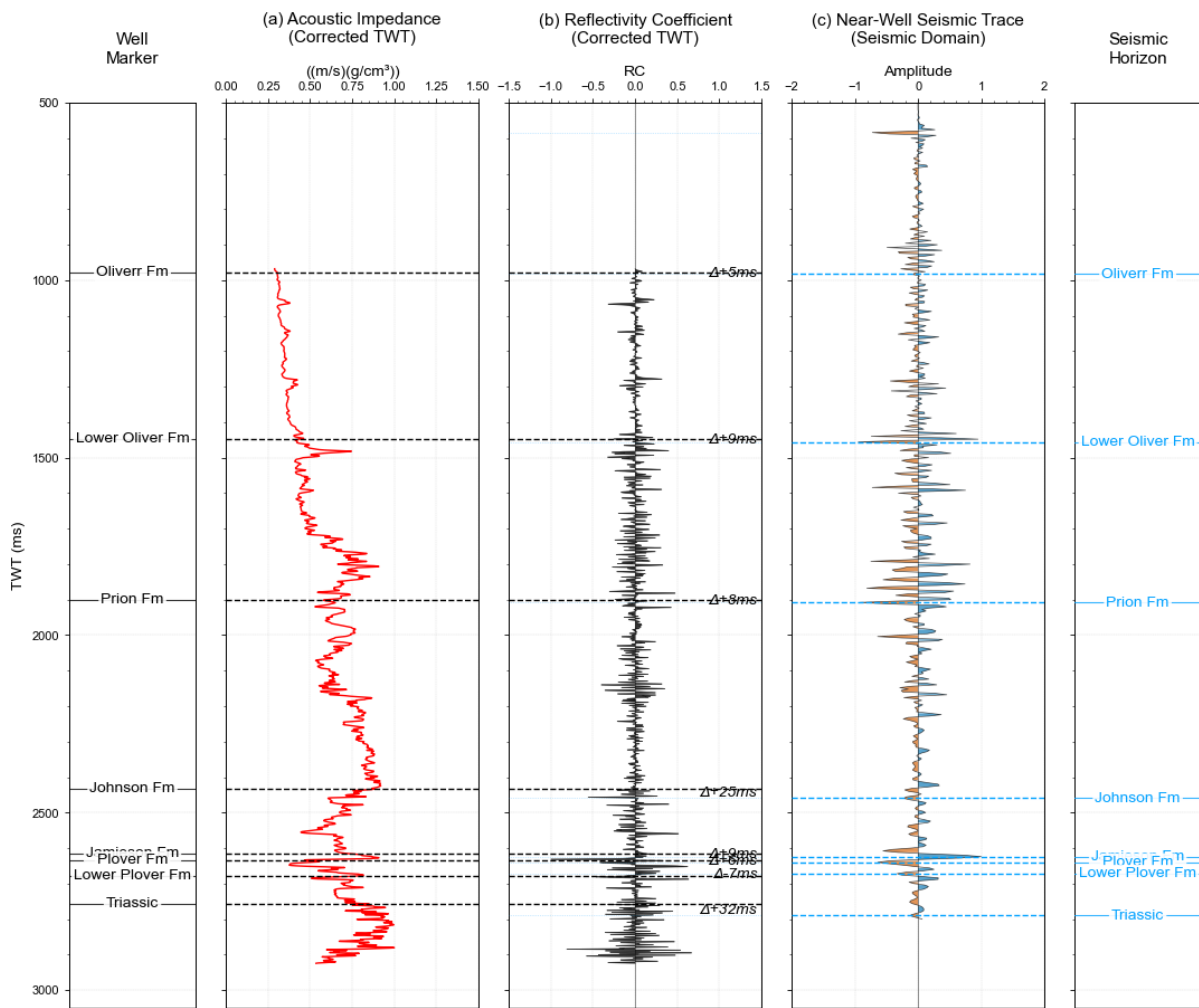
Berdasarkan Tabel 4.2, kedua pendekatan menghasilkan nilai korelasi yang sebanding di seluruh kondisi *stretch* dan *squeeze*, dengan peningkatan yang substansial dari kondisi awal yang berkisar antara $r = -0,096$ hingga $r = 0,142$ menjadi $r = 0,991-0,993$ setelah koreksi DTW. Perbedaan yang signifikan terletak pada *tops error*, di mana *Fixed Band* konsisten menghasilkan 4-6 marker yang tidak *match*, sementara *Marker Anchored* menghasilkan *tops error* = 0 pada seluruh skenario. Temuan ini menegaskan bahwa penggunaan marker formasi sebagai titik jangkar meningkatkan konsistensi geologis hasil *well-seismic tie* otomatis. Hasil pengujian pada data sintetis ini menjadi dasar implementasi pada data lapangan nyata Lapangan Torosa.

4.3 Auto Well Tie pada Data Seismik Lapangan

Kerangka kerja *well-seismic tie* otomatis yang telah divalidasi pada data sintetis selanjutnya diterapkan pada lima sumur data nyata Lapangan Torosa, yaitu NSR-1, Torosa-2, Torosa-3, Torosa-4, dan Torosa-5. Berbeda dengan validasi sintetis, ketidakpastian pada data lapangan bersumber dari perbedaan *time position* antara data sumur dan seismik, efek atenuasi Q yang tidak seragam antar formasi, dan kualitas log sumur yang bervariasi. Evaluasi dilakukan menggunakan koefisien korelasi (r) dan *tops error* sebagai metrik utama.

4.3.1 North Scoot Reef -1

Kondisi awal sumur NSR-1 sebelum penerapan *well-seismic tie* disajikan pada Gambar 4.12.

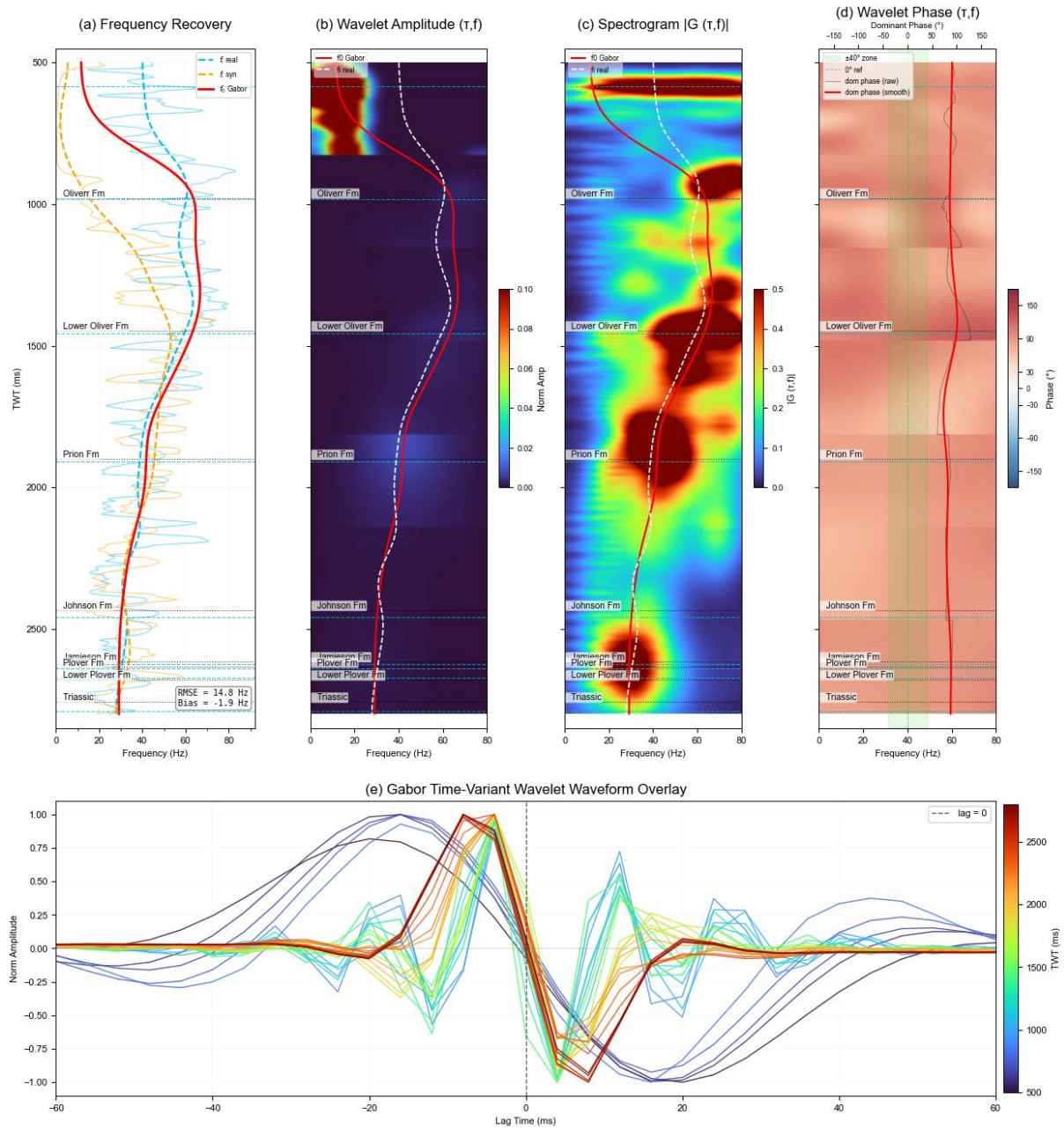


Gambar 4.12 Kondisi awal *pre-tie* sumur NSR-1: (a) *Acoustic Impedance* (Corrected TWT), (b) *Reflectivity Coefficient* (Corrected TWT), dan (c) *Near-Well Seismic Trace* (Seismic Domain).

Berdasarkan Gambar 4.12, perbedaan posisi marker antara domain sumur dan seismik sudah terlihat pada kondisi *pre-tie*, dengan deviasi yang bervariasi antar formasi mulai dari Oliverr Fm ($\Delta+5$ ms) hingga Triassic ($\Delta+32$ ms). Deviasi terbesar teramati pada Johnson Fm ($\Delta+25$ ms) dan Triassic ($\Delta+32$ ms), mengindikasikan adanya akumulasi kesalahan kurva waktu-kedalaman yang semakin besar ke zona dalam dan perlu dikoreksi oleh kerangka kerja

Dekonvolusi Gabor dan DTW. Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor yang diterapkan pada *trace* seismik nyata NSR-1 disajikan pada Gambar 4.13.

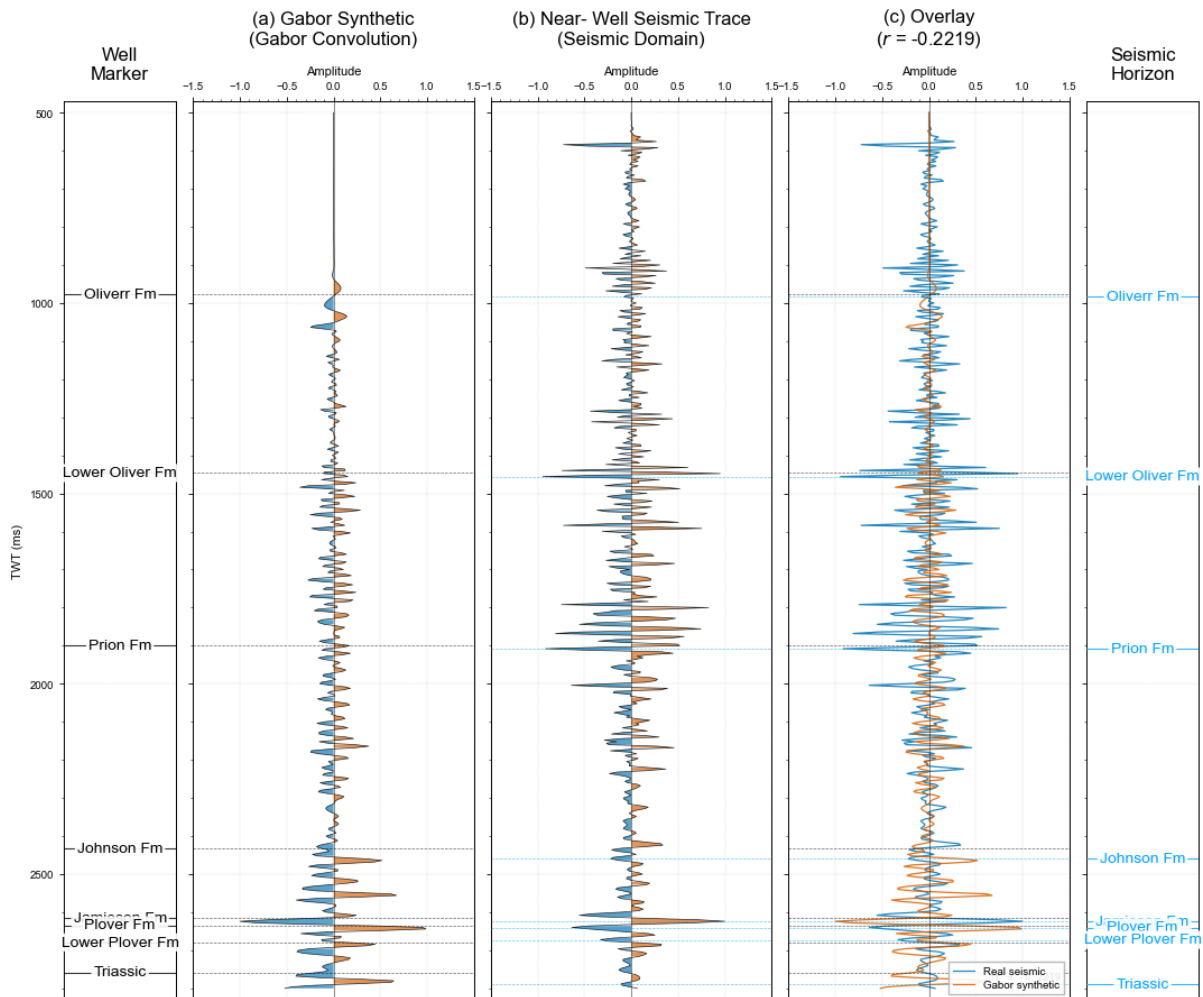
4.3.1.1 Gabor Synthetic Generation



Gambar 4.13 Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor NSR-1: (a) *Frequency Recovery*, (b) *Wavelet Amplitude (τ, f)*, (c) *Spectrogram $|G(\tau, f)|$* , (d) *Wavelet Phase (τ, f)*, dan (e) *Gabor Time-Variant Wavelet Waveform Overlay*.

Berdasarkan Gambar 4.13, estimasi wavelet *time-variant* hasil Dekonvolusi Gabor pada *trace* seismik sekitar sumur NSR-1 menunjukkan pola yang konsisten dengan karakteristik atenuasi Q Lapangan Torosa. Panel (a) menunjukkan kurva frekuensi dominan terestimasi yang mengikuti tren penurunan frekuensi *instantaneous* seismik dari zona dangkal hingga zona dalam dengan RMSE sebesar 10 Hz dan *bias* sebesar -3 Hz. Panel (b) dan (c) mengkonfirmasi perpindahan energi spektral ke frekuensi lebih rendah seiring bertambahnya TWT, konsisten

dengan efek atenuasi Q kumulatif pada Lapangan Torosa. Panel (d) menunjukkan *residual phase shift* pada zona dalam, serupa dengan yang teramati pada data sintetis, yang mengindikasikan bahwa degradasi estimasi fasa oleh transformasi Hilbert pada Persamaan (3.12) juga terjadi pada data lapangan nyata (Cui dan Margrave, 2015). Panel (e) menunjukkan kumpulan wavelet terestimasi dalam domain waktu yang lebar puncaknya melebar seiring pertambahan TWT dengan bentuk yang semakin kompleks pada zona dalam. Kondisi awal seismogram sintetis hasil Dekonvolusi Gabor terhadap *trace* seismik NSR-1 sebelum koreksi DTW disajikan pada Gambar 4.14.

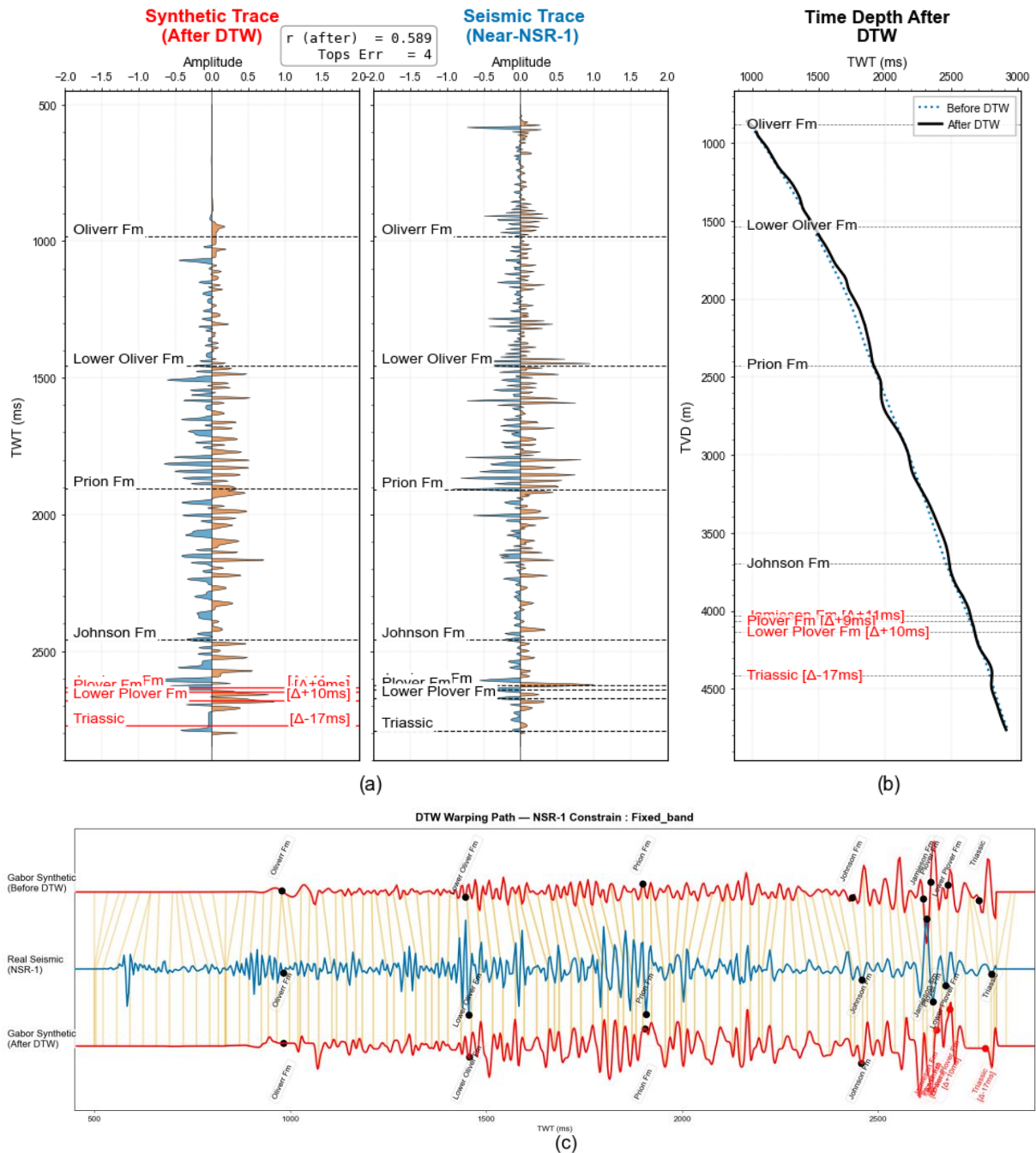


Gambar 4.14 Kondisi awal seismogram sintetis terhadap *trace* seismik NSR-1: (a) *Gabor Synthetic* (Gabor Convolution), (b) *Near-Well Seismic Trace* (Seismic Domain), dan (c) *Overlay*

Seismogram sintetis hasil Dekonvolusi Gabor dibandingkan terhadap *real seismic trace* NSR-1 sebelum koreksi DTW diterapkan. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.14, koefisien korelasi awal sebesar $r = -0,2219$ mencerminkan ketidakselarasan temporal yang signifikan antara domain sumur dan seismik. Pola amplitudo kedua *trace* secara umum serupa, namun pergeseran posisi waktu yang belum terkoreksi membuat keduanya tidak tersinkronisasi. Kondisi ini menjadi titik awal yang perlu dikoreksi oleh DTW pada tahapan berikutnya.

4.3.1.2 Dynamic Time Warping Constrain Fixed Band

Hasil DTW *Fixed Band* NSR-1 disajikan pada Gambar 4.15.



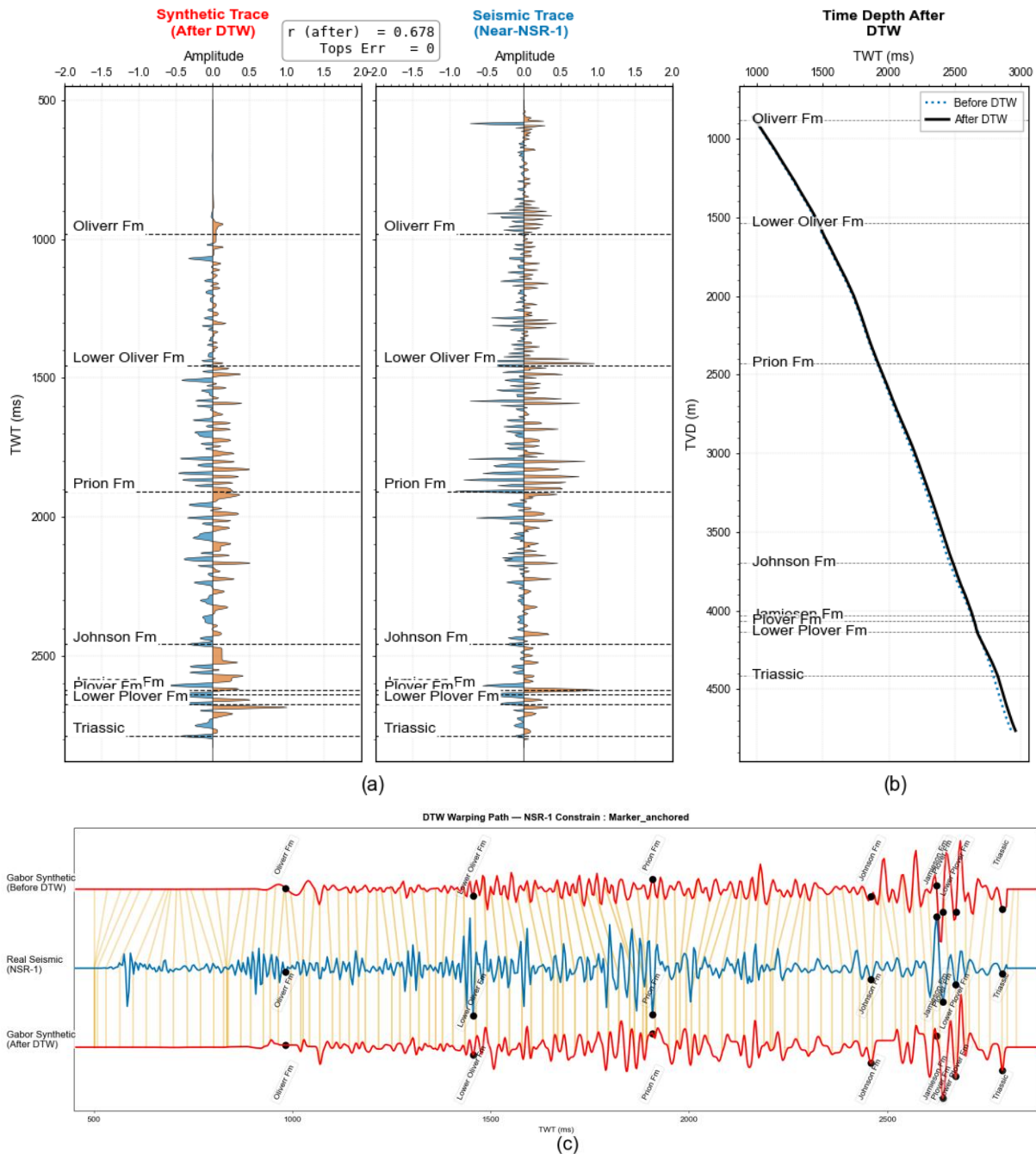
Gambar 4.15 Hasil DTW *Fixed Band* NSR-1: (a) perbandingan *Synthetic Trace* (After DTW) terhadap *Seismic Trace* (Near-NSR-1), (b) kurva *Time Depth* sebelum dan sesudah DTW, dan (c) *warping path*.

. Berdasarkan Gambar 4.15, korelasi meningkat dari $r = -0,2219$ sebelum DTW menjadi $r = 0,589$ setelah DTW. Namun *tops error* = 4 marker menunjukkan bahwa *Fixed Band* tidak mampu mempertahankan konsistensi posisi marker formasi secara geologis. Deviasi yang tidak terkoreksi teramati pada Jamieson Fm ($\Delta+11$ ms), Plover Fm ($\Delta+9$ ms), Lower Plover Fm ($\Delta+10$ ms), dan Triassic ($\Delta-17$ ms). Pada panel (b), deviasi kurva TDC paling besar terjadi pada

interval dangkal hingga Lower Oliver Fm dan mengecil ke arah zona dalam, mengindikasikan bahwa sebagian besar ketidakselarasan waktu terkonsentrasi pada zona *overburden* Tersier. Pada panel (c), *warping path* menunjukkan deviasi konsisten dari diagonal utama di seluruh rentang TWT dengan variasi lokal yang lebih besar pada zona Johnson Fm ke bawah, sejalan dengan kompleksitas spektral wavelet Gabor pada zona atenuasi tinggi.

4.3.1.3 Dynamic Time Warping Marker Anchored

Hasil DTW *Marker Anchored* NSR-1 disajikan pada Gambar 4.16.

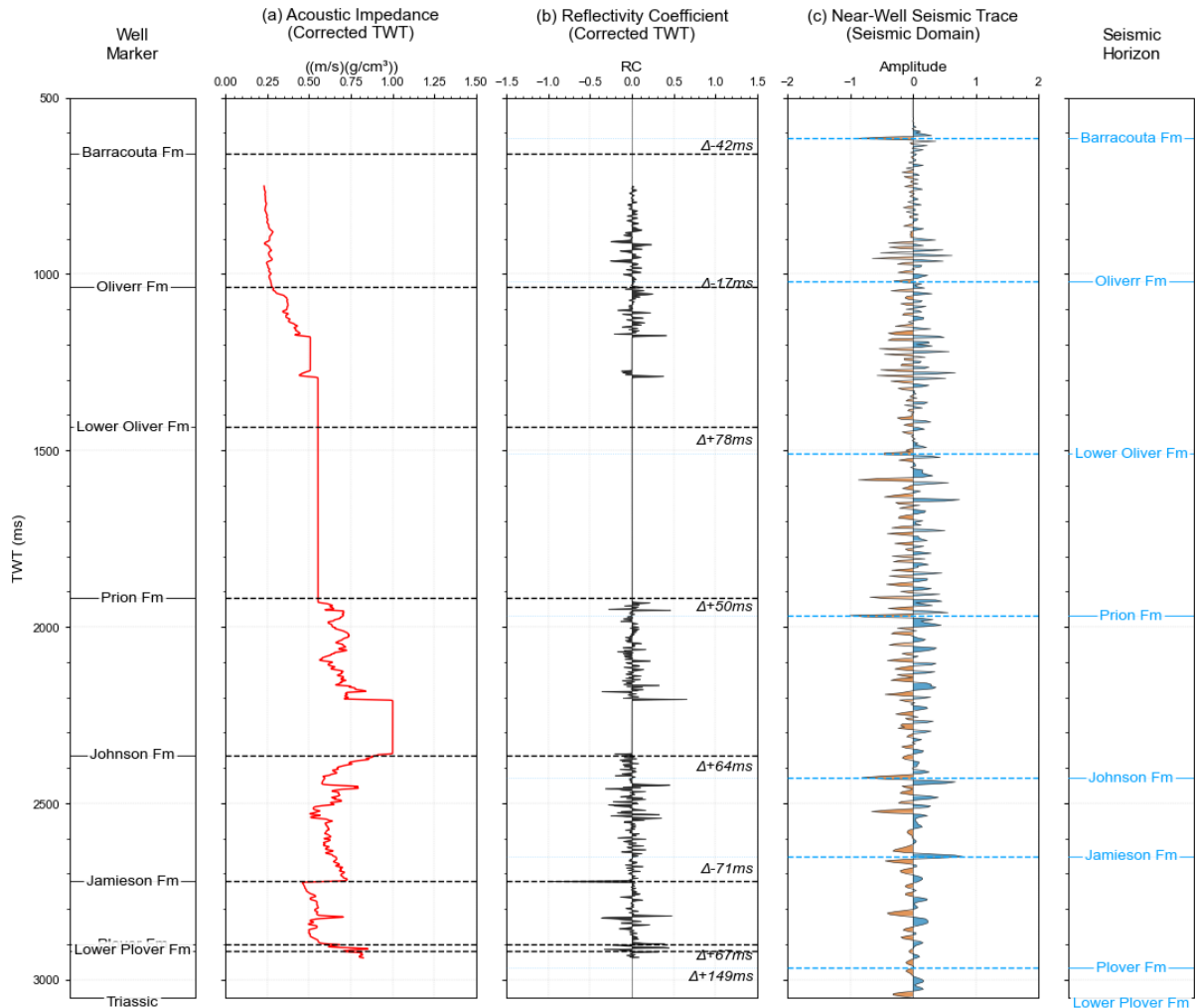


Gambar 4.16 Hasil DTW *Marker Anchored* NSR-1: (a) perbandingan *Synthetic Trace* (After DTW) terhadap *Seismic Trace* (Near-NSR-1), (b) kurva *Time Depth* sebelum dan sesudah koreksi, dan (c) *warping path*.

Berdasarkan Gambar 4.16, korelasi meningkat dari $r = -0,2219$ menjadi $r = 0,678$ dengan $tops\ error = 0$. Peningkatan korelasi yang lebih tinggi dibandingkan *Fixed Band* (selisih +0,089) sekaligus dengan $tops\ error = 0$ mengkonfirmasi keunggulan pendekatan ini pada data lapangan nyata. Panel (a) menunjukkan keselarasan *warped synthetic* terhadap *real seismic trace* yang lebih baik dibandingkan *Fixed Band*, terutama pada interval zona dalam. Panel (b) menunjukkan kurva TDC yang lebih mulus dengan seluruh titik jangkar marker terposisi tepat, konsisten dengan jaminan matematis Persamaan (3.30) dan (3.31). Panel (c) memperlihatkan *warping path* yang terbagi menjadi segmen-segmen antar marker dengan koreksi lokal yang bervariasi sesuai karakteristik masing-masing interval formasi, tanpa mengganggu kesesuaian marker di segmen lain.

4.3.2 Torosa-2

Kondisi awal sumur Torosa-2 sebelum penerapan *well-seismic tie* disajikan pada Gambar 4.17.

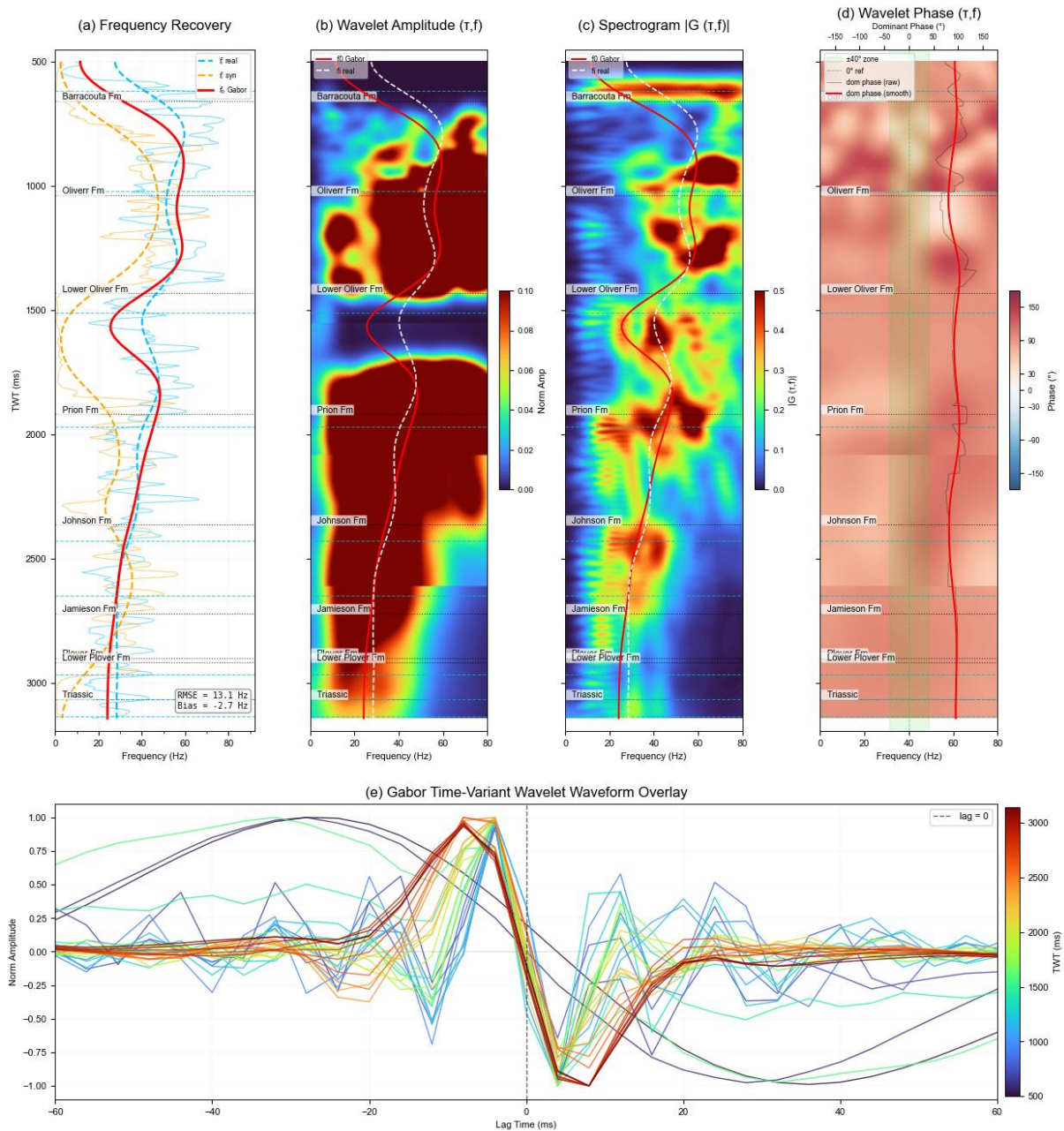


Gambar 4.17 Kondisi awal *pre-tie* sumur Torosa-2: (a) *Acoustic Impedance* (Corrected TWT), (b) *Reflectivity Coefficient* (Corrected TWT), dan (c) *Near-Well Seismic Trace* (Seismic Domain).

Berdasarkan Gambar 4.17, perbedaan posisi marker antara domain sumur dan seismik sudah terlihat pada seluruh interval dengan besaran dan arah yang bervariasi. Deviasi terbesar

teramati pada Triassic ($\Delta+149$ ms) dan Lower Oliver Fm ($\Delta+78$ ms), sementara Jamieson Fm menunjukkan arah deviasi yang berlawanan ($\Delta-71$ ms). Pola deviasi yang tidak seragam antar formasi ini mengindikasikan adanya kesalahan sistematis kurva waktu-kedalaman yang perlu dikoreksi oleh kerangka kerja Dekonvolusi Gabor dan DTW. Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor yang diterapkan pada *trace* seismik nyata Torosa-2 disajikan pada Gambar 4.18.

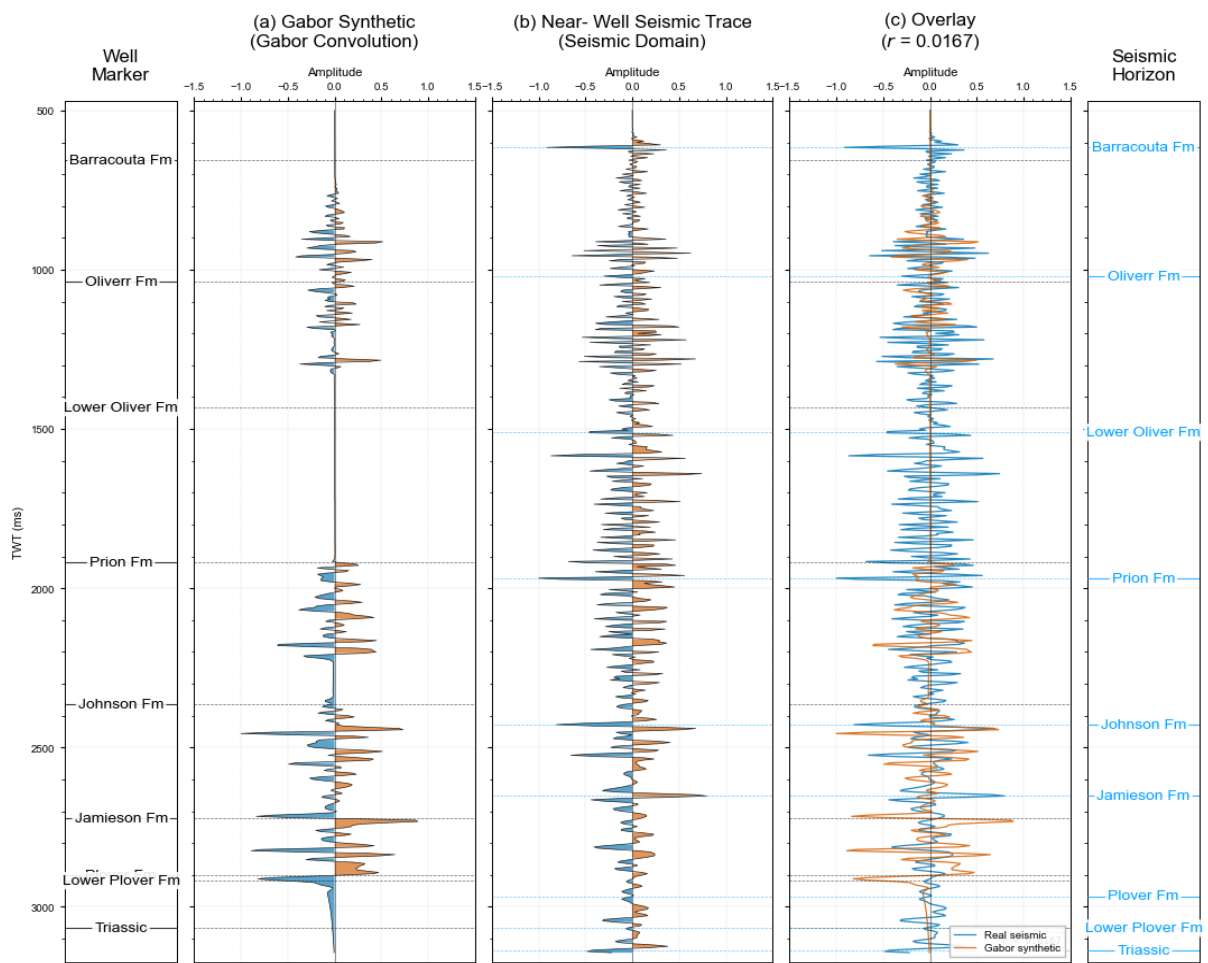
4.3.2.1 Gabor Synthetic Generation



Gambar 4.18 Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor Torosa-2: (a) *Frequency Recovery*, (b) *Wavelet Amplitude (τ, f)*, (c) *Spectrogram $|G(\tau, f)|$* , (d) *Wavelet Phase (τ, f)*, dan (e) *Gabor Time-Variant Wavelet Waveform Overlay*.

Berdasarkan Gambar 4.18, estimasi wavelet *time-variant* hasil Dekonvolusi Gabor pada *trace* seismik sekitar sumur Torosa-2 menunjukkan pola yang konsisten dengan karakteristik

atenuasi Q Lapangan Torosa. Panel (a) menunjukkan kurva frekuensi dominan terestimasi yang mengikuti tren penurunan frekuensi *instantaneous* seismik dari zona dangkal hingga zona dalam dengan RMSE sebesar 6,9 Hz dan *bias* sebesar -2,6 Hz. Panel (b) dan (c) memperlihatkan konsentrasi energi spektral yang bergeser ke frekuensi lebih rendah seiring bertambahnya TWT, konsisten dengan karakteristik atenuasi Q Lapangan Torosa. Panel (d) menunjukkan *residual phase shift* pada zona dalam yang mengkonfirmasi bahwa keterbatasan estimasi fasa oleh transformasi Hilbert pada Persamaan (3.12) bersifat konsisten di seluruh sumur Lapangan Torosa. Panel (e) menunjukkan kumpulan wavelet terestimasi dalam domain waktu dengan bentuk yang semakin kompleks dan tersebar pada zona dalam, mencerminkan akumulasi *residual phase shift* yang tidak terkoreksi pada interval tersebut. Kondisi awal seismogram sintetis hasil Dekonvolusi Gabor terhadap *trace* seismik Torosa-2 sebelum koreksi DTW disajikan pada Gambar 4.19.

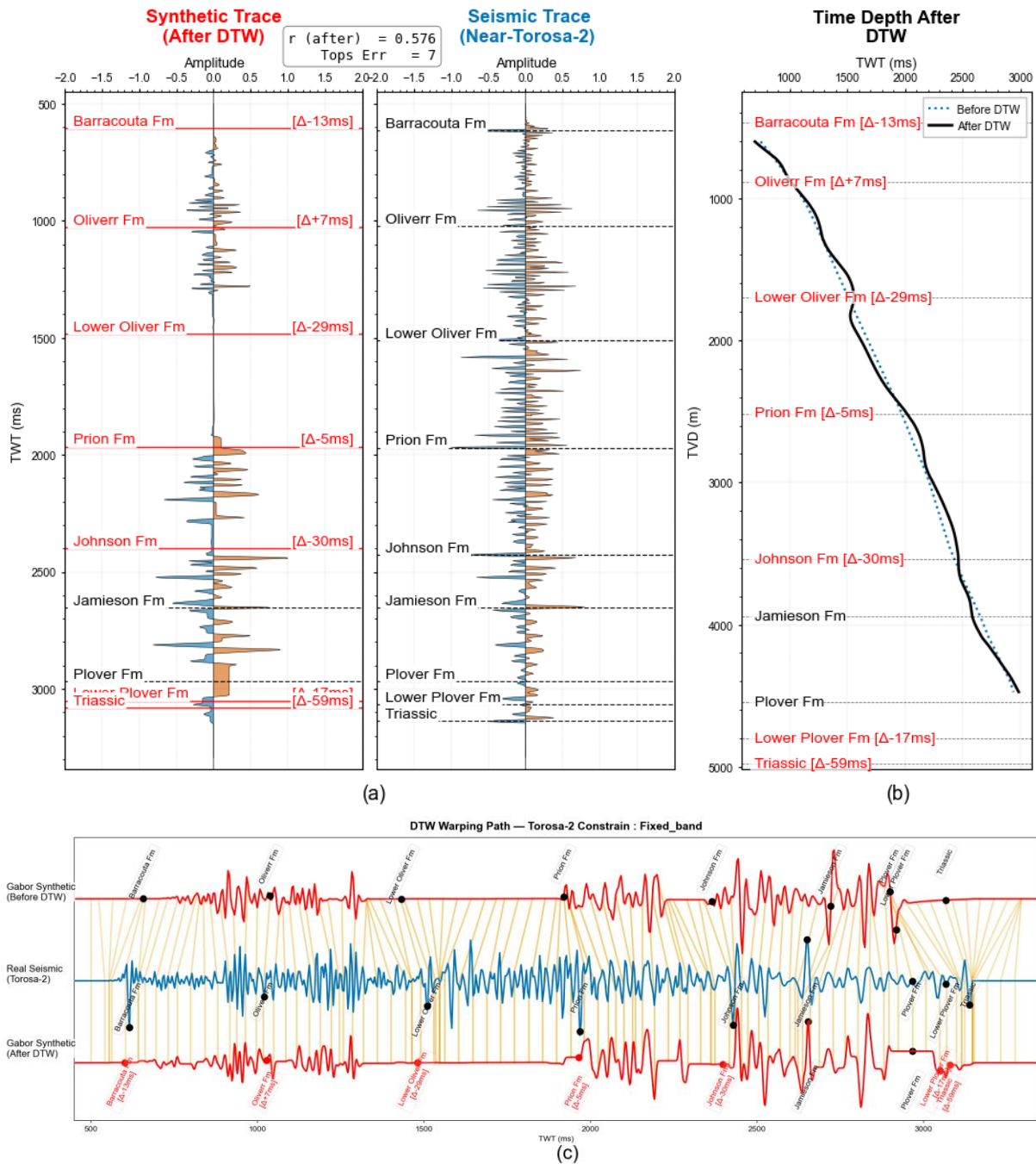


Gambar 4.19 Kondisi awal seismogram sintetis terhadap *trace* seismik Torosa-2: (a) *Gabor Synthetic* (Gabor Convolution), (b) *Near-Well Seismic Trace* (Seismic Domain), dan (c) *Overlay*.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.19, koefisien korelasi awal sebesar $r = 0,0167$ mencerminkan ketidakselarasan temporal yang signifikan. Pola amplitudo kedua *trace* secara umum serupa pada zona dangkal, namun pergeseran posisi waktu yang terakumulasi ke zona dalam membuat keduanya semakin tidak tersinkronisasi. Kondisi ini menjadi titik awal koreksi DTW.

4.3.2.2 Dynamic Time Warping Fixed Band

Hasil DTW *Fixed Band* Torosa-2 disajikan pada Gambar 4.20.



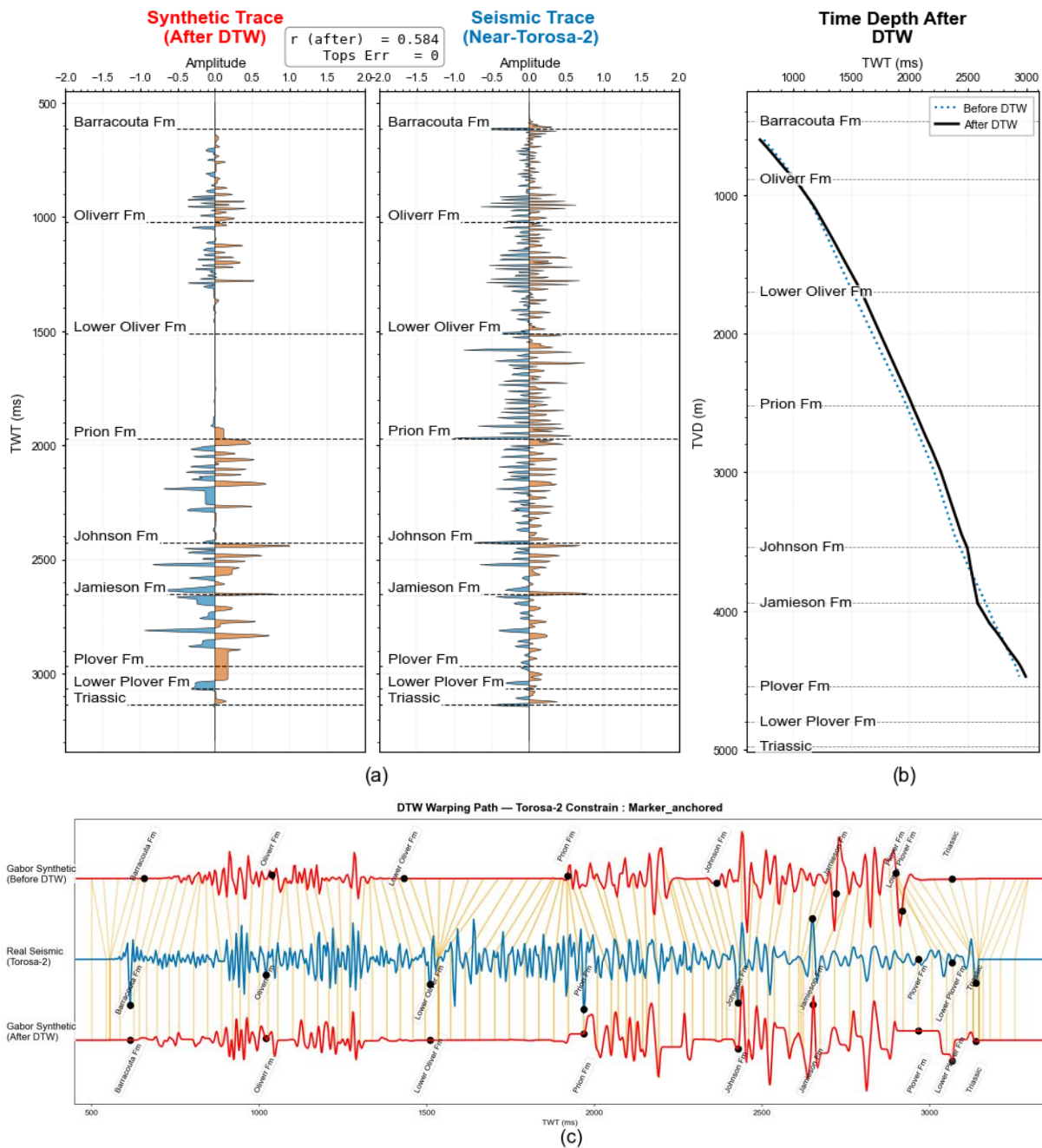
Gambar 4.20 Hasil DTW *Fixed Band* Torosa-2: (a) perbandingan *Synthetic Trace* (After DTW) terhadap *Seismic Trace* (Near-Torosa-2), (b) kurva *Time Depth* sebelum dan sesudah koreksi, dan (c) *warping path*.

Berdasarkan Gambar 4.20, korelasi meningkat dari $r = 0,0167$ sebelum DTW menjadi $r = 0,576$ setelah DTW. Meskipun peningkatan korelasi cukup substansial, *tops error* = 7 marker merupakan yang tertinggi di antara seluruh sumur yang diuji. Deviasi yang tidak terkoreksi teramati pada Barracouta Fm ($\Delta-13$ ms), Oliver Fm ($\Delta+7$ ms), Lower Oliver Fm ($\Delta-29$ ms), Prion Fm ($\Delta-5$ ms), Johnson Fm ($\Delta-30$ ms), Lower Plover Fm ($\Delta-17$ ms), dan Triassic ($\Delta-59$ ms).

ms), mengindikasikan bahwa koreksi waktu yang diperlukan bervariasi cukup besar antar interval formasi. *Constraint* Sakoe-Chiba yang bersifat global tidak mampu mengakomodasi variasi koreksi per segmen ini secara akurat, sehingga optimasi korelasi global justru mengorbankan konsistensi posisi marker. Panel (c) menunjukkan *warping path* dengan deviasi yang tidak seragam di seluruh rentang TWT dengan variasi lokal yang besar terutama pada zona Johnson Fm ke bawah.

4.3.2.3 Dynamic Time Warping Constrains Marker Anchored

Hasil DTW *Marker Anchored* Torosa-2 disajikan pada Gambar 4.21.

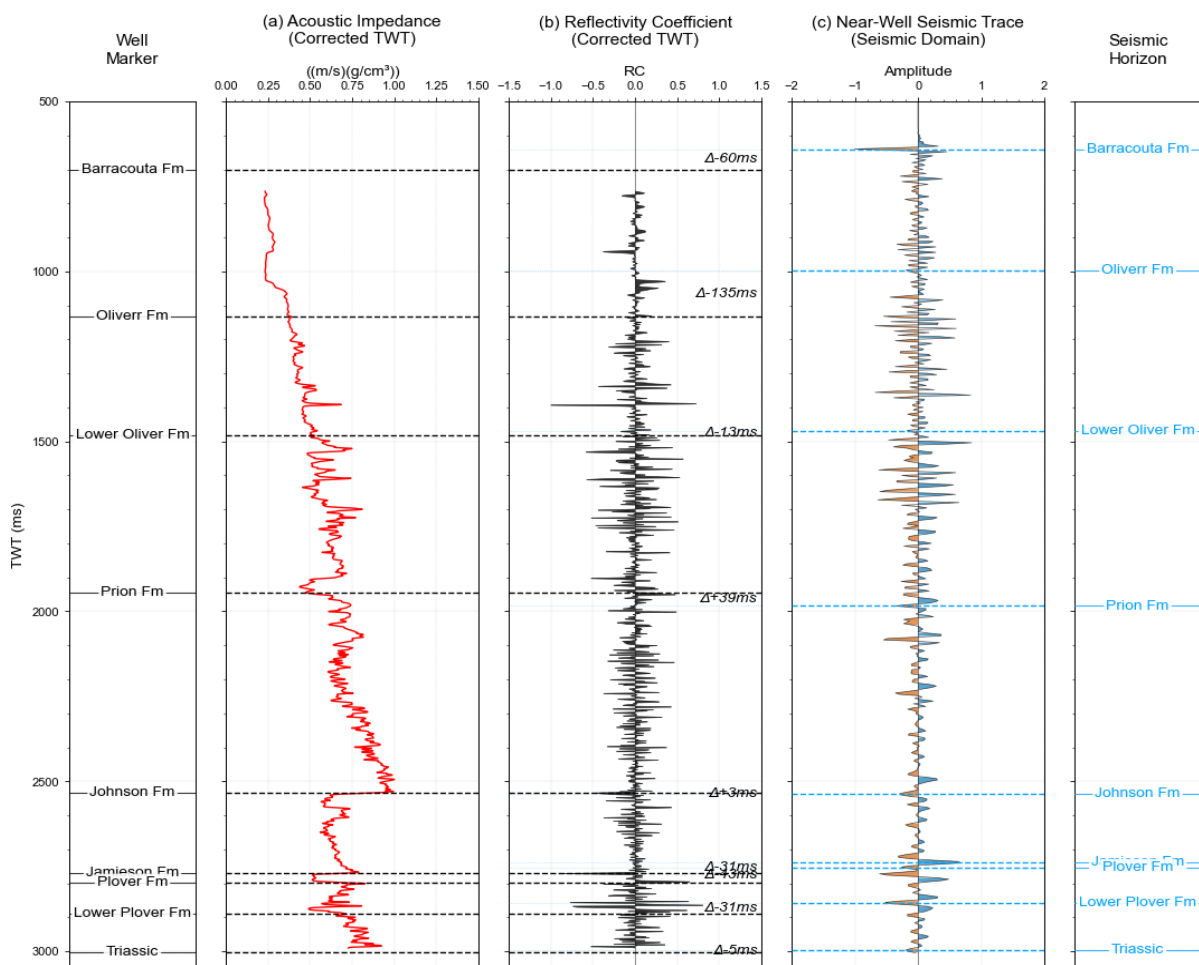


Gambar 4.21 Hasil DTW *Marker Anchored* Torosa-2: (a) perbandingan *warped synthetic* terhadap *real seismic trace*, (b) kurva TDC sebelum dan sesudah koreksi, dan (c) *warping path* beserta *shift curve*.

Berdasarkan Gambar 4.21, korelasi meningkat dari $r = 0,0167$ menjadi $r = 0,584$ dengan $tops\ error = 0$. Dibandingkan *Fixed Band*, korelasi *Marker Anchored* sedikit lebih tinggi (+0,008) dengan $tops\ error$ yang turun dari 7 menjadi 0, mencerminkan seberapa besar kontribusi jaminan titik jangkar pada sumur dengan variasi koreksi waktu antar formasi yang tinggi. Panel (b) menunjukkan kurva TDC yang lebih mulus dengan seluruh marker dari Formasi Barracouta hingga Triassic terposisi tepat, konsisten dengan kondisi batas matematis Persamaan (3.30) dan (3.31). Panel (c) memperlihatkan *warping path* yang terbagi menjadi segmen-segmen antar marker dengan koreksi lokal yang bervariasi sesuai karakteristik masing-masing interval formasi.

4.3.3 Torosa-3

Kondisi awal sumur Torosa-3 sebelum penerapan *well-seismic tie* disajikan pada Gambar 4.22.



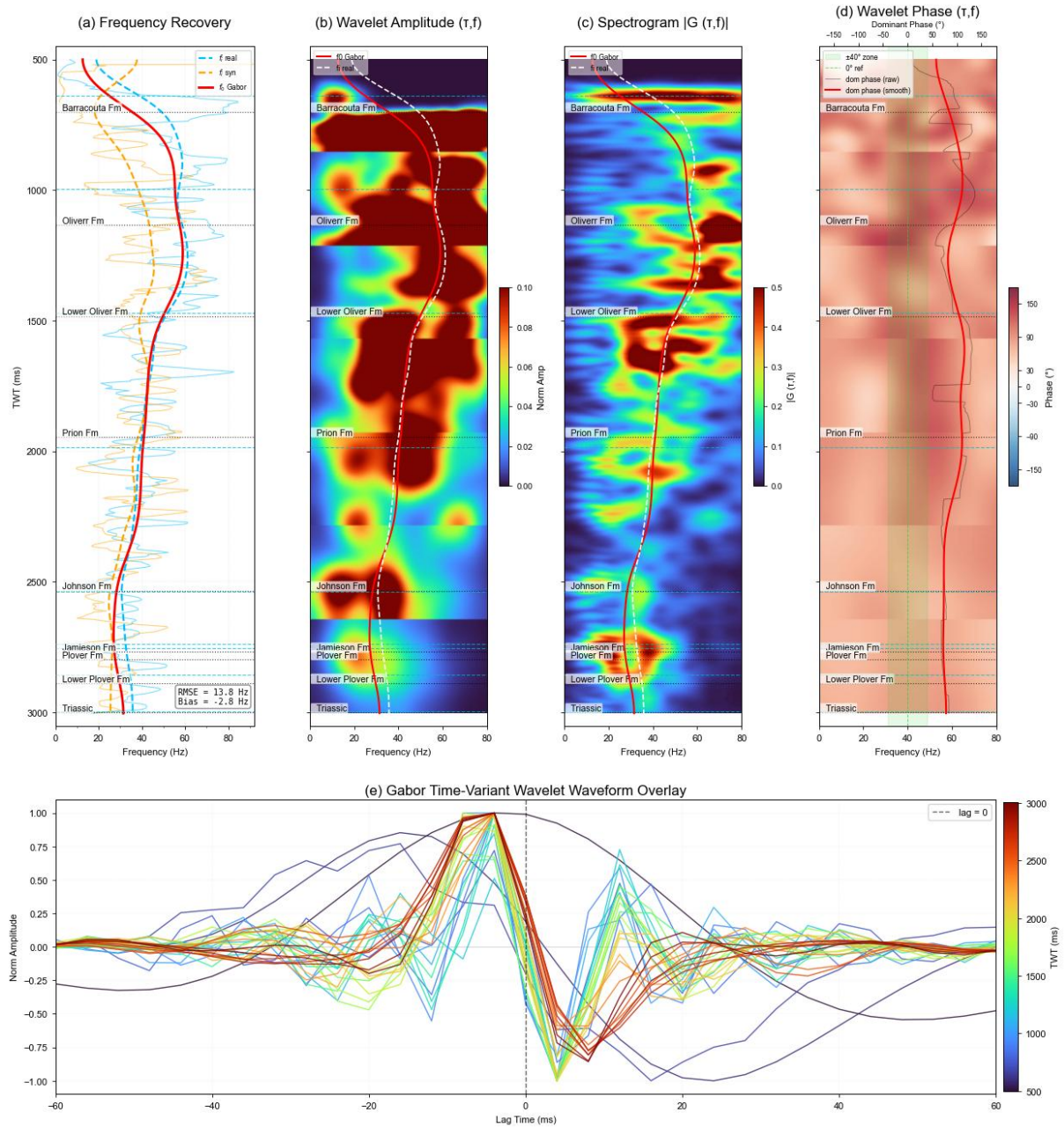
Gambar 4.22 Kondisi awal *pre-tie* sumur Torosa-3: (a) *Acoustic Impedance* (Corrected TWT), (b) *Reflectivity Coefficient* (Corrected TWT), dan (c) *Near-Well Seismic Trace* (Seismic Domain).

Berdasarkan Gambar 4.22, perbedaan posisi marker antara domain sumur dan seismik terlihat jelas dengan arah deviasi yang sangat bervariasi antar formasi. Deviasi terbesar teramati pada Oliverr Fm ($\Delta-135\text{ ms}$) dan Prion Fm ($\Delta+139\text{ ms}$) yang berlawanan tanda, mengindikasikan akumulasi kesalahan kurva waktu-kedalaman yang kompleks. Formasi

dangkal seperti Barracouta Fm (Δ -60 ms) dan Oliverr Fm (Δ -135 ms) menunjukkan deviasi negatif yang besar, sementara Prion Fm berbalik arah secara signifikan, mencerminkan ketidakakuratan kurva waktu-kedalaman yang bervariasi per segmen stratigrafi. Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor yang diterapkan pada *trace* seismik nyata Torosa-3 disajikan pada Gambar 4.23.

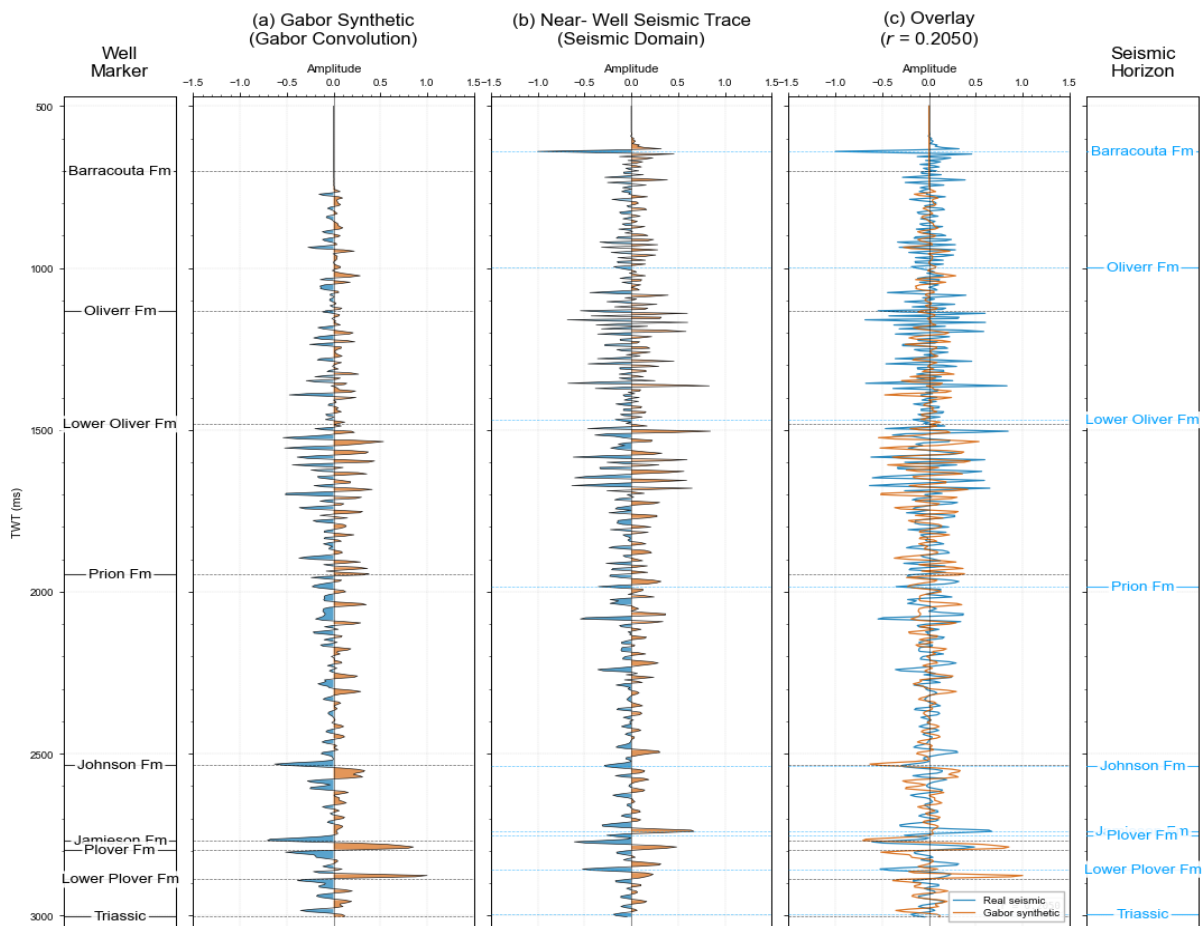
4.3.3.1 Gabor Synthetic Generation

Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor yang diterapkan pada *trace* seismik nyata Torosa-3 disajikan pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor Torosa-3: (a) *Frequency Recovery*, (b) *Wavelet Amplitude (τ, f)*, (c) *Spectrogram |G(τ, f)|*, (d) *Wavelet Phase (τ, f)*, dan (e) *Gabor Time-Variant Wavelet Waveform Overlay*.

Berdasarkan Gambar 4.23, estimasi wavelet *time-variant* hasil Dekonvolusi Gabor pada *trace* seismik sekitar sumur Torosa-3 menunjukkan pola yang konsisten dengan sumur-sumur sebelumnya. Panel (a) menunjukkan kurva frekuensi dominan terestimasi yang mengikuti tren penurunan frekuensi *instantaneous* seismik dari zona dangkal hingga zona dalam dengan RMSE sebesar 4,9 Hz dan *bias* sebesar -2,5 Hz. Nilai RMSE yang sebanding dengan NSR-1 dan Torosa-2 mengindikasikan kompleksitas spektral yang serupa pada sumur ini, dengan *bias* negatif yang mencerminkan kecenderungan estimasi frekuensi dominan yang sedikit lebih rendah dari nilai referensi. Panel (b) dan (c) mengkonfirmasi perpindahan energi spektral ke frekuensi lebih rendah seiring bertambahnya TWT, konsisten dengan karakteristik atenuasi Q Lapangan Torosa. Panel (d) menunjukkan *residual phase shift* pada zona dalam yang konsisten dengan pola yang teramati pada sumur-sumur sebelumnya. Panel (e) menunjukkan kumpulan wavelet terestimasi dalam domain waktu dengan bentuk yang semakin kompleks dan tersebar pada zona dalam. Kondisi awal seismogram sintesis hasil Dekonvolusi Gabor terhadap *trace* seismik Torosa-3 sebelum koreksi DTW disajikan pada Gambar 4.24.

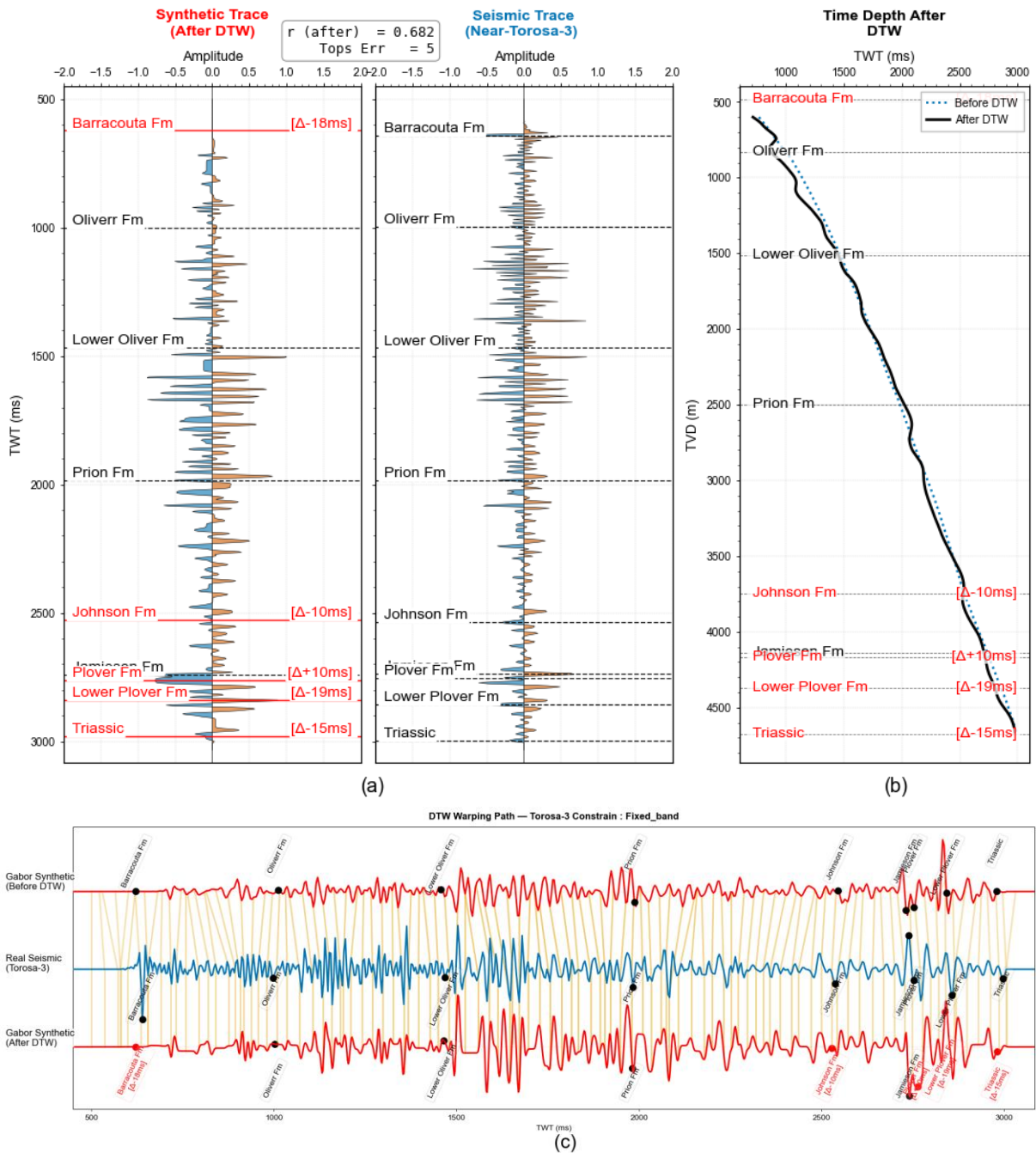


Gambar 4.24 Kondisi awal seismogram sintesis terhadap *trace* seismik Torosa-3: (a) *Gabor Synthetic* (Gabor Convolution), (b) *Near-Well Seismic Trace* (Seismic Domain), dan (c) *Overlay*.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.24, koefisien korelasi awal sebesar $r = 0,205$ mencerminkan ketidakselarasan temporal yang signifikan. Pola amplitudo kedua *trace* secara umum serupa, namun pergeseran temporal yang terakumulasi dari zona dangkal ke dalam membuat keduanya tidak tersinkronisasi dan menjadi motivasi utama penerapan DTW.

4.3.3.2 Dynamic Time Warping Constrain Fixed Band

Hasil DTW *Fixed Band* Torosa-3 disajikan pada Gambar 4.25.



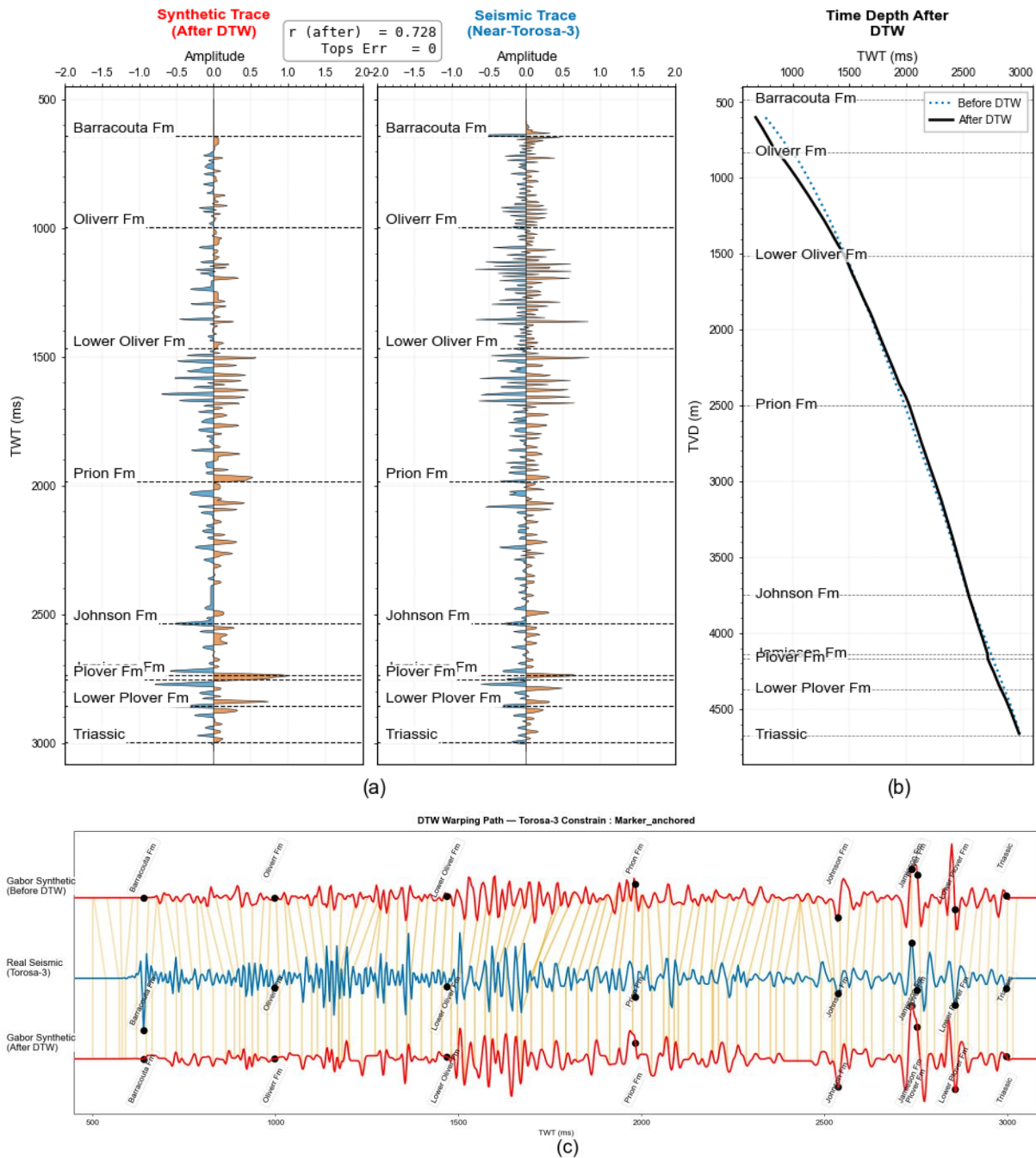
Gambar 4.25 Hasil DTW *Fixed Band* Torosa-3: (a) perbandingan *Synthetic Trace* (After DTW) terhadap *Seismic Trace* (Near-Torosa-3), (b) kurva *Time Depth* sebelum dan sesudah koreksi, dan (c) *warping path*.

Berdasarkan Gambar 4.25, korelasi meningkat dari $r = 0,2050$ menjadi $r = 0,682$. Namun $\text{tops error} = 5$ marker menunjukkan keterbatasan *Fixed Band* dalam mempertahankan konsistensi posisi formasi. Deviasi yang tidak terkoreksi teramati pada Barracouta Fm ($\Delta -18$ ms), Johnson Fm ($\Delta -10$ ms), Plover Fm ($\Delta +10$ ms), Lower Plover Fm ($\Delta -19$ ms), dan Triassic ($\Delta -15$ ms), mengindikasikan bahwa koreksi waktu yang diperlukan bervariasi secara tidak

seragam antar interval stratigrafi. Pola ini konsisten dengan temuan pada Torosa-2, di mana *constraint* global Sakoe-Chiba tidak mampu mengakomodasi variasi koreksi per segmen secara akurat. Panel (c) menunjukkan *warping path* dengan deviasi yang lebih besar pada zona Johnson Fm ke bawah, sejalan dengan *residual* atenuasi Q yang lebih dominan pada interval dalam.

4.3.3.3 Dynamic Time Warping Constrain Marker Anchored

Hasil DTW *Marker Anchored* Torosa-3 disajikan pada Gambar 4.26.

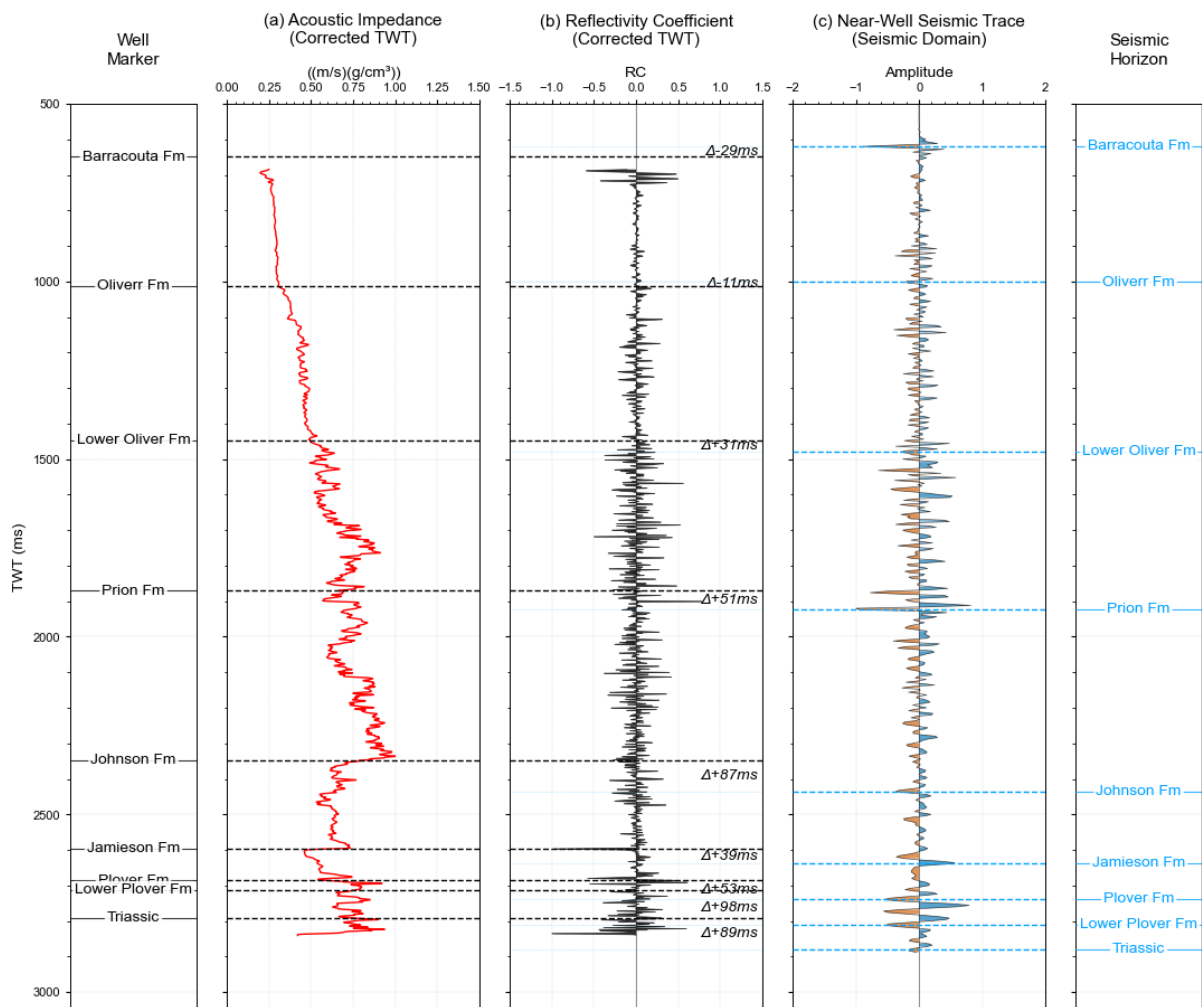


Gambar 4.26 Hasil DTW *Marker Anchored* Torosa-3: (a) perbandingan *Synthetic Trace* (After DTW) terhadap *Seismic Trace* (Near-Torosa-3), (b) kurva *Time Depth* sebelum dan sesudah koreksi, dan (c) *warping path*.

Berdasarkan Gambar 4.26, korelasi meningkat dari $r = 0,2050$ menjadi $r = 0,728$ dengan $tops\ error = 0$. Dibandingkan *Fixed Band*, korelasi *Marker Anchored* lebih tinggi sebesar $+0,046$ dengan $tops\ error = 0$ pada seluruh marker dari Barracouta Fm hingga Triassic. Perbedaan korelasi yang lebih besar ini mengindikasikan bahwa pada Torosa-3, titik jangkar meningkatkan konsistensi geologis sekaligus meningkatkan kualitas penyelarasan amplitudo, karena koreksi waktu yang tepat per segmen memungkinkan DTW menemukan jalur yang lebih optimal secara lokal. Panel (b) menunjukkan kurva TDC yang mulus dengan seluruh marker terposisi tepat, mengkonfirmasi besaran koreksi yang terakumulasi dari zona dangkal hingga dalam. Panel (c) memperlihatkan *warping path* yang terstruktur per segmen antar marker dengan variasi koreksi lokal yang sesuai karakteristik masing-masing interval formasi.

4.3.4 Torosa-4

Kondisi awal sumur Torosa-4 sebelum penerapan *well-seismic tie* disajikan pada Gambar 4.27.



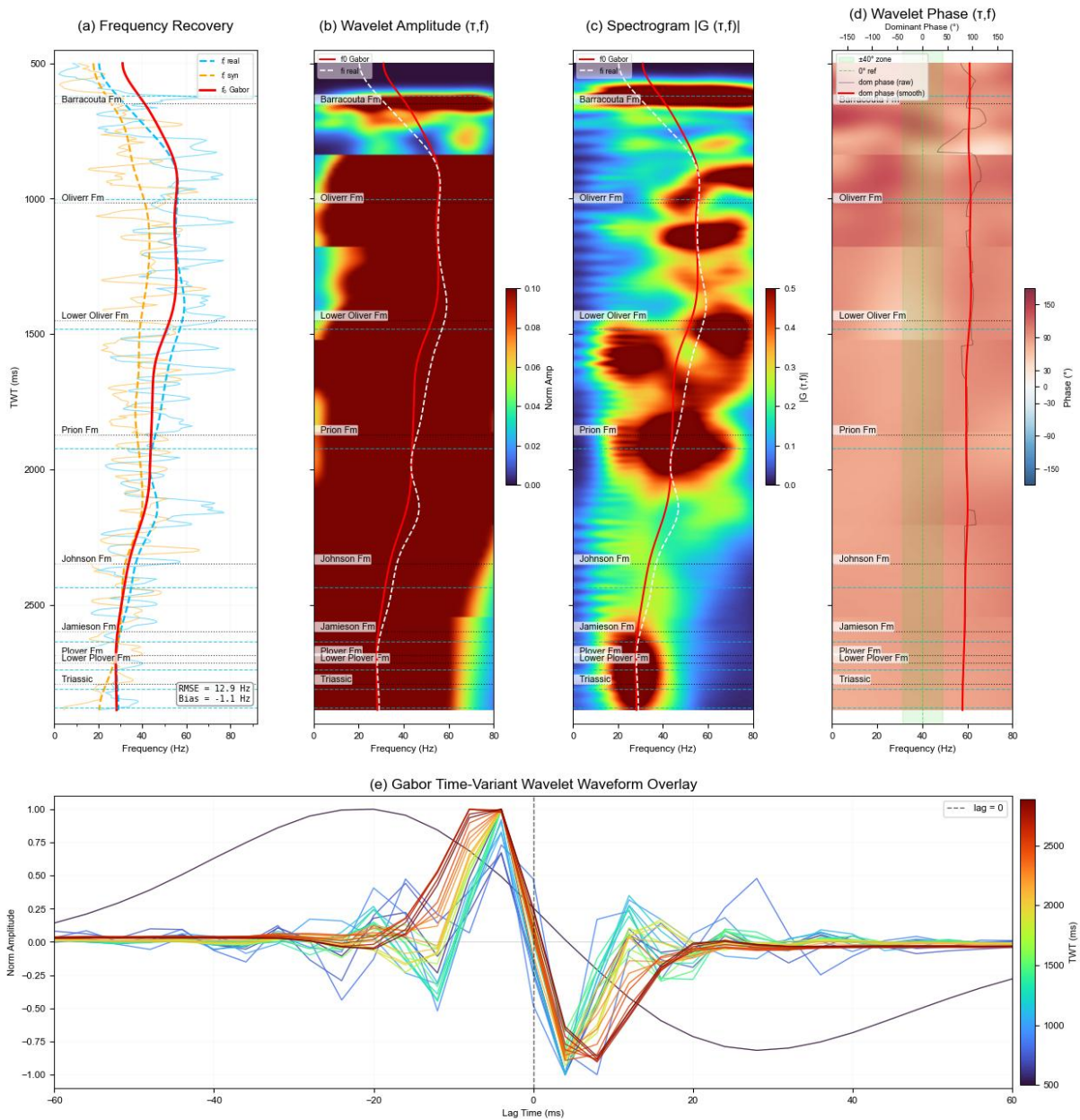
Gambar 4.27 Kondisi awal *pre-tie* sumur Torosa-4: (a) *Acoustic Impedance* (Corrected TWT), (b) *Reflectivity Coefficient* (Corrected TWT), dan (c) *Near-Well Seismic Trace* (Seismic Domain).

Berdasarkan Gambar 4.27, Torosa-4 tidak memiliki data VSP sehingga *checkshot correction* dilakukan menggunakan *pseudo-checkshot* yang diestimasi dari interpolasi data VSP

sumur terdekat sebagaimana pada Persamaan (3.36). Perbedaan posisi marker antara domain sumur dan seismik terlihat pada seluruh interval dengan deviasi yang searah dan semakin besar ke zona dalam, yaitu dari Barracouta Fm (Δ -29 ms) hingga Triassic (Δ +89 ms). Pendekatan *pseudo-checkshot* menambahkan unsur ketidakpastian tambahan pada kurva waktu-kedalaman awal karena nilai kecepatan interval yang digunakan tidak diukur langsung pada lokasi sumur melainkan diasumsikan konsisten dengan sumur referensi. Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor yang diterapkan pada *trace* seismik nyata Torosa-4 disajikan pada Gambar 4.28.

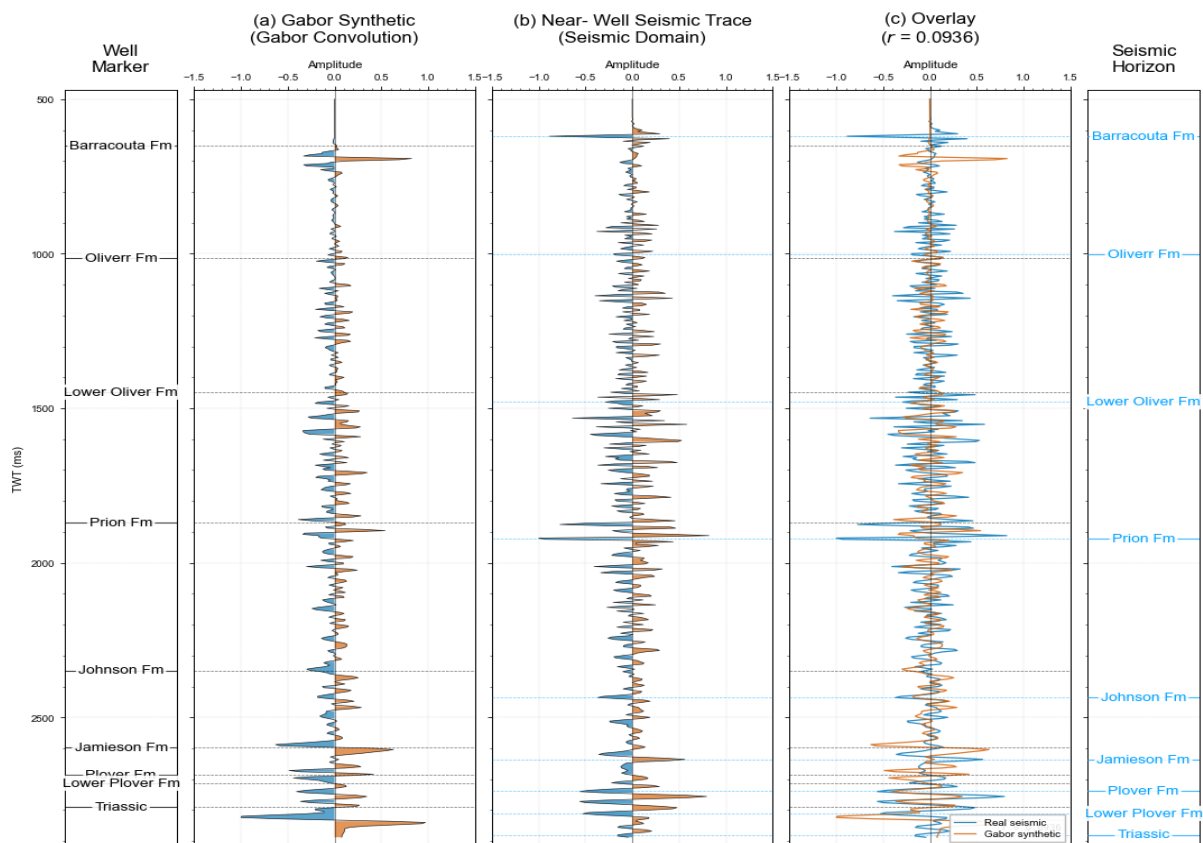
4.3.4.1 Gabor Synthetic Generation

Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor yang diterapkan pada *trace* seismik nyata Torosa-4 disajikan pada Gambar 4.28



Gambar 4.28 Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor Torosa-4: (a) *Frequency Recovery*, (b) *Wavelet Amplitude (τ, f)*, (c) *Spectrogram $|G(\tau, f)|$* , (d) *Wavelet Phase (τ, f)*, dan (e) *Gabor Time-Variant Wavelet Waveform Overlay*.

Berdasarkan Gambar 4.28, estimasi wavelet *time-variant* hasil Dekonvolusi Gabor pada *trace* seismik sekitar sumur Torosa-4 menunjukkan pola yang konsisten dengan sumur-sumur sebelumnya. Panel (a) menunjukkan kurva frekuensi dominan terestimasi yang mengikuti tren penurunan frekuensi *instantaneous* seismik dari zona dangkal hingga zona dalam dengan RMSE sebesar 6,3 Hz dan *bias* sebesar -0,4 Hz. Nilai *bias* yang paling mendekati nol di antara seluruh sumur lapangan mengindikasikan estimasi frekuensi yang paling tidak bias pada Torosa-4, meskipun ketidakpastian kurva waktu-kedalaman akibat *pseudo-checkshot* tetap menjadi sumber utama ketidakselarasan. Panel (b) dan (c) memperlihatkan pola distribusi energi spektral yang konsisten dengan karakteristik atenuasi Q Lapangan Torosa. Panel (d) menunjukkan *residual phase shift* pada zona dalam, konsisten dengan pola yang teramati di seluruh sumur sebelumnya. Panel (e) menunjukkan kumpulan wavelet terestimasi dalam domain waktu dengan bentuk yang semakin kompleks pada zona dalam. Kondisi awal seismogram sintesis hasil Dekonvolusi Gabor terhadap *trace* seismik Torosa-4 sebelum koreksi DTW disajikan pada Gambar 4.29.

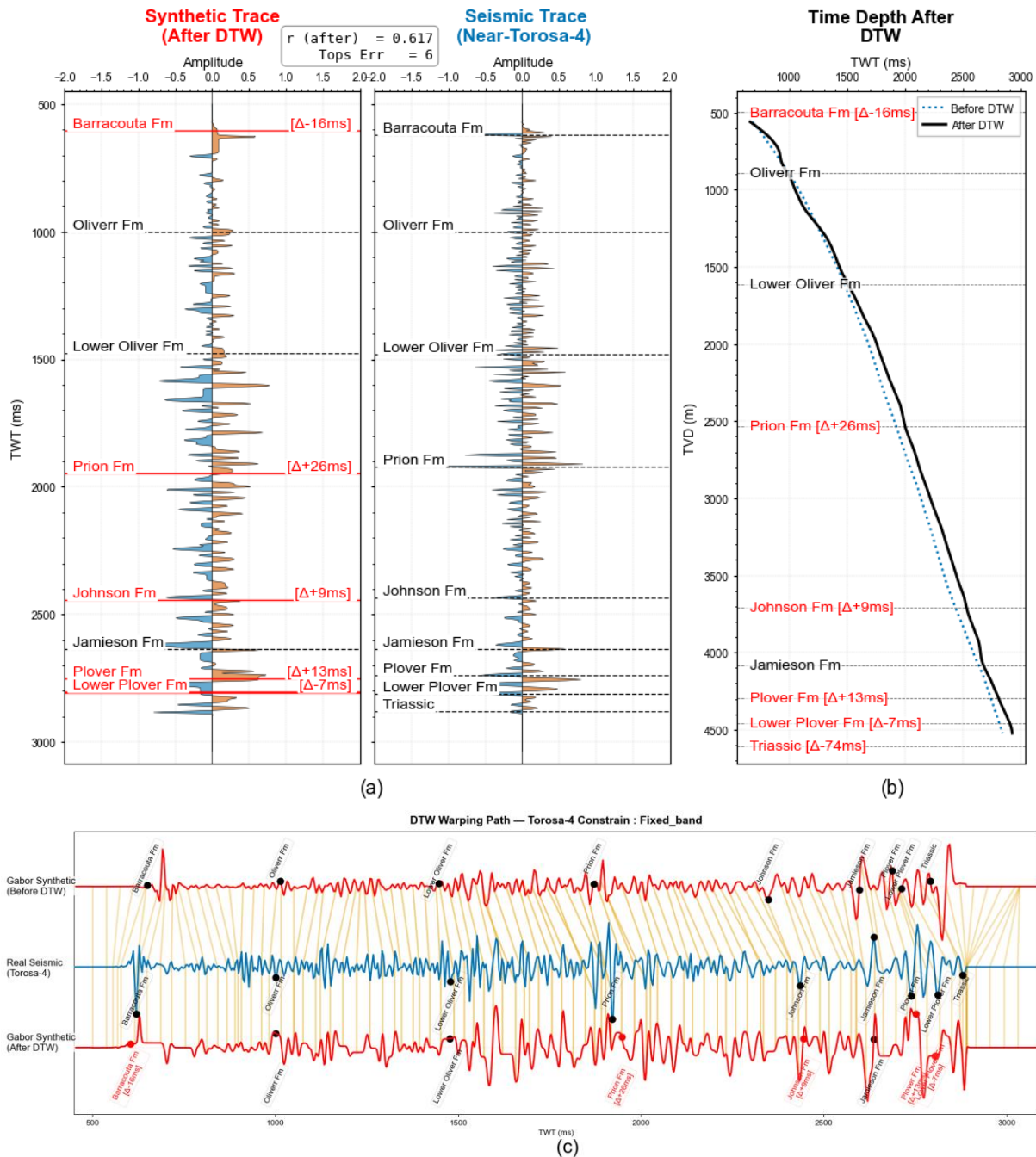


Gambar 4.29 Kondisi awal seismogram sintesis terhadap *trace* seismik Torosa-4: (a) *Gabor Synthetic* (Gabor Convolution), (b) *Near-Well Seismic Trace* (Seismic Domain), dan (c) *Overlay*.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.29, koefisien korelasi awal sebesar $r = 0,2050$ mencerminkan ketidakselarasan temporal yang signifikan. Nilai korelasi awal yang rendah ini konsisten dengan ketidakpastian kurva waktu-kedalaman yang lebih besar akibat penggunaan *pseudo-checkshot*, di mana kesalahan estimasi kecepatan interval terakumulasi secara progresif ke zona dalam dan menghasilkan pergeseran posisi TWT yang semakin besar pada formasi-formasi yang lebih dalam.

Dynamic Time Warping Fixed Band

Hasil DTW *Fixed Band* Torosa-4 disajikan pada Gambar 4.30.



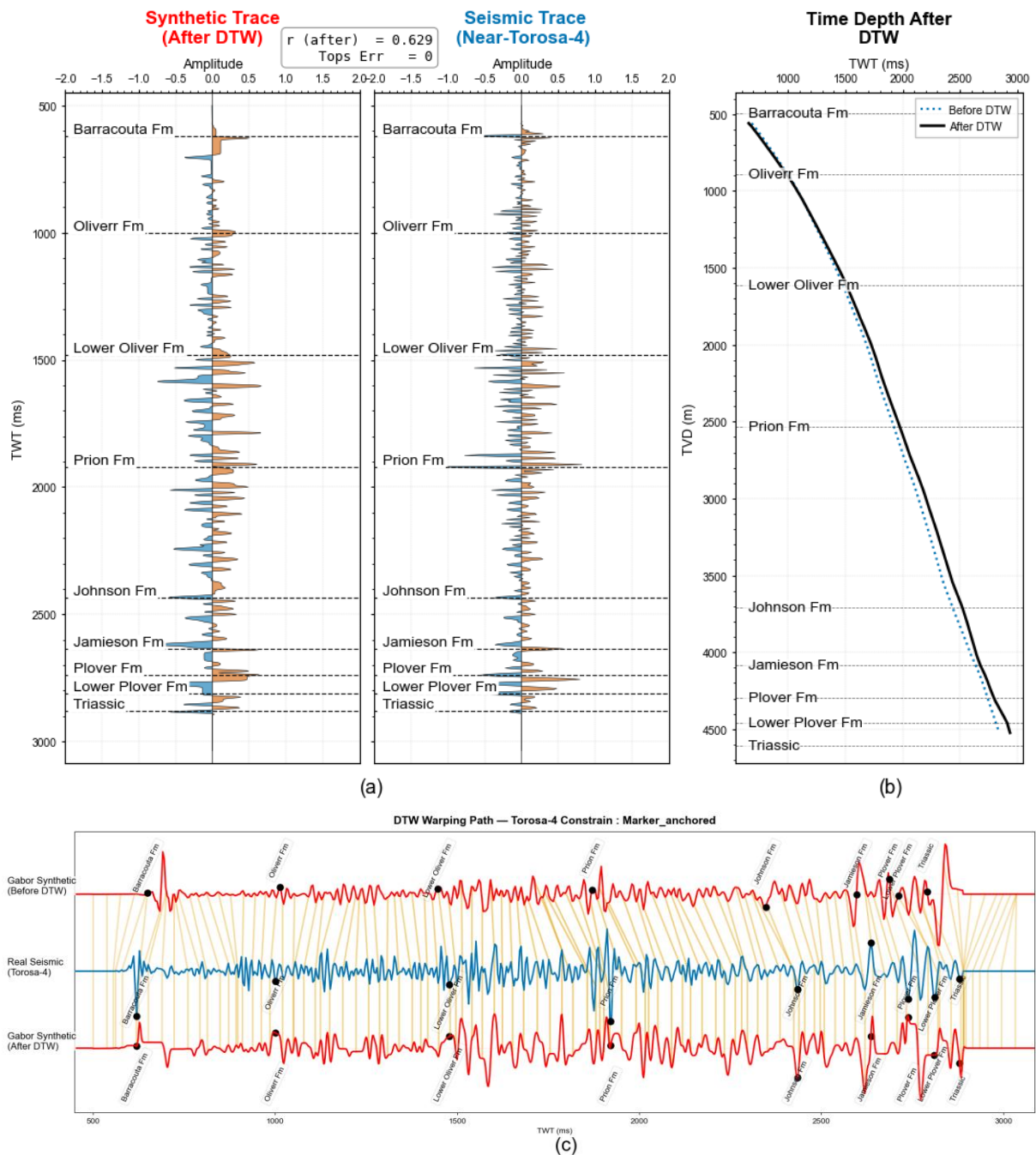
Gambar 4.30 Hasil DTW *Fixed Band* Torosa-4: (a) perbandingan *Synthetic Trace* (After DTW) terhadap *Seismic Trace* (Near-Torosa-4), (b) kurva *Time Depth* sebelum dan sesudah koreksi, dan (c) *warping path*.

Berdasarkan Gambar 4.30, korelasi meningkat dari $r = 0,2050$ menjadi $r = 0,617$. *Tops error* = 6 marker dengan deviasi yang bervariasi signifikan antar interval, yaitu Barracouta Fm ($\Delta-16$ ms), Prion Fm ($\Delta+26$ ms), Johnson Fm ($\Delta+9$ ms), Plover Fm ($\Delta+13$ ms), Lower Plover Fm ($\Delta-7$ ms), dan Triassic ($\Delta-74$ ms). Deviasi Triassic sebesar -74 ms merupakan yang terbesar di antara seluruh sumur yang diuji, yang dapat dikaitkan langsung dengan akumulasi kesalahan

kurva waktu-kedalaman berbasis *pseudo-checkshot* yang semakin besar ke zona dalam. Tanda deviasi yang tidak konsisten mengindikasikan bahwa kesalahan kurva waktu-kedalaman pada Torosa-4 bersifat bervariasi per interval, sehingga *constraint* global Sakoe-Chiba kesulitan mengakomodasi koreksi yang bervariasi arah dan besarnya secara bersamaan dalam satu *band* tunggal.

4.3.4.2 Dynamic Time Warping Marker Anchored

Hasil DTW *Marker Anchored* Torosa-4 disajikan pada Gambar 4.31.

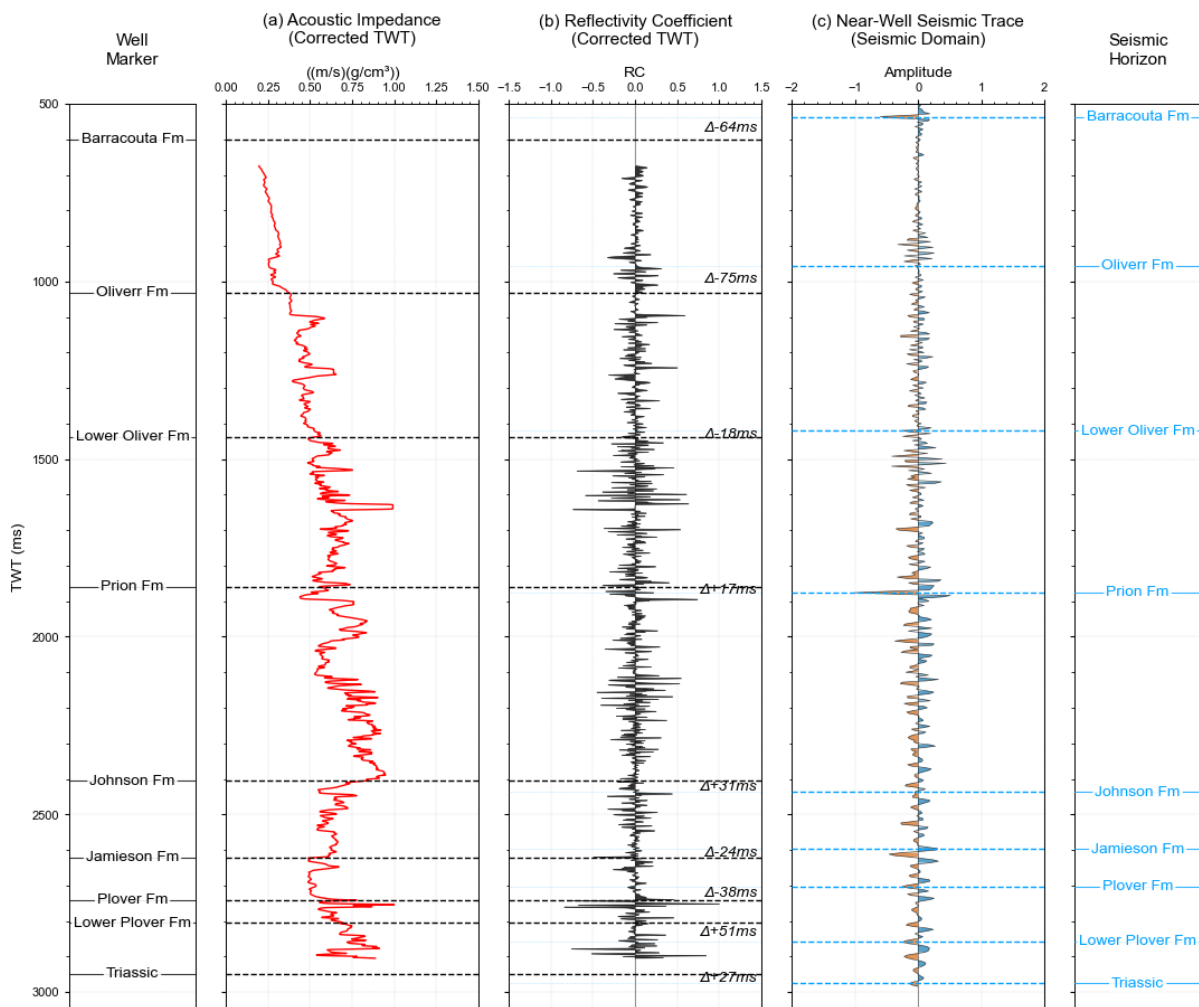


Gambar 4.31 Hasil DTW *Marker Anchored* Torosa-4: (a) perbandingan *Synthetic Trace* (After DTW) terhadap *Seismic Trace* (Near-Torosa-4), (b) kurva *Time Depth* sebelum dan sesudah koreksi, dan (c) *warping path*.

Berdasarkan Gambar 4.31, korelasi meningkat dari $r = 0,094$ menjadi $r = 0,628$ dengan *tops error* = 0. Keunggulan *Marker Anchored* pada Torosa-4 justru paling terlihat bukan dari selisih korelasi (+0,011 dibanding *Fixed Band*), melainkan dari kemampuannya mengoreksi deviasi Triassic sebesar -74 ms yang sama sekali tidak dapat diakomodasi oleh *Fixed Band*. Dengan memaksa jalur penyalarsan melewati titik jangkar marker secara eksak per segmen pada Persamaan (3.30), koreksi waktu yang diperlukan per interval yang bervariasi arah dan besarnya akibat *pseudo-checkshot* dapat diakomodasi secara independen tanpa mengorbankan konsistensi formasi lain. Panel (b) menunjukkan kurva TDC yang jauh lebih representatif secara geologis, dengan seluruh marker dari Barracouta Fm hingga Triassic terposisi tepat meskipun besaran koreksi antar interval sangat bervariasi.

4.3.5 Torosa-5

Kondisi awal sumur Torosa-5 sebelum penerapan *well-seismic tie* disajikan pada Gambar 4.32.

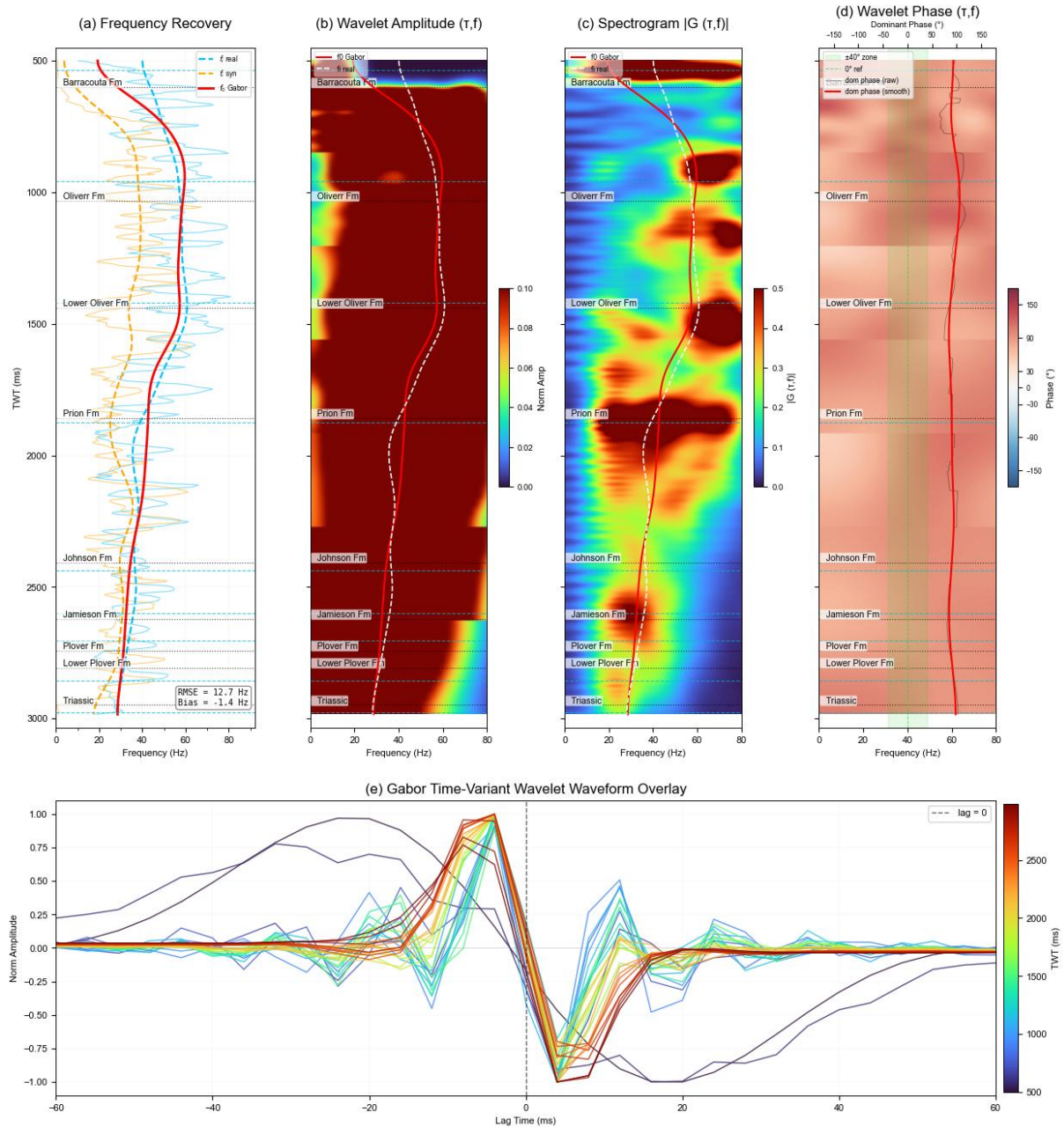


Gambar 4.32 Kondisi awal *pre-tie* sumur Torosa-5: (a) *Acoustic Impedance* (Corrected TWT), (b) *Reflectivity Coefficient* (Corrected TWT), dan (c) *Near-Well Seismic Trace* (Seismic Domain).

Berdasarkan Gambar 4.32, perbedaan posisi marker antara domain sumur dan seismik terlihat sejak zona dangkal yaitu sekitar 64 ms pada Barracouta Fm dan tetap signifikan hingga

zona dalam dengan selisih 77 ms pada Triassic, mengindikasikan akumulasi kesalahan kurva waktu-kedalaman yang relatif merata di seluruh kolom stratigrafi. Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor yang diterapkan pada *trace* seismik nyata Torosa-5 disajikan pada Gambar 4.33.

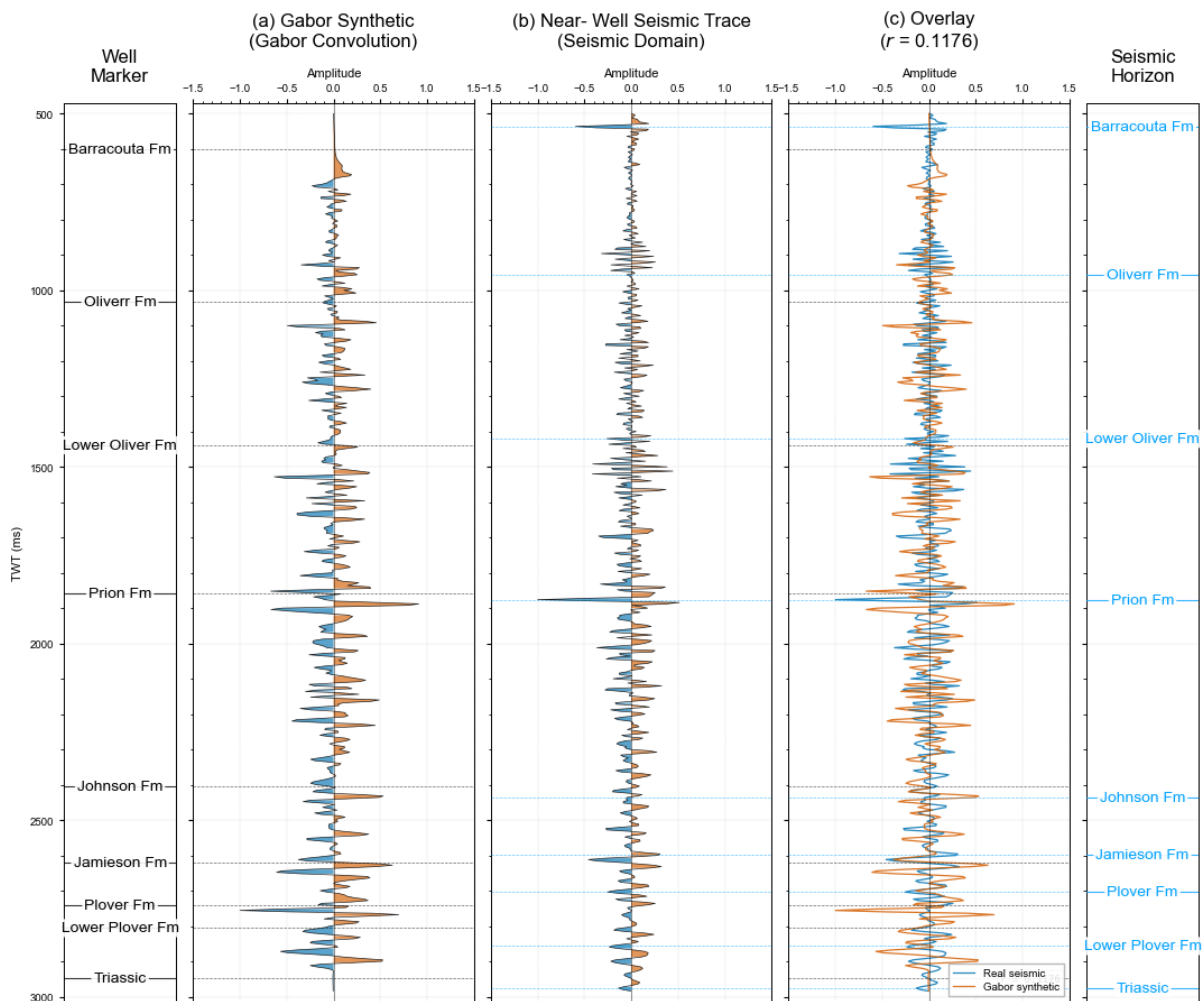
4.3.5.1 Gabor Synthetic Generation



Gambar 4.33 Hasil estimasi wavelet Dekonvolusi Gabor Torosa-5: (a) *Frequency Recovery*, (b) *Wavelet Amplitude (τ, f)*, (c) *Spectrogram $|G(\tau, f)|$* , (d) *Wavelet Phase (τ, f)*, dan (e) *Gabor Time-Variant Wavelet Waveform Overlay*.

Berdasarkan Gambar 4.33, estimasi wavelet *time-variant* hasil Dekonvolusi Gabor pada *trace* seismik sekitar sumur Torosa-5 menunjukkan pola yang konsisten dengan sumur-sumur sebelumnya, namun dengan variasi amplitudo antar interval yang lebih besar, mencerminkan heterogenitas litologi yang lebih kompleks pada Torosa-5. Panel (a) menunjukkan kurva

frekuensi dominan terestimasi yang mengikuti tren penurunan frekuensi *instantaneous* seismik dari zona dangkal hingga zona dalam dengan RMSE sebesar 6,7 Hz dan *bias* sebesar -1,4 Hz. Panel (b) dan (c) memperlihatkan distribusi energi spektral yang lebih tersebar dibandingkan sumur-sumur sebelumnya, dengan pola konsentrasi energi yang bervariasi antar interval formasi. Panel (d) menunjukkan *residual phase shift* pada zona dalam, konsisten dengan pola yang teramati di seluruh sumur Lapangan Torosa. Panel (e) menunjukkan kumpulan wavelet terestimasi dalam domain waktu dengan variasi bentuk yang lebih besar antar interval dibandingkan sumur-sumur sebelumnya. Kondisi awal seismogram sintetis hasil Dekonvolusi Gabor terhadap *trace* seismik Torosa-5 sebelum koreksi DTW disajikan pada Gambar 4.34.

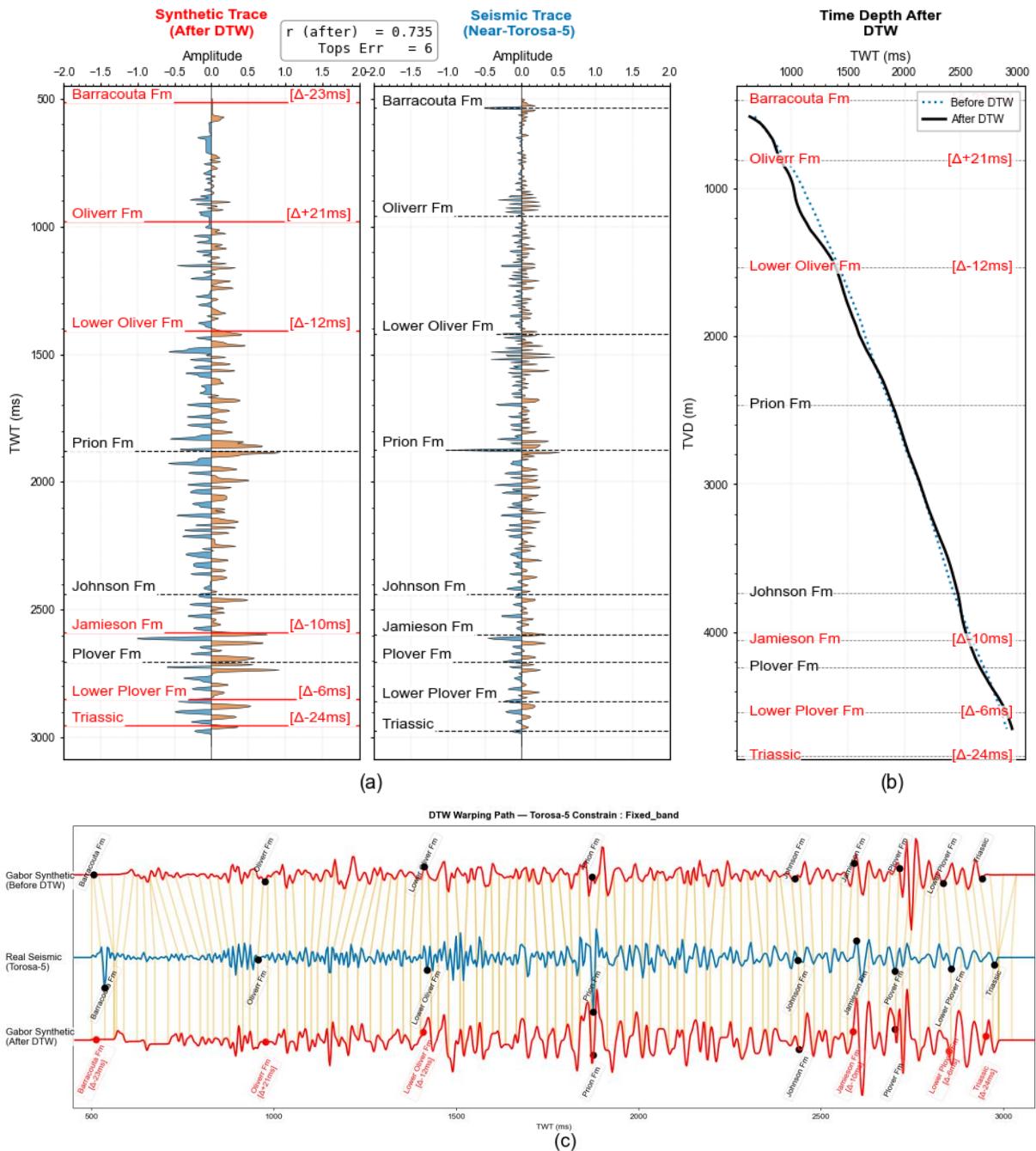


Gambar 4.34 Kondisi awal seismogram sintetis terhadap *trace* seismik Torosa-5: (a) *Gabor Synthetic* (Gabor Convolution), (b) *Near-Well Seismic Trace* (Seismic Domain), dan (c) *Overlay*

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.34, koefisien korelasi awal sebesar $r = 0,1176$ mencerminkan ketidakselarasan temporal yang signifikan. Meskipun korelasi awal rendah, panel *overlay* memperlihatkan bahwa pola amplitudo kedua *trace* cukup serupa pada interval Barracouta Fm hingga Lower Oliver Fm, mengindikasikan bahwa kualitas log sumur dan estimasi wavelet Gabor pada Torosa-5 cukup baik meskipun ketidakselarasan utamanya bersumber dari pergeseran posisi waktu yang belum terkoreksi.

4.3.5.2 Dynamic Time Warping Constrain Fixed Band

Hasil DTW *Fixed Band* Torosa-5 disajikan pada Gambar 4.35.



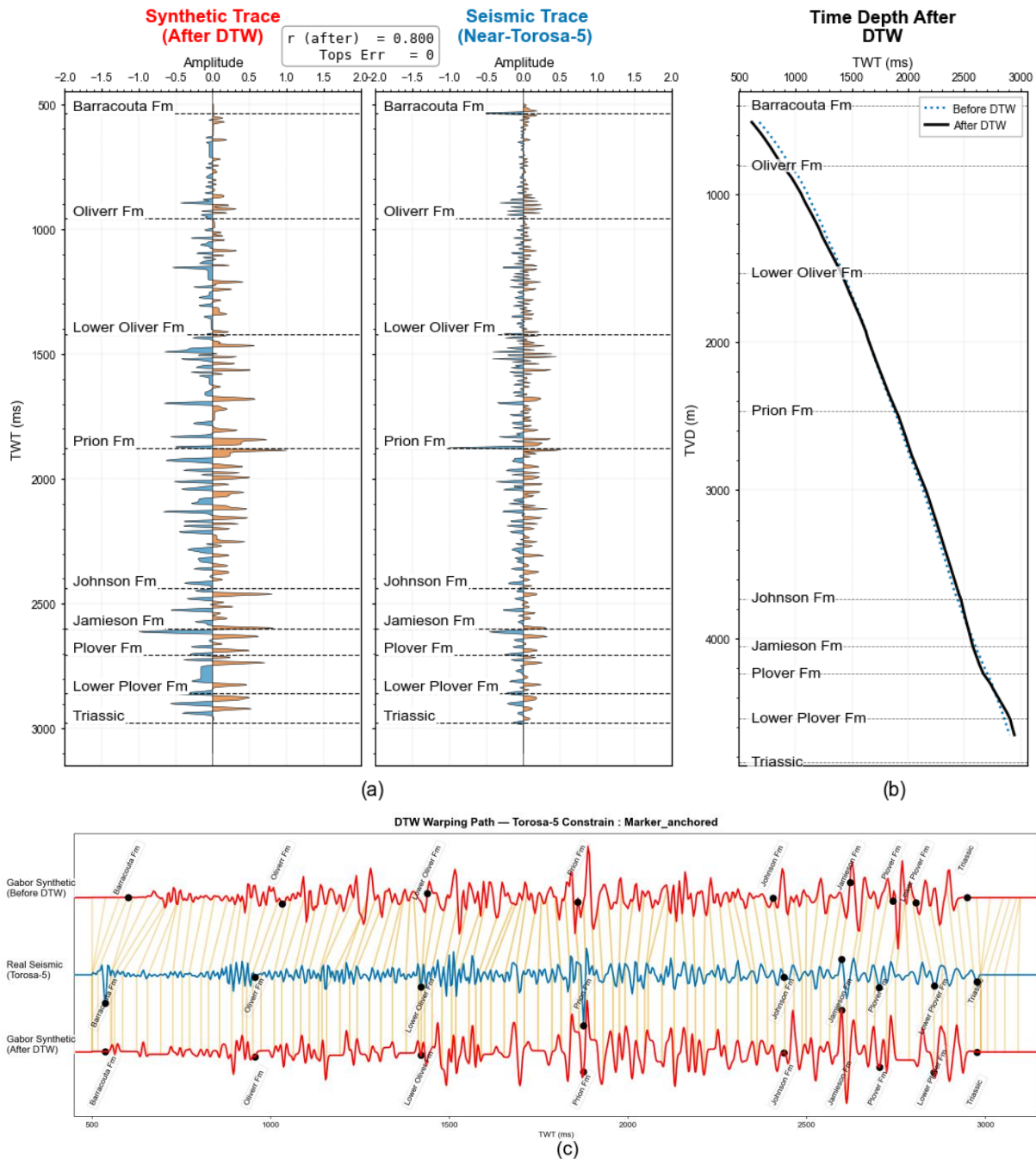
Gambar 4.35 Hasil DTW *Fixed Band* Torosa-5: (a) perbandingan *Synthetic Trace* (After DTW) terhadap *Seismic Trace* (Near-Torosa-5), (b) kurva *Time Depth* sebelum dan sesudah koreksi, dan (c) *warping path*

Berdasarkan Gambar 4.35, korelasi meningkat dari $r = 0,1176$ menjadi $r = 0,735$. Namun $\text{tops error} = 6$ marker menunjukkan keterbatasan yang konsisten dengan sumur-sumur sebelumnya. Deviasi yang tidak terkoreksi teramati pada Barracouta Fm ($\Delta-23\text{ ms}$), Oliverr Fm ($\Delta+21\text{ ms}$), Lower Oliver Fm ($\Delta-12\text{ ms}$), Jamieson Fm ($\Delta-10\text{ ms}$), Lower Plover Fm ($\Delta-6\text{ ms}$), dan Triassic ($\Delta-24\text{ ms}$). Pola deviasi Barracouta Fm ($\Delta-23\text{ ms}$) dan Oliverr Fm ($\Delta+21\text{ ms}$) yang

berlawanan tanda mengindikasikan adanya perubahan arah koreksi waktu yang diperlukan antar interval dangkal, kondisi yang menyulitkan *constraint* global Sakoe-Chiba untuk mengoptimalkan koreksi secara bersamaan sehingga meskipun korelasi global tinggi, posisi marker individual tetap tidak akurat.

4.3.5.3 Dynamic Time Warping Constrain Marker Anchored

Hasil DTW *Marker Anchored* Torosa-5 disajikan pada Gambar 4.36.



Gambar 4.36 Hasil DTW *Marker Anchored* Torosa-5: (a) perbandingan *Synthetic Trace* (After DTW) terhadap *Seismic Trace* (Near-Torosa-5), (b) kurva *Time Depth* sebelum dan sesudah koreksi, dan (c) *warping path*.

Berdasarkan Gambar 4.36, korelasi meningkat dari $r = 0,1176$ menjadi $r = 0,800$ dengan $tops\ error = 0$. Nilai $r = 0,800$ merupakan korelasi *Marker Anchored* tertinggi di antara seluruh sumur lapangan yang diuji, dengan selisih terhadap *Fixed Band* sebesar $+0,065$. Hal ini dapat dikaitkan dengan kualitas log sumur Torosa-5 yang baik dan pola pergeseran waktu yang berlawanan tanda antar interval dangkal, kondisi yang justru menguntungkan *Marker Anchored* karena koreksi per segmen dapat diarahkan secara independen sesuai kebutuhan lokal masing-masing interval tanpa dibatasi oleh satu *band* global yang sama. Panel (b) menunjukkan kurva TDC yang mulus dengan seluruh marker dari Barracouta Fm hingga Triassic terposisi tepat. Panel (c) memperlihatkan *warping path* yang terstruktur rapi per segmen antar marker dengan transisi yang halus di setiap titik jangkar formasi. Ringkasan metrik evaluasi Dekonvolusi Gabor pada seluruh sumur data lapangan disajikan pada Tabel 4.3.

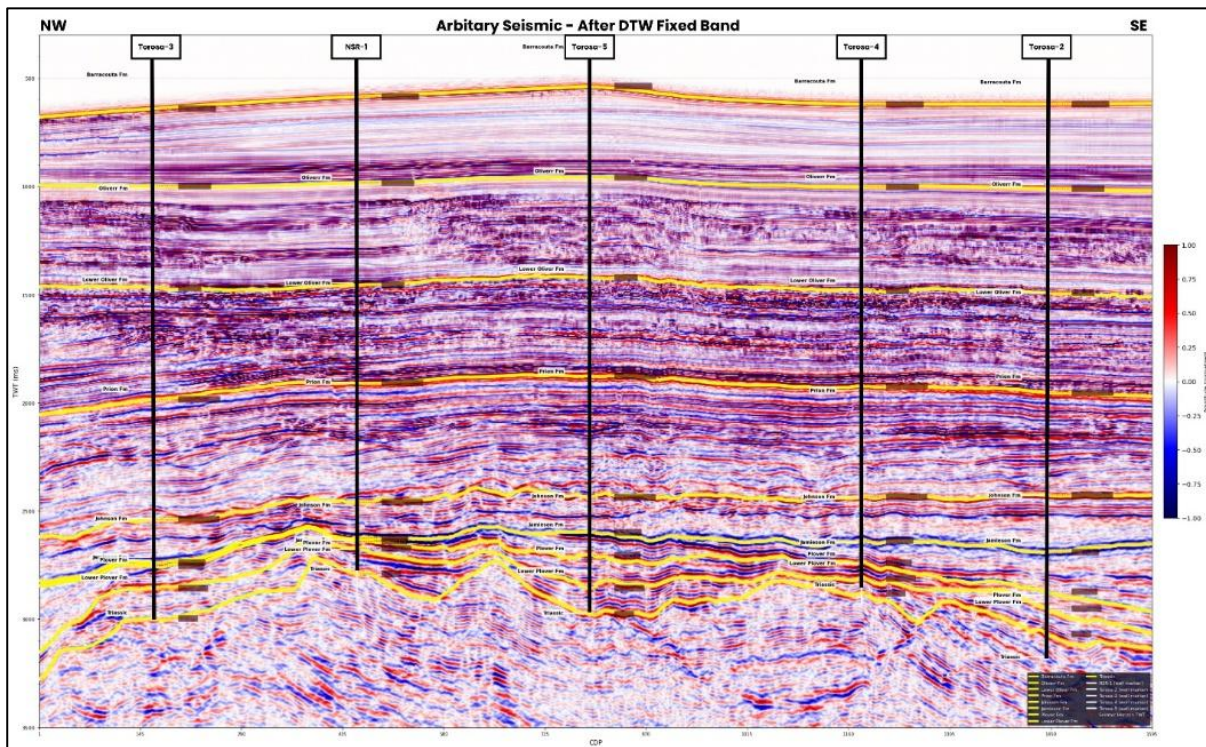
Tabel 4.3 Ringkasan metrik evaluasi Dekonvolusi Gabor pada data lapangan Torosa.

Sumur	RMSE Frekuensi (Hz)	Bias Frekuensi (Hz)	r awal
NSR-1	10	-3,0	-0,222
Torosa-2	6,9	-2,6	0,016
Torosa-3	4,9	-2,5	0,205
Torosa-4	6,3	-0,4	0,094
Torosa-5	6,7	-1,4	0,117

Berdasarkan Tabel 4.3, nilai RMSE frekuensi pada seluruh sumur lapangan berkisar antara 4,36 Hz pada Torosa-3 hingga 10 Hz pada NSR-1. Seluruh sumur menunjukkan *bias* negatif yang mengindikasikan kecenderungan estimasi frekuensi dominan yang lebih rendah dari nilai referensi, berbeda dengan data sintetis yang menunjukkan *bias* positif. Hal ini konsisten dengan kompleksitas heterogenitas litologi dan variasi Q antar formasi pada data lapangan nyata yang tidak dapat sepenuhnya direpresentasikan oleh model eksponensial pada Persamaan (3.3). Torosa-4 menunjukkan nilai *bias* yang paling mendekati nol (-0,43 Hz), sementara NSR-1 menunjukkan RMSE tertinggi (9,99 Hz) yang dapat dikaitkan dengan variasi spektral yang lebih kompleks pada interval *overburden* Tersier sumur tersebut.

4.3.6 Analisis Penampang Seismik 2D Hasil *Dynamic Time Warping*

Perbandingan penampang seismik 2D hasil DTW *Fixed Band* dan *Marker Anchored* pada seluruh sumur Lapangan Torosa disajikan pada Gambar 4.37 dan Gambar 4.38.



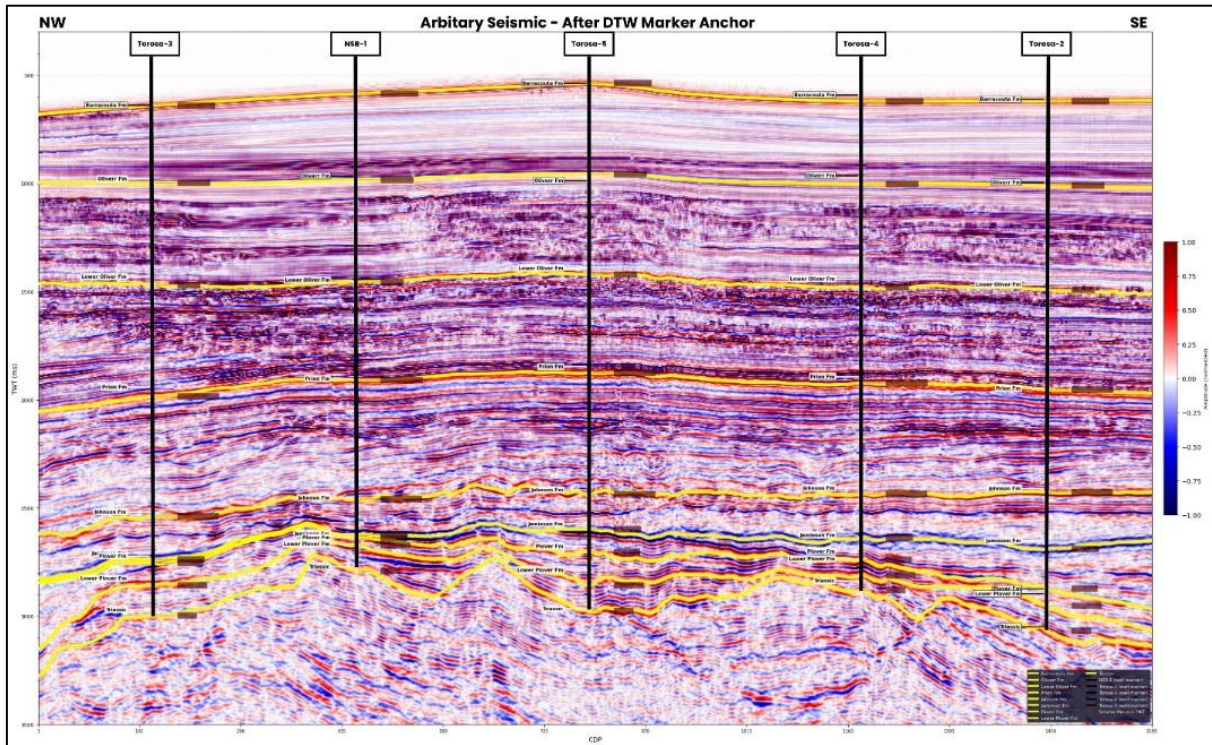
Gambar 4.37 Seismik 2D setelah *Dynamic Time Warping Constrain Fixed Band*.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.37, inkonsistensi posisi marker pada hasil DTW *Fixed Band* paling besar terjadi pada zona dangkal. Pada interval Barracouta Fm hingga Oliver Fm, deviasi marker antar sumur bervariasi cukup besar, di mana Barracouta Fm meleset antara -14 ms pada Torosa-2 hingga -23 ms pada Torosa-5, sementara Oliver Fm pada Torosa-5 menunjukkan deviasi +21 ms yang berlawanan tanda dengan sumur di sekitarnya. Kondisi ini menyebabkan marker zona dangkal tidak berada pada reflektor yang sama secara lateral. Pada zona reservoir, interval Plover Fm hingga Triassic juga menunjukkan ketidakkonsistenan yang nyata, di mana Torosa-4 menunjukkan deviasi Triassic sebesar -74 ms, sementara Torosa-2 sebesar -59 ms, dan Prion Fm Torosa-4 berdeviasi +26 ms ke arah yang berlawanan. Kombinasi deviasi yang bervariasi arah dan besarnya ini membuat kontinuitas reflektor zona reservoir tidak dapat dipertahankan secara konsisten di seluruh sumur pada satu penampang 2D. Ringkasan hasil DTW *Fixed Band* pada seluruh sumur lapangan disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Ringkasan hasil DTW *Constrain Fixed Band* pada data lapangan Torosa.

Parameter	Sumur				
	NSR-1	Torosa-2	Torosa-3	Torosa-4	Torosa-5
Korelasi sebelum DTW	-0,222	0,016	0,205	0,094	0,117
Korelasi <i>Fix band</i>	0,589	0,576	0,682	0,617	0,735
<i>Tops Error</i>	4	7	5	6	6

Berdasarkan Tabel 4.4, pendekatan *Fixed Band* menghasilkan peningkatan korelasi yang substansial pada seluruh sumur, dengan korelasi akhir berkisar antara $r = 0,576$ pada Torosa-2 hingga $r = 0,735$ pada Torosa-5. Meskipun demikian, *tops error* yang dihasilkan konsisten tinggi pada seluruh sumur, berkisar antara 4 marker pada NSR-1 hingga 7 marker pada Torosa-2, mengindikasikan bahwa optimasi korelasi global oleh *constraint* Sakoe-Chiba yang seragam secara sistematis mengorbankan konsistensi posisi marker formasi. Keterbatasan ini paling nyata pada sumur dengan variasi koreksi waktu antar formasi yang tinggi seperti Torosa-2 dan Torosa-4, di mana perbedaan besaran dan arah deviasi antar interval tidak dapat diakomodasi dalam satu *band* global tunggal.



Gambar 4.38 Seismik 2D setelah *Dynamic Time Warping Constraint Marker Anchored*.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.38, perbaikan yang langsung terlihat terjadi pada seluruh interval stratigrafi. Seluruh marker dari Barracouta Fm hingga Triassic pada kelima sumur kini jatuh pada reflektor yang sama secara lateral, konsisten dengan *tops error* = 0 yang dicapai di seluruh sumur sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.5. Reflektor Plover Fm terlihat menerus dari Torosa-2 hingga Torosa-5 tanpa putus, dan interval Triassic yang sebelumnya paling bermasalah kini menunjukkan konsistensi yang baik di seluruh sumur. Torosa-4 menjadi kasus yang paling mencolok, di mana meskipun tanpa VSP dan bergantung pada *pseudo-checkshot*, kesalahan kurva waktu-kedalaman yang bervariasi arah antar interval dapat ditangani secara efektif oleh pendekatan *Marker Anchored*. Pada penampang *Marker Anchored*, posisi Torosa-4 konsisten dengan keempat sumur lain di seluruh interval, mengkonfirmasi bahwa koreksi per segmen berbasis titik jangkar geologis lebih tangguh menghadapi ketidakpastian kurva waktu-kedalaman yang kompleks.

Tabel 4.5 Ringkasan hasil DTW *Constrain Marker Anchored* pada data lapangan Torosa.

Parameter	Sumur				
	NSR-1	Torosa-2	Torosa-3	Torosa-4	Torosa-5
Korelasi sebelum DTW	-0,222	0,016	0,205	0,094	0,117
Korelasi <i>Marker Anchored</i>	0,678	0,584	0,728	0,628	0,800
<i>Tops Error</i>	0	0	0	0	0

Berdasarkan Tabel 4.5, pendekatan *Marker Anchored* secara konsisten menghasilkan korelasi yang lebih tinggi dibandingkan *Fixed Band* pada seluruh sumur, dengan korelasi akhir berkisar antara $r = 0,584$ pada Torosa-2 hingga $r = 0,800$ pada Torosa-5, sekaligus mempertahankan *tops error* = 0 di seluruh marker formasi. Peningkatan korelasi terhadap *Fixed Band* berkisar antara +0,008 pada Torosa-2 hingga +0,089 pada NSR-1. Hasil ini mengkonfirmasi bahwa integrasi marker formasi sebagai titik jangkar *hard constraint* dalam kerangka DTW tidak hanya meningkatkan konsistensi geologis hasil *well-seismic tie* otomatis, tetapi juga berkontribusi langsung pada peningkatan kualitas korelasi terutama pada sumur dengan variasi koreksi waktu antar formasi yang tinggi.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Dekonvolusi Gabor berhasil mengestimasi wavelet *time-variant* dari data seismik *Q-attenuated* dengan koefisien korelasi global $r = 0,951$, RMSE frekuensi 7,96 Hz, dan *bias* +0,67 Hz pada data sintetis terkontrol. Komponen frekuensi dan amplitudo terkompensasi dengan baik, namun estimasi fasa pada zona dalam tidak sepenuhnya berhasil akibat instabilitas transformasi Hilbert ketika SNR menurun seiring akumulasi atenuasi Q kumulatif.
2. *DTW Marker Anchored* menghasilkan korelasi yang sebanding dengan *Fixed Band* pada data sintetis, $r = 0,990-0,993$ di seluruh skenario stretch dan squeeze $\pm 10\%-\pm 30\%$, namun dengan *tops error* = 0 dibandingkan 4–6 marker pada *Fixed Band*. Keunggulan ini bersumber dari penyelesaian DTW per segmen antar marker yang memaksa jalur penyelarasan melewati titik jangkar formasi tanpa mengorbankan kualitas korelasi amplitudo.
3. Pada data nyata Lapangan Torosa, kerangka kerja Dekonvolusi Gabor dan DTW Marker-Anchored meningkatkan korelasi dari $r = -0,236-0,205$ sebelum koreksi menjadi $r = 0,571-0,800$ dengan *tops error* = 0 pada seluruh lima sumur termasuk Torosa-4 yang menggunakan pseudo-checkshot. Pada penampang seismik 2D, seluruh marker dari Formasi Barracouta hingga Triassic terposisi konsisten pada reflektor yang sama secara lateral, sementara *Fixed Band* masih menunjukkan inkonsistensi lateral dengan *tops error* 4–7 marker per sumur. Keseluruhan proses otomatisasi well-seismic tie per sumur dapat diselesaikan dalam waktu sekitar ± 8 menit pada satu sumur, menunjukkan efisiensi komputasi yang signifikan dibandingkan pendekatan manual konvensional yang bisa menghabiskan waktu berjam-jam.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, beberapa saran untuk pengembangan selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Ketergantungan pendekatan *Marker Anchored* pada interpretasi horizon manual perlu dikurangi dengan mengintegrasikan metode *semblance-based autopicking* atau *phase congruency* untuk mendeteksi reflektor seismik secara otomatis sebagai titik jangkar.
2. *Residual phase shift* pada zona dalam perlu diatasi dengan mengintegrasikan koreksi fasa berbasis analisis *cross-spectrum* antara seismogram sintetis dan *trace* seismik pasca-penyelarasan, guna mengurangi ketidakcocokan akibat dispersi fasa atenuasi Q kumulatif.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Aki, K., & Richards, P. G. (2002). *Quantitative Seismology*. University Science Books. https://books.google.co.id/books?id=sRhawFG5_EcC
- Akiba, T., Sano, S., Yanase, T., Ohta, T., & Koyama, M. (2019). Optuna. *Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, 2623–2631. <https://doi.org/10.1145/3292500.3330701>
- Barnes, A. E. (1993). Instantaneous spectral bandwidth and dominant frequency with applications to seismic reflection data. *Geophysics*, 58(3), 419–428. <https://doi.org/10.1190/1.1443425>
- Bergstra, J., Bardenet, R., Bengio, Y., & Kégl, B. (2011). Algorithms for Hyper-Parameter Optimization. In J. Shawe-Taylor, R. Zemel, P. Bartlett, F. Pereira, & K. Weinberger (Eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems* (Vol. 24). Curran Associates, Inc. https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2011/file/86e8f7ab32cfd12577bc2619bc635690-Paper.pdf
- Berndt, D. J., & Clifford, J. (1994). *Using Dynamic Time Warping to Find Patterns in Time Series*. www.aai.org
- Brown, A. R. (2010). *Methods and Applications in Reservoir Geophysics* (D. H. Johnston, Ed.). Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802174>
- Chen, Z., Wang, Y., Chen, X., & Li, J. (2013). High-resolution seismic processing by Gabor deconvolution. *Journal of Geophysics and Engineering*, 10(6). <https://doi.org/10.1088/1742-2132/10/6/065002>
- Cui, T., & Margrave, G. F. (2015). Seismic-to-well ties by smooth dynamic time warping. In *Well tying by SDTW CREWES Research Report* (Vol. 27).
- Faust, L. Y. (1953). A velocity function including lithologic variation. *Geophysics*, 18(2), 271–288. <https://doi.org/10.1190/1.1437869>
- Gardner, G. H. F., Gardner, L. W., & Gregory, A. R. (1974). Formation velocity and density; the diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, 39(6), 770–780. <https://doi.org/10.1190/1.1440465>
- Geoscience Australia. (1982). *North Scott Reef-1, Interpretive Data*.
- Geoscience Australia. (2023). *Regional Geology of the Browse Basin*. <https://www.ga.gov.au/petroleum>
- Herrera, R. H., Fomel, S., & van der Baan, M. (2014). Automatic approaches for seismic to well tying. *Interpretation*, 2(2), SD9–SD17. <https://doi.org/10.1190/INT-2013-0130.1>
- Kjartansson, E. (1979). Constant Q-Wave Propagation and Attenuation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B9), 4737–4748. <https://doi.org/10.1029/JB084iB09p04737>

- Margrave, G., & Lamoureux, M. (2001). Gabor deconvolution. *CREWES Research Report*, 13.
- National Offshore Petroleum Titles Administrator. (n.d.). *National Offshore Petroleum Information Management System (NOPIMS)*. Australian Government. Retrieved December 15, 2026, from <https://public.neats.nopta.gov.au/nopims>
- Rider, M. H. (2002). *The Geological Interpretation of Well Logs*. Rider-French Consulting. <https://books.google.co.id/books?id=nN2UAAAACAAJ>
- Rollet, N., Abbott, S. T., Lech, M. E., Romeyn, R., Grosjean, E., Edwards, D. S., Totterdell, J. M., Nicholson, C. J., Khider, K., Nguyen, D., Bernardel, G., Tenthorey, E., Orlov, C., & Wang, L. (2016). *A regional assessment of CO₂ storage potential in the Browse Basin Results of a study undertaken as part of the National CO₂ Infrastructure Plan*. www.ga.gov.au
- Russell, B. H. (1988). *Introduction to Seismic Inversion Methods*. Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802303>
- Sakoe, H. (1978). Dynamic Programming Algorithm Optimization for Spoken Word Recognition. In *IEEE TRANSACTIONS ON ACOUSTICS, SPEECH, AND SIGNAL PROCESSING* (Number 1).
- Sheriff, R. E. (2002). *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802969>
- Simm, R., & Bacon, M. (2014). *Seismic Amplitude: An Interpreter's Handbook*. Cambridge University Press.
- Stephenson, A. E., & Cadman, S. J. (1994). Browse Basin, Northwest Australia: the evolution, palaeogeography and petroleum potential of a passive continental margin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 111(3–4), 337–366. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(94\)90071-X](https://doi.org/10.1016/0031-0182(94)90071-X)
- Sukmono, S. (1999). Interpretasi seismik refleksi. *Jurusan Teknik Geofisika, Institut Teknologi Bandung*.
- Toksoz, M. N., Johnston, D. H., & Timur, A. (1979). Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks; I, Laboratory measurements. *Geophysics*, 44(4), 681–690. <https://doi.org/10.1190/1.1440969>
- Wang, K., Lomask, J., & Segovia, F. (2017). Automatic, geologic layer-constrained well-seismic tie through blocked dynamic warping. *Interpretation*, 5(3), SJ81–SJ90. <https://doi.org/10.1190/INT-2016-0160.1>
- White, R. E., & Simm, R. (2003). Tutorial: good practice in well ties. *First Break*, 21(10). <https://doi.org/10.3997/1365-2397.21.10.25640>
- Woodside Energy Ltd. (2007). *Torosa-2, Well Completion Report, Interpretive Data*.
- Woodside Energy Ltd. (2007). *Torosa-3, Well Completion Report, Interpretive Data*.
- Woodside Energy Ltd. (2008). *Torosa-4, Well Completion Report, Interpretive Data*.
- Woodside Energy Ltd. (2010). *Torosa-5, Well Completion Report, Interpretive Data*.

- Woodside Energy Ltd. (2015). *Torosa Megator-merge 3D Seismic Interpretation Report*.
- Yao, Z., Lu, W., Geng, W., & Wang, J. (2025). Physics-Constrained Automated Well-to-Seismic Tie Based on Time-Frequency Key Feature Point Matching. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 63, 1–14. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2025.3579236>
- Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic Data Analysis*. Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801580>

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

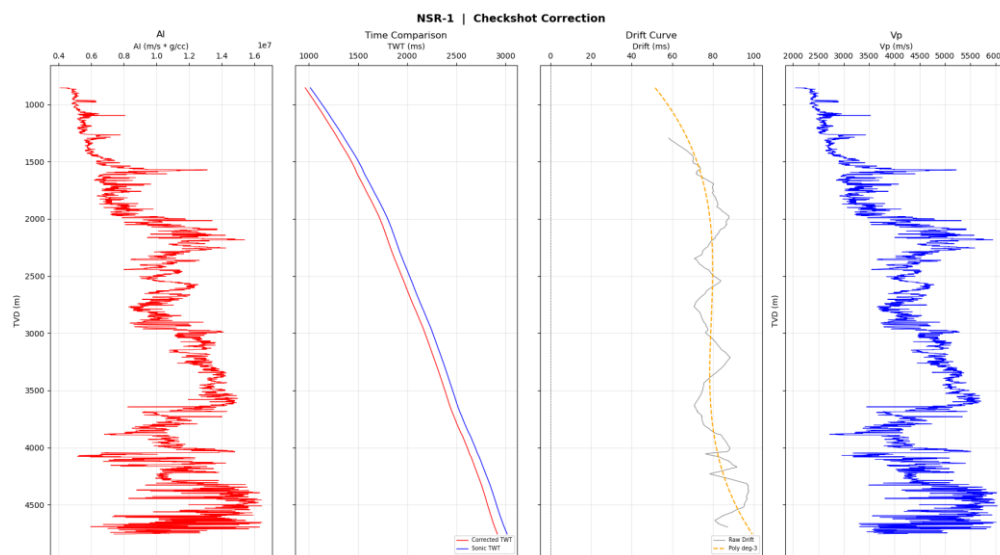
Lampiran 1: Repositori Kode Program

Kode program yang digunakan dalam penelitian ini tersedia pada repositori GitHub berikut:

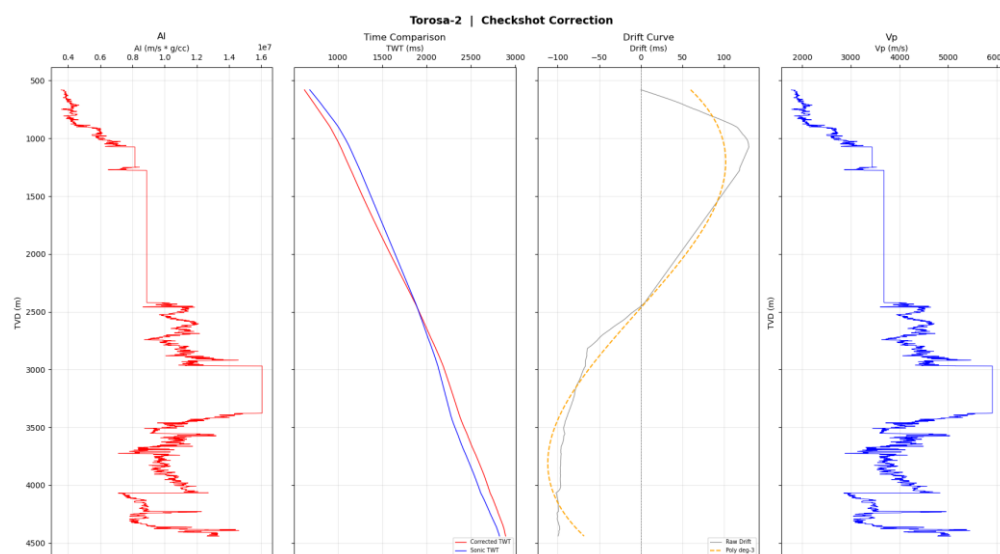
<https://github.com/Firzalds/Gabor-Deconvolution-and-DTW-for-Automatic-Well-Seismic-Tie.git>

Repositori ini mencakup implementasi Gabor Deconvolution untuk ekstraksi *wavelet time-variant*, *Dynamic Time Warping* (DTW) untuk penyelarasan otomatis, serta skrip pengujian pada data sintetis dan data sumur Torosa.

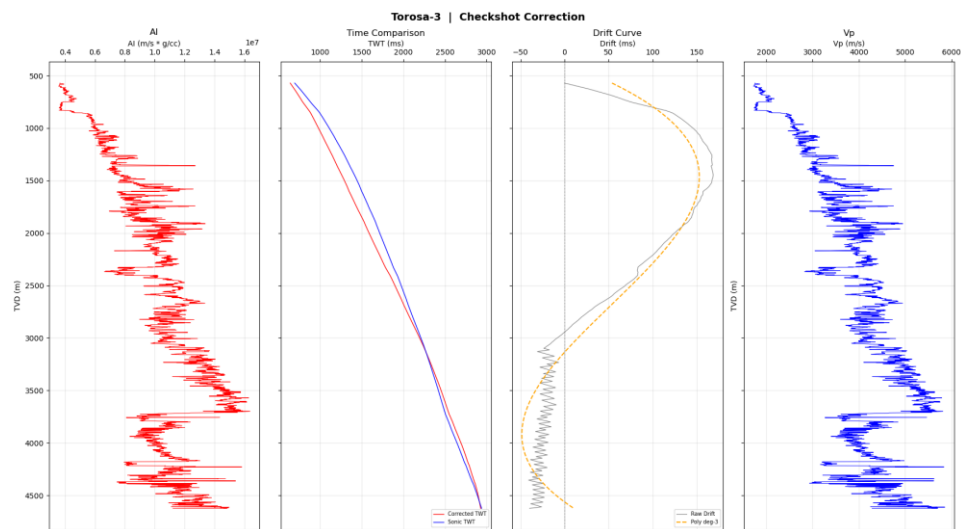
Lampiran 2: Checkshot Correction sumur North Scoot Reef-1(Geoscience Australia, 1982).



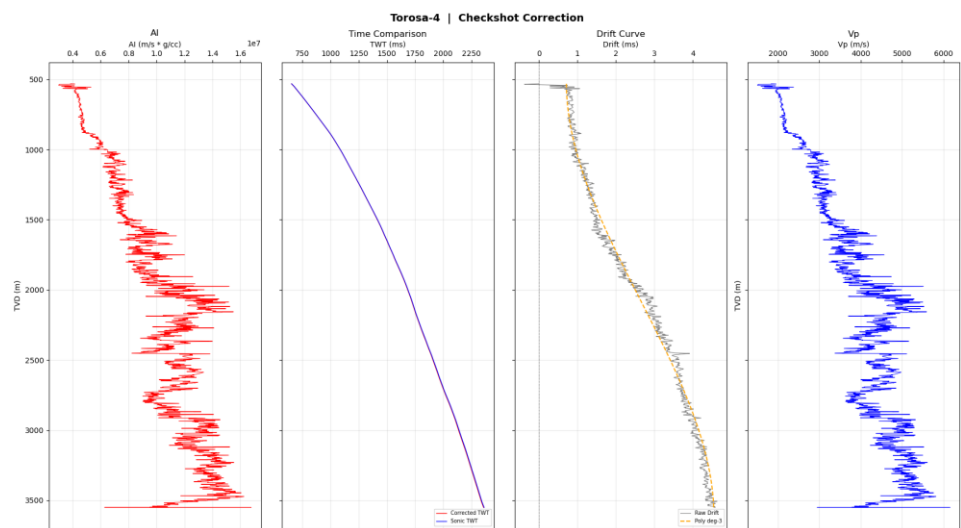
Lampiran 3: Checkshot Correction sumur Torosa-2 (Woodside Energy Ltd, 2007).



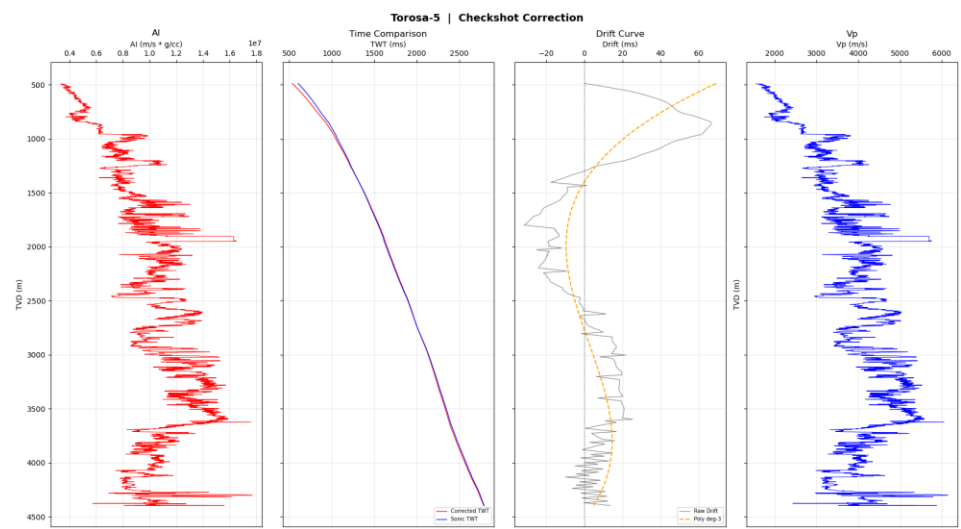
Lampiran 4: *Checkshot Correction* sumur Torosa-3(Woodside Energy Ltd, 2007).



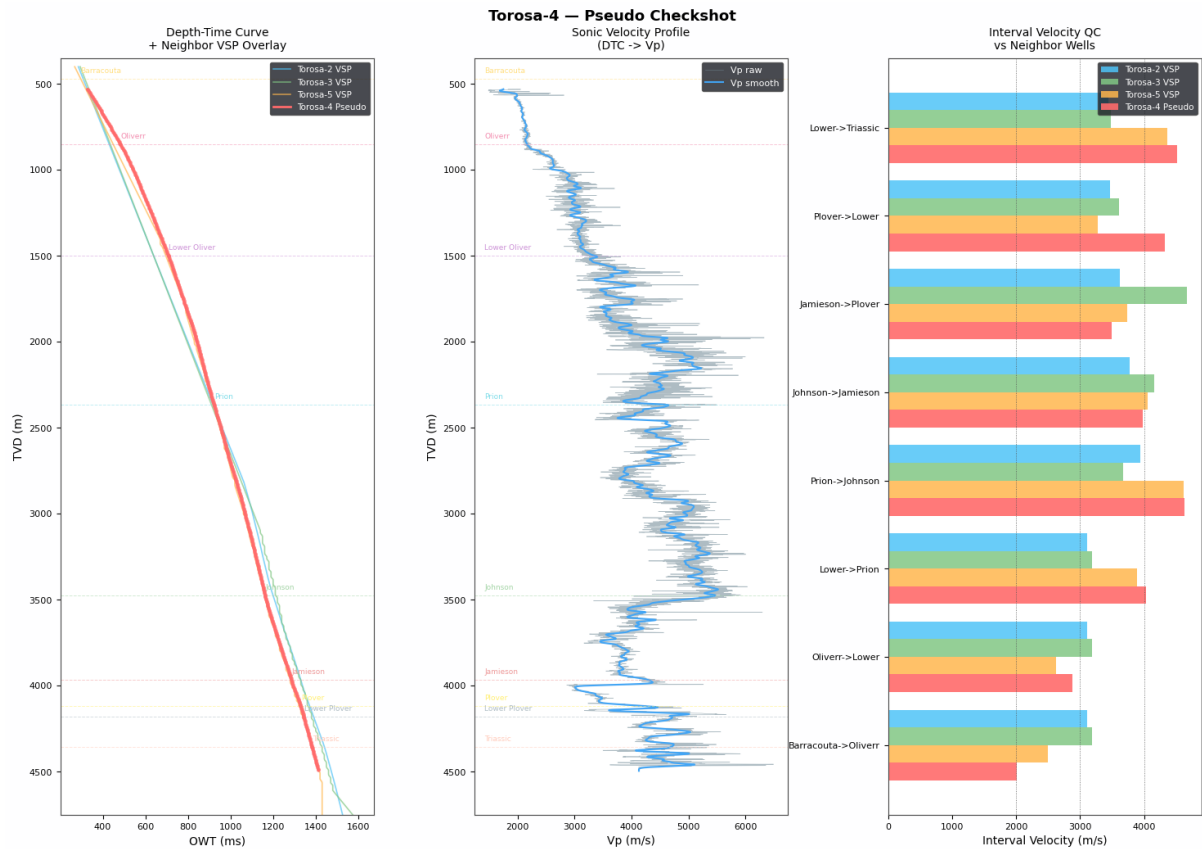
Lampiran 5: *Checkshot Correction* sumur Torosa-4(Woodside Energy Ltd, 2008).



Lampiran 6: *Checkshot Correction* sumur Torosa-5(Woodside Energy Ltd, 2010).

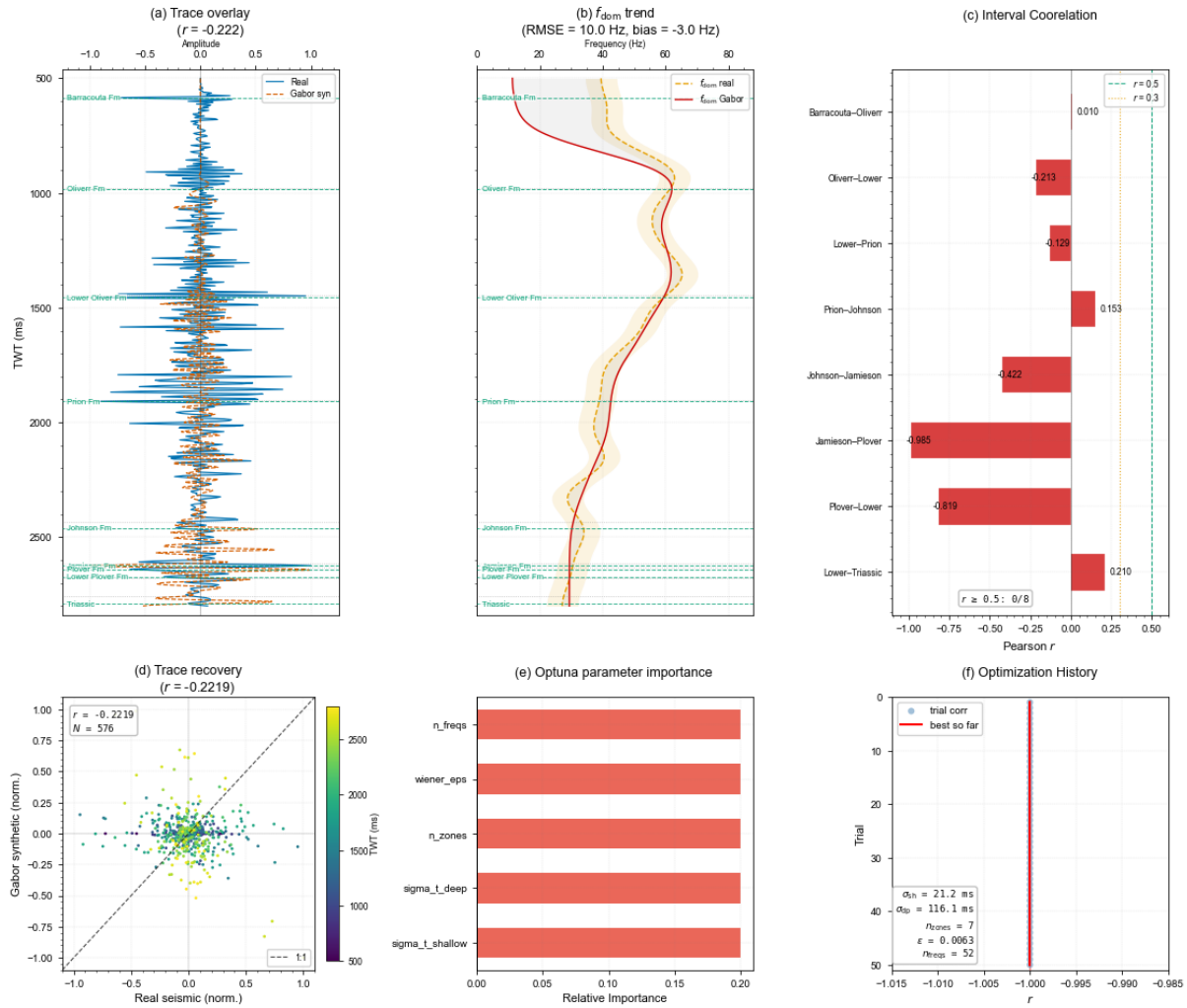


Lampiran 7: Psuedo Checkshot Torosa 4.



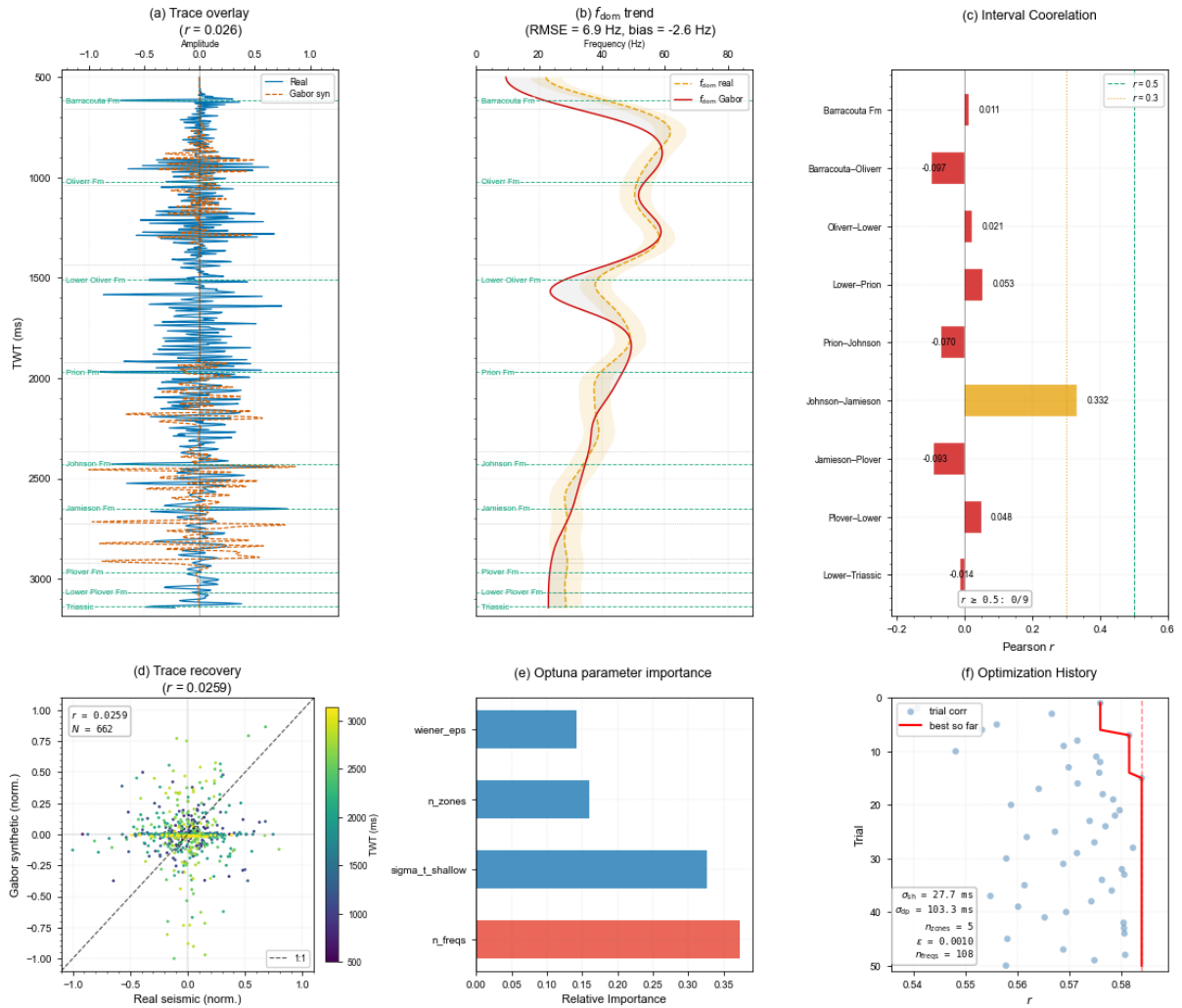
Pseudo-checkshot sumur Torosa-4 yang terdiri dari tiga panel. Panel kiri menunjukkan kurva waktu-kedalaman Torosa-4 Pseudo yang dioverlay dengan data VSP sumur tetangga, di mana kurva Torosa-4 konsisten dengan sumur sekitarnya pada zona dangkal namun mulai divergen secara progresif ke zona dalam, mencerminkan akumulasi ketidakpastian estimasi kecepatan interval. Panel tengah menunjukkan profil kecepatan sonik V_p hasil konversi log DTC, dengan kurva V_p raw yang bervariasi tinggi dan kurva V_p smooth yang merepresentasikan tren kecepatan per formasi sebagai dasar konstruksi *pseudo-checkshot* sesuai Persamaan (3.36). Panel kanan menunjukkan QC kecepatan interval Torosa-4 Pseudo terhadap sumur tetangga per segmen formasi, di mana deviasi bervariasi arah dan besarnya antar interval dengan perbedaan paling mencolok pada Lower-Triassic yang jauh lebih tinggi dibandingkan seluruh sumur referensi. Variasi deviasi kecepatan yang tidak seragam ini menjadi sumber utama ketidakpastian kurva waktu-kedalaman Torosa-4 dan motivasi utama penggunaan *DTW Marker Anchored* untuk mengoreksi deviasi per segmen secara independen.

Lampiran 8: Optuna Hyper-parametrization NSR-1



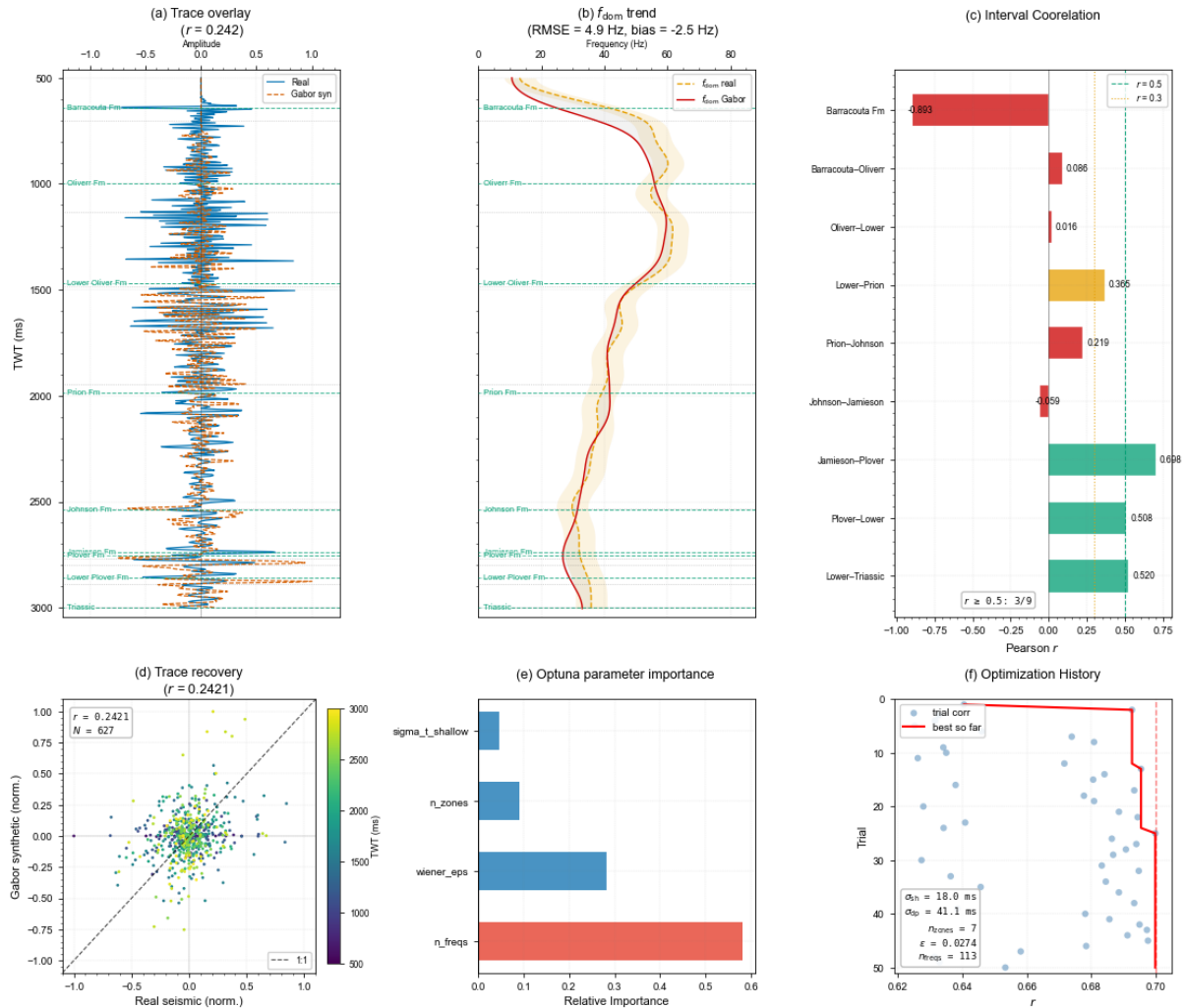
Hasil optimasi *Hyperparameter* Dekonvolusi Gabor pada sumur NSR-1. Panel (a) menunjukkan *trace overlay* dengan korelasi awal $r = -0,222$, mencerminkan ketidakselarasan temporal yang signifikan. Panel (b) menunjukkan RMSE frekuensi sebesar 10,0 Hz dan *bias* - 3,0 Hz, merupakan RMSE tertinggi di antara seluruh sumur lapangan yang dikaitkan dengan kompleksitas spektral tinggi pada interval *overburden* Tersier. Panel (c) memperlihatkan bahwa hampir seluruh interval bernilai negatif dengan hanya tiga interval positif yaitu Barracouta-Oliverr ($r = 0,010$), Prion-Johnson ($r = 0,153$), dan Lower-Triassic ($r = 0,210$), tanpa satu pun interval mencapai $r \geq 0,5$ (0/8). Panel (d) menunjukkan sebaran *trace recovery* yang acak konsisten dengan korelasi negatif yang teramati ($r = -0,2219$, $N = 576$). Panel (e) menunjukkan bahwa *n_freqs*, *wiener_eps*, dan *n_zones* memberikan kontribusi yang relatif seimbang. Panel (f) menunjukkan konvergensi optimasi dengan parameter terbaik $\sigma_{sh} = 21,2$ ms, $\sigma_{dp} = 116,1$ ms, $n_{zones} = 7$, $\epsilon = 0,0063$, dan $n_{freqs} = 52$.

Lampiran 9: Optuna Hyper-parametrization Torosa-2



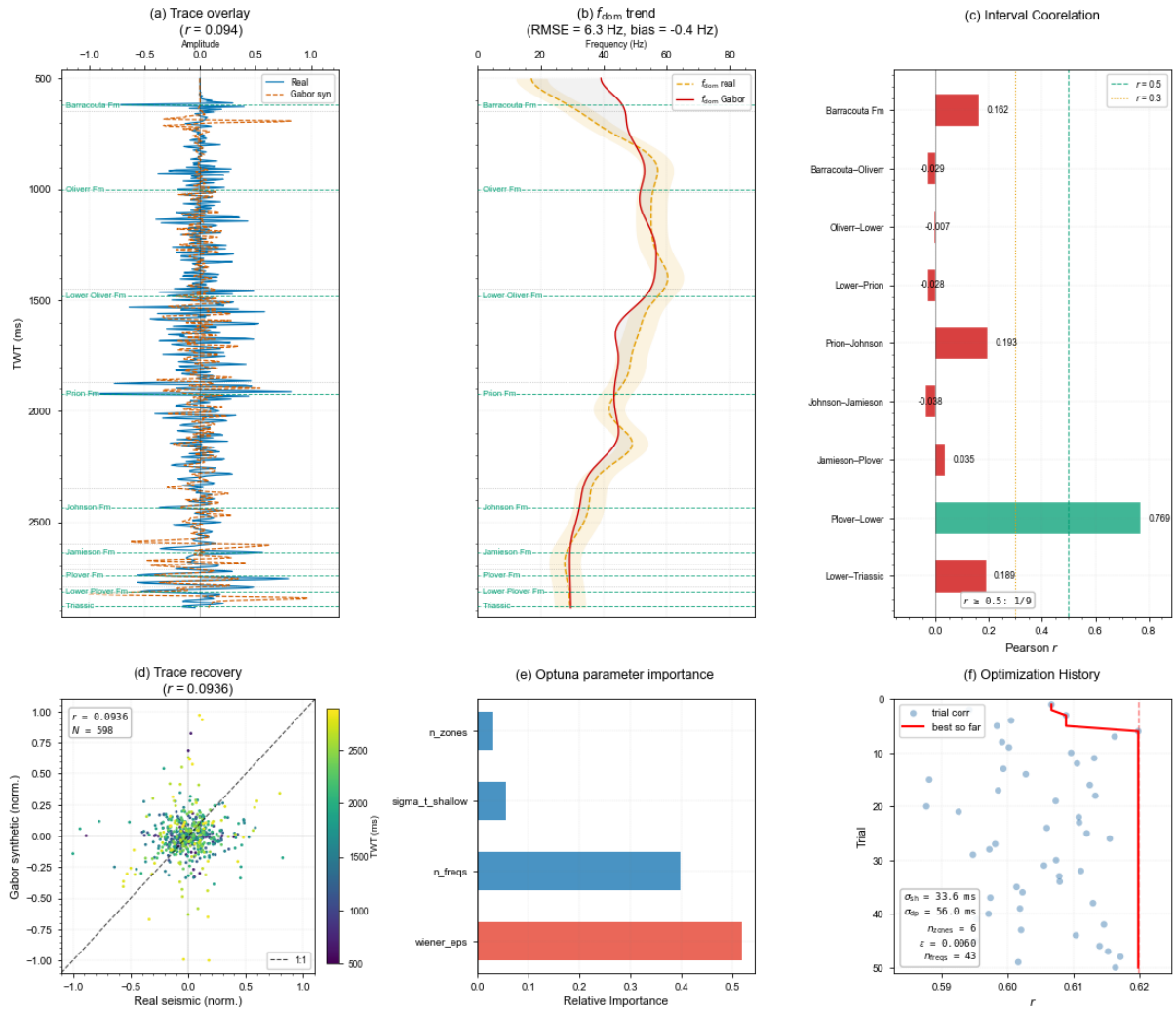
Hasil optimasi *Hyperparameter* Dekonvolusi Gabor pada sumur Torosa-2. Panel (a) menunjukkan korelasi awal $r = 0,026$. Panel (b) menunjukkan RMSE frekuensi 6,9 Hz dan *bias* -2,6 Hz dengan deviasi lebih besar pada zona dangkal. Panel (c) memperlihatkan Johnson-Jamieson sebagai interval dengan korelasi tertinggi ($r = 0,332$) namun tidak ada interval yang mencapai $r \geq 0,5$ (0/9). Panel (d) menunjukkan sebaran *trace recovery* dengan kecenderungan linier yang sangat lemah ($r = 0,0259$, $N = 662$). Panel (e) menunjukkan *wiener_eps* sebagai parameter paling dominan diikuti *n_zones*, *sigma_t_shallow*, dan *n_freqs*, mengindikasikan regularisasi Wiener filter sangat menentukan kualitas dekonvolusi pada sumur ini. Panel (f) menunjukkan parameter terbaik $\sigma_{sh} = 27,7$ ms, $\sigma_{dp} = 103,3$ ms, $n_{zones} = 5$, $\epsilon = 0,0010$, dan $n_{freqs} = 108$.

Lampiran 10: Optuna Hyper-parametrization Torosa-3



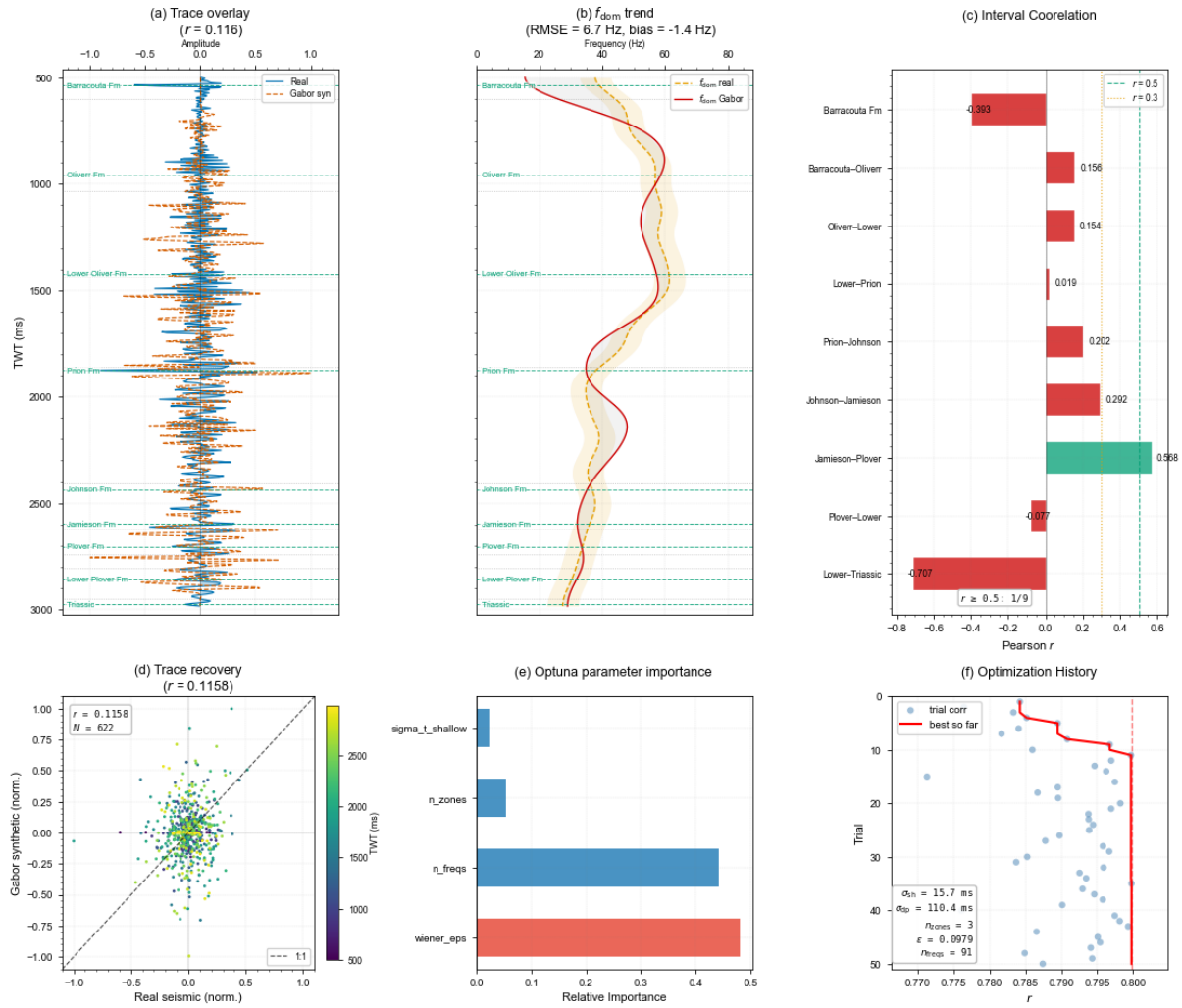
Hasil optimasi *Hyperparameter* Dekonvolusi Gabor pada sumur Torosa-3. Panel (a) menunjukkan korelasi awal $r = 0,242$, tertinggi di antara seluruh sumur lapangan. Panel (b) menunjukkan RMSE frekuensi 4,9 Hz dan *bias* -2,5 Hz, merupakan RMSE terkecil di antara seluruh sumur. Panel (c) memperlihatkan tiga interval yang mencapai $r \geq 0,5$ yaitu Jamieson-Plover ($r = 0,698$), Plover-Lower ($r = 0,508$), dan Lower-Triassic ($r = 0,520$), menjadikan Torosa-3 sebagai sumur dengan rasio interval berkualitas baik tertinggi (3/9). Panel (d) menunjukkan kecenderungan linier yang lebih jelas dibandingkan sumur sebelumnya ($r = 0,2421$, $N = 627$). Panel (e) menunjukkan n_freqs sebagai parameter paling dominan, berbeda dengan pola Torosa-2 yang didominasi $wiener_eps$, mencerminkan resolusi sampling frekuensi lebih kritis pada sumur ini. Panel (f) menunjukkan parameter terbaik $\sigma_{sh} = 18,0$ ms, $\sigma_{dp} = 41,3$ ms, $n_zones = 7$, $\epsilon = 0,0274$, dan $n_freqs = 113$.

Lampiran 11: Optuna Hyper-parametrization Torosa-4



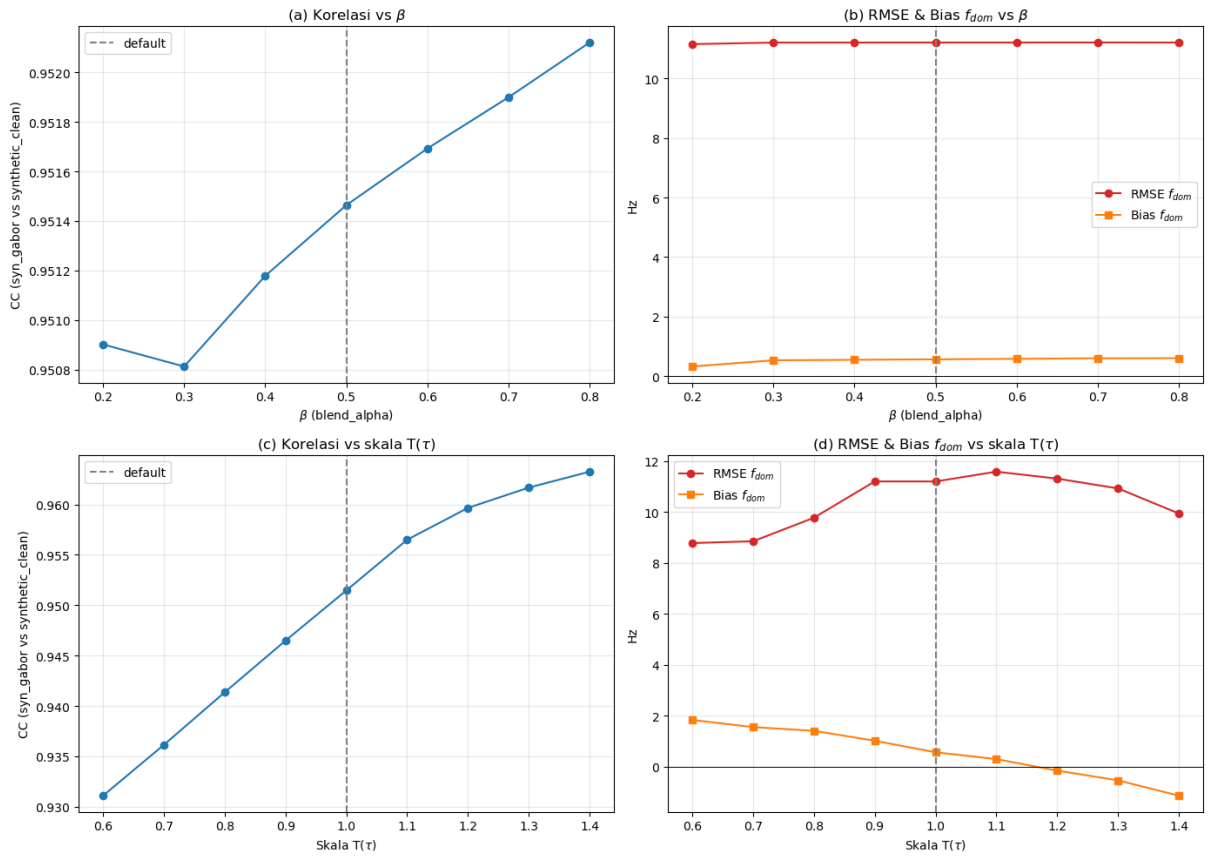
Hasil optimasi *Hyperparameter* Dekonvolusi Gabor pada sumur Torosa-4. Panel (a) menunjukkan korelasi awal $r = 0,094$. Panel (b) menunjukkan RMSE frekuensi 6,3 Hz dan *bias* -0,4 Hz, merupakan nilai *bias* paling mendekati nol di antara seluruh sumur lapangan meskipun ketidakpastian *pseudo-checkshot* tetap menjadi sumber utama ketidakselarasan. Panel (c) memperlihatkan hanya interval Plover-Lower yang mencapai $r \geq 0,5$ dengan nilai $r = 0,769$ (1/9), sementara sebagian besar interval lain bernilai sangat kecil atau negatif. Panel (d) menunjukkan sebaran *trace recovery* yang masih acak ($r = 0,0936$, $N = 598$). Panel (e) menunjukkan *wiener_eps* sebagai parameter paling dominan diikuti *n_freqs*, *sigma_t_shallow*, dan *n_zones*, serupa dengan pola Torosa-2. Panel (f) menunjukkan parameter terbaik *sigma_sh* = 33,6 ms, *sigma_dp* = 56,0 ms, *n_zones* = 6, *epsilon* = 0,0060, dan *n_freqs* = 43.

Lampiran 12: Optuna Hyper-parametrization Torosa-5



Hasil optimasi *Hyperparameter* Dekonvolusi Gabor pada sumur Torosa-5. Panel (a) menunjukkan korelasi awal $r = 0,116$. Panel (b) menunjukkan RMSE frekuensi 6,7 Hz dan *bias* -1,4 Hz dengan distribusi energi spektral yang lebih tersebar dibandingkan sumur-sumur sebelumnya. Panel (c) memperlihatkan variasi korelasi per interval yang paling ekstrem, di mana Jamieson-Plover mencapai $r = 0,968$ namun Lower-Triassic menunjukkan $r = -0,707$, dengan hanya satu interval mencapai $r \geq 0,5$ (1/9). Panel (d) menunjukkan sebaran *trace recovery* yang masih acak ($r = 0,1158$, $N = 622$). Panel (e) menunjukkan *wiener_eps* sebagai parameter paling dominan dengan nilai epsilon terbaik 0,0979, tertinggi di antara seluruh sumur, mengindikasikan kebutuhan regularisasi yang lebih kuat akibat variasi spektral antar interval yang besar. Panel (f) menunjukkan parameter terbaik $\sigma_{sh} = 15,7$ ms, $\sigma_{dp} = 110,4$ ms, $n_{zones} = 3$, epsilon = 0,0979, dan $n_{freqs} = 91$.

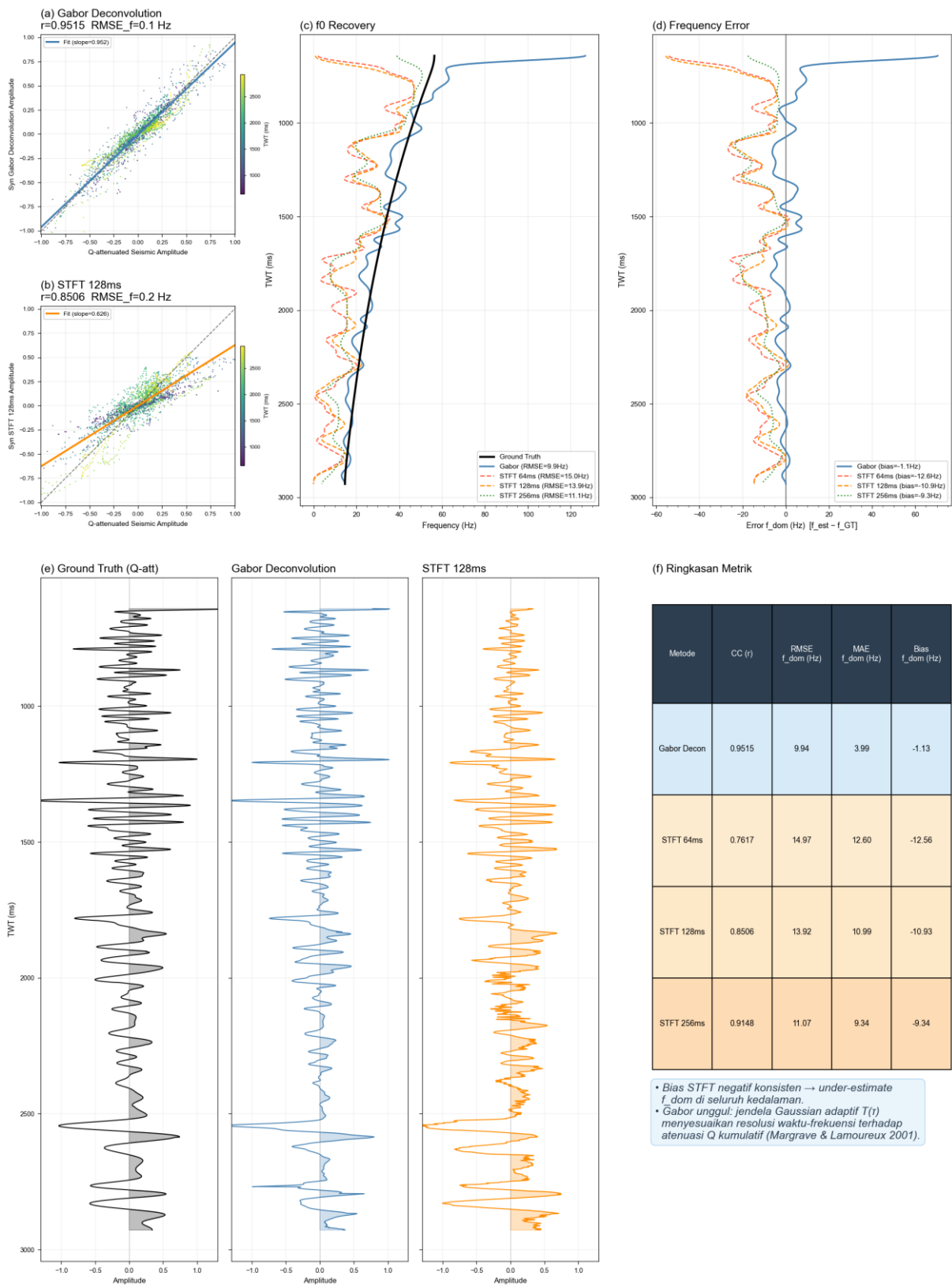
Lampiran 13: Gabor Deconvolution Synthetic Window Sensitivity Test



Uji sensitivitas parameter jendela Dekonvolusi Gabor pada data sintetis yang terdiri dari empat panel. Panel (a) menunjukkan pengaruh variasi *blending factor* beta pada rentang 0,2 hingga 0,8 terhadap koefisien korelasi, di mana CC hanya berubah dari 0,9508 hingga 0,9521 dengan rentang total sebesar 0,0013. Panel (b) menunjukkan bahwa RMSE frekuensi dominan hampir sepenuhnya flat di sekitar 11,2 Hz untuk seluruh variasi beta, sementara *bias* hanya bergeser kecil dari +0,33 Hz hingga +0,61 Hz. Kedua panel tersebut mengkonfirmasi bahwa pemilihan beta = 0,5 bersifat robust terhadap pilihan dalam rentang yang diuji, yang disebabkan oleh f_{inst} dan b_{inst} pada sinyal Q-attenuated keduanya mengikuti tren penurunan eksponensial yang serupa sehingga perubahan proporsi *blend* tidak mengubah nilai $T(\tau)$ secara berarti.

Panel (c) menunjukkan pengaruh variasi skala lebar jendela $T(\tau)$ dengan faktor pengali 0,6 hingga 1,4 terhadap nilai default, di mana CC meningkat monoton dari 0,931 pada skala 0,6 hingga 0,963 pada skala 1,4. Panel (d) mengungkap adanya *trade-off* yang signifikan, di mana RMSE frekuensi dominan justru menunjukkan nilai terbaik pada skala kecil (8,78 Hz pada scale = 0,6) dan memburuk pada skala menengah sebelum membaik kembali, sementara *bias* berbalik tanda dari positif ke negatif di sekitar scale = 1,1. Pola ini mengindikasikan bahwa jendela yang lebih lebar menghasilkan *smoothing* spektral yang lebih agresif sehingga meningkatkan kecocokan *trace* secara global namun menekan variasi frekuensi lokal. Nilai default scale = 1,0 dengan CC = 0,9515 dan RMSE = 11,20 Hz merepresentasikan keseimbangan antara kedua metrik tersebut, bukan nilai yang memaksimalkan salah satunya secara eksklusif.

Lampiran 14: Gabor Deconvolution Trace Generation and STFT Trace Generation Comparizaon.



Perbandingan kuantitatif antara Dekonvolusi Gabor dan metode STFT dengan tiga ukuran jendela tetap (64 ms, 128 ms, dan 256 ms) pada data sintetis Q-attenuated. Panel (a) menunjukkan *scatter trace recovery* Dekonvolusi Gabor dengan $r = 0,9515$ dan kemiringan regresi sebesar 0,952, memperlihatkan keselarasan yang sangat baik antara seismogram sintetis Gabor dan *ground truth*. Panel (b) menunjukkan *scatter* STFT 128 ms dengan $r = 0,8506$ dan kemiringan sebesar 0,628, jauh lebih rendah dibandingkan Gabor dan memperlihatkan sebaran titik yang lebih lebar mencerminkan ketidakselarasan amplitudo yang lebih besar.

Panel (c) menunjukkan pemulihan frekuensi dominan f_0 terhadap *ground truth*, di mana kurva Gabor (RMSE = 9,9 Hz) mengikuti tren penurunan frekuensi *instantaneous* dengan lebih baik dibandingkan seluruh varian STFT yang menunjukkan RMSE lebih tinggi yaitu STFT 64 ms (15,0 Hz), STFT 128 ms (13,9 Hz), dan STFT 256 ms (11,1 Hz). Panel (d) memperlihatkan distribusi *frequency error* per TWT, di mana seluruh varian STFT menunjukkan *bias* negatif yang konsisten dan besar berkisar antara -12,6 Hz hingga -9,3 Hz, mengindikasikan kecenderungan *under-estimate* frekuensi dominan secara sistematis di seluruh kedalaman, sementara Gabor hanya menunjukkan *bias* sebesar -1,1 Hz.

Panel (e) menampilkan perbandingan visual *trace* antara *ground truth* Q-attenuated, hasil Dekonvolusi Gabor, dan STFT 128 ms, di mana seismogram Gabor memperlihatkan pola amplitudo yang jauh lebih konsisten terhadap *ground truth* terutama pada zona dalam di mana efek atenuasi Q kumulatif paling dominan. Panel (f) merangkum seluruh metrik evaluasi, di mana Dekonvolusi Gabor unggul pada seluruh metrik dengan $CC = 0,9515$, $RMSE = 9,94$ Hz, $MAE = 3,99$ Hz, dan $bias = -1,13$ Hz dibandingkan STFT terbaik (256 ms) yang hanya mencapai $CC = 0,9148$, $RMSE = 11,07$ Hz, $MAE = 9,34$ Hz, dan $bias = -9,34$ Hz. Keunggulan ini bersumber dari mekanisme jendela Gaussian adaptif $T(\tau)$ yang menyesuaikan resolusi waktu-frekuensi sesuai kandungan spektral lokal sebagaimana pada Persamaan (3.9), yang tidak dimiliki oleh STFT dengan jendela tetap.

Lampiran 15: Parameterisasi Dekonvolusi Gabor pada Data Seismik Sintetis.

Parameter	Nilai	Keterangan
SNR input	20 dB	<i>Gaussian noise</i> pada data sintetis
f_{max}	106.25 Hz (85% Nyquist)	Frekuensi maksimum Gabor transform
n_{freq}	213 bins	Jumlah sampling frekuensi domain Gabor transform
Lebar jendela <i>Gaussian</i> $T(\tau)$	10 – 120 ms (depth-variant)	Lebar jendela bervariasi sepanjang trace menyesuaikan kandungan spektral lokal
Blending factor β	0.5	Bobot keseimbangan antara instantaneous frequency dan instantaneous bandwidth
Regularisasi ε (Wiener)	$10^{-4} - 1$ (15 kandidat log-spaced)	Dipilih per zona marker melalui grid search untuk memaksimalkan korelasi rekonstruksi
Stabilisasi μ	$0,01 \times \hat{W}_Q _{max}$	Faktor penstabil estimasi fase (mencegah instabilitas Hilbert Transform di zona SNR rendah)
Jumlah zona marker	9	Jumlah segmen interval formasi untuk Wiener filter adaptif

Lampiran 16: Parameterisasi *Dynamic Time Warping* pada Data Seismik Sintetis 6 Skenario.

Parameter	<i>Stretch</i> 10%	<i>Stretch</i> 20%	<i>Stretch</i> 30%	<i>Squeeze</i> 10%	<i>Squeeze</i> 20%	<i>Squeeze</i> 30%	Keterangan
<i>Fixed Band Constraint (Sakoe–Chiba)</i>							
f_0 (Hz)	11.7	11.7	7.8	11.7	15.6	15.6	Median <i>instantaneous frequency trace</i> seismik sintetis per skenario.
σ_{smooth} (ms)	34.1	34.1	51.2	34.1	25.6	25.6	Setengah periode gelombang dominan; dihitung otomatis dari f_0
max shift (ms)	382.2	869.8	1496.7	376.0	619.1	917.6	Batas atas pergeseran waktu yang diizinkan DTW.
Window DTW (ms)	229.3	521.9	898.0	225.6	371.5	550.6	Lebar pita penyelarasan global yang digunakan DTW.
Jumlah iterasi	8	8	8	8	8	8	Jumlah iterasi yang dijalankan hingga <i>window</i> terbaik ditemukan.
<i>Marker-Anchored Constraint</i>							
f_0 (Hz)	11.7	11.7	7.8	11.7	15.6	15.6	Setengah periode gelombang dominan; dihitung otomatis dari f_0 .
σ_{smooth} (ms)	34.1	34.1	51.2	34.1	25.6	25.6	Batas atas pergeseran waktu yang diizinkan DTW.
max shift (ms)	382.2	869.8	1496.7	376.0	619.1	917.6	Faktor penentu lebar pita penyelarasan per segmen antar formasi.
Marker	9	9	9	9	9	9	Jumlah titik jangkar yang memaksa warping path melewati posisi formasi
Band per segmen (Band $\times$ 1.3) (ms)	70–295	70–644	70–1071	42–311	26–511	43–682	Lebar pita penyelarasan per interval formasi, dihitung dari drift lokal $\times$ 1.3.

Lampiran 17: Parameterisasi Dekonvolusi Gabor pada Data Lapangan Torosa.

Parameter	NSR-1	Torosa-2	Torosa-3	Torosa-4	Torosa-5	Keterangan
<i>Blending factor</i> β	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	Bobot keseimbangan antara <i>instantaneous frequency</i> dan <i>instantaneous bandwidth</i> dalam penentuan lebar jendela Gaussian.
Δf (Hz)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	Resolusi sampling domain frekuensi Gabor transform.
f_{max} (Hz)	106.25	106.25	106.25	106.25	106.25	Frekuensi maksimum Gabor transform, diturunkan dari sampling rate 4 ms.
Stabilisasi μ		$0,01 \times \hat{W}_Q _{max}$				Faktor penstabil estimasi fase pada zona dengan SNR rendah.
$\sigma_{shallow}$ (ms)	21.2	27.7	21.2	33.6	15.7	Lebar jendela Gaussian zona dangkal.
σ_{deep} (ms)	116.1	103.3	116.1	56.0	110.4	Lebar jendela Gaussian zona dalam.
n_{zones}	7	5	7	6	3	Jumlah segmen interval formasi untuk Wiener filter adaptif.
ε (Wiener filter)	0.0063	0.0010	0.0063	0.0060	0.0979	Parameter regularisasi Wiener filter, dipilih melalui optimasi Bayesien (Optuna)
n_{freq} (bins)	52	108	52	43	91	Jumlah sampling frekuensi Gabor transform, ditentukan dari bandwidth spektral lokal trace seismik

Lampiran 18: Parameterisasi *Dynamic Time Warping* pada Data Lapangan Torosa.

	NSR-1	Torosa-2	Torosa-3	Torosa-4	Torosa-5	Keterangan
<i>Fixed Band Constraint (Sakoe–Chiba)</i>						
f_0 (Hz)	43.0	31.2	35.2	43.0	23.4	Median instantaneous frequency trace seismik per sumur.
σ_{smooth} (ms)	9.3	17.6	11.4	17.2	26.4	Setengah periode gelombang dominan; dihitung otomatis dari f_0 .
max shift (ms)	50.5	235.3	29.0	171.4	45.2	Batas atas pergeseran waktu yang diizinkan DTW.
Window DTW (ms)	103.2	263.7	70.2	192.1	44.5	Lebar pita penyalarsan global yang digunakan DTW.
Jumlah iterasi	8	6	7	6	4	Jumlah iterasi yang dijalankan hingga window terbaik ditemukan.
<i>Marker-Anchored Constraint</i>						
f_0 (Hz)	43.0	31.2	35.2	43.0	23.4	Median instantaneous frequency trace seismik per sumur.
σ_{smooth} (ms)	9.3	17.6	11.4	17.2	26.4	Setengah periode gelombang dominan; dihitung otomatis dari f_0 .
max shift (ms)	10.0	10.0	10.0	171.4	118.3	Batas atas pergeseran waktu yang diizinkan DTW.
α band	0.08	0.08	0.08	0.15	0.15	Faktor penentu lebar pita penyalarsan per segmen antar formasi.
Marker	8/8	9/9	9/9	9/9	9/9	Jumlah titik jangkar yang memaksa warping path melewati posisi formasi.
Band per segmen (Band $\times$ 1.3) (ms)	43.6–50.1	14.2–44.2	6.2–49.3	35.9–114.5	36.0–112.8	Lebar pita penyalarsan per interval formasi, dihitung dari drift lokal $\times$ 1.3.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Bandung, 12 Oktober 2003, merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN Mandiri 1 Cimahi, SMPN 3 Cimahi, SMAN 5 Cimahi, dan pendidikan sarjana di Departemen Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif mengikuti berbagai organisasi dan event seperti, staff ahli *Event Seismic Interpretation Training* by GEOSPHERE ITS 2024, manager *Plan of Development Competition* by PETROLIDA 2025. Penulis juga aktif dalam bidang akademik dengan menjadi asisten dosen mata kuliah Ekspolasi Data Seismik. Pada bidang keilmiahan, penulis aktif dalam mengikuti beberapa perlombaan dengan pencapaian *2nd Runner-up International*

PetroWell 2024 Case Study Competition by SPWLA UP, *1st Runner-up Seismic Interpretation Competition* by HAGI SC WEEK 2025. *1st Winner of Seismic Interpretation Competition* by IMGf UB 2025. Penulis juga memiliki *work experience* dengan melaksanakan magang di Pusat Survey Geologi dengan topik *Passive Seismic Tomography Processing*. Penulis sangat terbuka apabila ada saran, kritik, maupun ajakan diskusi yang ingin disampaikan Penulis dapat dihubungi melalui email: firzarizaldisuryantoro@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan