



Jurnal Geofisika Eksplorasi

E-ISSN 2685-6182
P-ISSN 2356-1599

Vol. 07 No.03, November 2021



Geophysical Engineering Department
Engineering Faculty

Jurnal Geofisika Eksplorasi (JGE)

JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi) - *Journal of Exploration Geophysics* - is a double-blind peer-reviewed journal that is managed and published by **Geophysical Engineering Department, Engineering Faculty, Universitas Lampung**. JGE is published periodically (three times a year) in March, July and November. JGE is available for free (open access) to all readers. The articles in JGE include developments and researches in **Geophysical Exploration and Earth Science** (theoretical studies, experiments, and its applications).

Person in Charge

Head of Geophysical Engineering Department
Engineering Faculty
Universitas Lampung

Editor in Chief

Rahmat Catur Wibowo S.T., M.Eng.

Editorial Advisory Board

Prof. Dr. Andri Dian Nugraha, M.Si., Geophysical Engineering, ITB, INA
Dr. Ir. Nandi Haerudin, M.Si., Geophysical Engineering, Universitas Lampung, INA
Dr. Ir. Muh. Sarkowi, S.Si., M.Si., Geophysical Engineering, Universitas Lampung, INA
Dr. Asep Harja, Geophysics, Universitas Padjajaran, INA
Dr. Ir. D. Hendra Amijaya, M.T., Geological Engineering, UGM, INA
Dr. Ir. Ferian Anggara, M.T., Geological Engineering, UGM, INA
Indra Arifianto, S.T., M.Eng., Computational Earthquake Seismology, KAUST, SA

Editorial Member

Sandri Erfani, S.Si., M.Eng., Geophysical Engineering, Universitas Lampung, INA
I B Suananda Yogi, S.T., M.T., Geophysical Engineering, Universitas Lampung, INA
Rudy Z Sinambela, S.T., M.T., Geophysical Engineering, Universitas Lampung, INA
Isti Nur Kumalasari, S.T., M.T., Oil and Gas Engineering, ITERA, INA
Istifani Ferucha, S.T., Geophysical Engineering, ITB, INA

Postal Address

Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Universitas Lampung
Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No.1 Bandar Lampung
Telp. (0724)704947 Fax. (0721)704947

Email: jge.tgu@eng.unila.ac.id

Website: <https://jge.eng.unila.ac.id/index.php/geoph>

JGE Peer-Reviewer

Prof. Dr. Ir. Hendarmawan, M.Sc., Universitas Padjajaran, Indonesia
Prof. Suharso, P.hD., Universitas Lampung, Indonesia
Prof. Dr. Ir. Binarko Santoso, R&D Centre for Mineral and Coal Technology, Indonesia
Prof. Dr. Drs. Sismanto, M.Si., Universitas Gadjah Mada, Indonesia
Prof. Sri Widyanoro, M.Sc., P.hD., Institut Teknologi Bandung, Indonesia
Prof. Adi Susilo, Universitas Brawijaya, Indonesia
Prof. Ir. Lambok Hutasoit, M.Sc., P.hD., Institut Teknologi Bandung, Indonesia
Prof. Dr. Supriyadi, Universitas Negeri Semarang, Indonesia
M. Yusuf Nur Khakim, Ph.D., Universitas Sriwijaya, Indonesia
Dr. Muksin Umar, Universitas Syiah Kuala, Indonesia
Dr. Tedi Yudistira, Institut Teknologi Bandung, Indonesia
Dr.Eng. Supriyanto Suparno, M.Sc., Universitas Indonesia, Indonesia
Dr.Eng. Imam Achmad Sadisun, Institut Teknologi Bandung, Indonesia
Dr.Eng. Suryantini, M.Sc., Institut Teknologi Bandung, Indonesia
Dr. Maman Hermana, Universiti Teknologi Petronas, Malaysia
Dr. S.S. Rita Susilawati, Coal and Geothermal Mineral Resources Center, Indonesia
Dr. Sri Hidayati, Volcanology, Mitigation and Geological Disasters Center, Indonesia
Dr. Eko Januari Wahyudi, Institut Teknologi Bandung, Indonesia
Dr.Eng. Asep Saepuloh, Institut Teknologi Bandung, Indonesia
Dr.rer.nat. Wiwit Suryanto, S.Si., M.Si., Universitas Gadjah Mada, Indonesia
Dr. Arif Ismul Hadi, M.Si., Universitas Bengkulu, Indonesia
Dr. Eng. Yunus Daud, Dipl.Geotherm.Tech., M.Sc., Universitas Indonesia, Indonesia
Dr. Syukri Surbakti, Universitas Syiah Kuala, Indonesia
Ir. Dida Kusnida, M.Sc., R&D Centre for Marine Geology, Indonesia
Imam Setiadi, S.Si., M.T., R&D Centre for Marine Geology, Indonesia
Drs. Eddy Supriyana, M.Si., Universitas Padjajaran, Indonesia
Herning Dyah Kusuma W., M.Eng., Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, Indonesia
Rahmadi Hidayat, S.T., M.Eng., University of Wollongong, Australia
Tri Winarno, S.T., M.Eng., Universitas Diponegoro, Indonesia
M. Haris Miftakhul Fajar, S.T., M.Eng., Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia
M. Firman Gazhali, S.Pd., M.T., Universitas Lampung, Indonesia
Normansyah, S.Si., M.Si., PT. PHE ONWJ, Indonesia
Rian Amukti, S.Si., M.Sc., LIPI, Indonesia



Jurnal Geofisika Eksplorasi (JGE)

TABLE OF CONTENTS

- 164 **Pemodelan Seismik Pada Struktur Geologi Kompleks Menggunakan Metode *Common Reflection Surface (CRS)*, I. Dani, M.R. Sule**
- 178 **Analisis Morfologi Fisik Kaldera Masurai Jambi Menggunakan Citra Satelit Resolusi Tinggi, Y.M. Said, H.W., Utama**
- 191 **Pemisahan Anomali Gayaberat Daerah Lampung Menggunakan *Bidimensional Empirical Mode Decomposition (BEMD)*, G.M. Ekawati**
- 202 **Struktur Kerak Bumi Di Jawa Timur Berdasarkan Analisis Fungsi Penerima Teleseismik, P. Ariyanto, M. Sidiqa, B. Pranata, B.S. Prayitno**
- 226 **Interpretasi Struktur Geologi Pada Area *Geopark Ciletuh* Dengan Analisis Derivatif Data Gayaberat *GGMPLUS*, A.I. Panggabean, Iskandarsyah, W. Jhanesta**
- 238 **Analisis Kerentanan Lereng Lokasi Pembangunan Bendungan Bener Kabupaten Purworejo, D.J. Sasangka, Suhardi, D.P. Riyanto, D. Insani, C. Dewi**

PEMODELAN SEISMIK PADA STRUKTUR GEOLOGI KOMPLEKS MENGGUNAKAN METODE COMMON REFLECTION SURFACE (CRS)

SEISMIC MODELLING IN COMPLEX GEOLOGICAL STRUCTURES USING COMMON REFLECTION SURFACE (CRS) METHOD

Ilham Dani^{1*}, R. Mohammad Rachmat Sule²

¹Teknik Geofisika, Universitas Lampung

²Teknik Geofisika, Institut Teknologi Bandung

Received: 2021, April 30th

Accepted: 2021, September 5th

Keyword:

Common Reflection Surface;

Ray Tracing;

Norsar 2D;

Complex geological structure;

Fur Knudeklint.

Correspondent Email:

ilham.dani0917@eng.unila.ac.id

How to cite this article:

Dani, I., & Sule, M.R. (2021).

Pemodelan Seismik Pada

Struktur Geologi Kompleks

Menggunakan Metode

Abstrak. Pemodelan seismik merupakan tahap penting untuk memahami respon bawah permukaan bumi terhadap gelombang seismik yang digambarkan dalam bentuk energi seismik refleksi. Walaupun saat ini teknologi pengolahan data seismik telah meningkat dengan pesat, ketidakakuratan posisi reflektor dalam penampang seismik yang dihasilkan tetap saja sering ditemukan, terutama pada daerah dengan struktur geologi kompleks. Model geologi struktur kompleks pada penelitian ini mengacu pada arsitektur glasiotektonik di daerah Fur Knudeklint, Denmark yang memiliki banyak patahan dan lipatan dengan skala kecil. Hasil simulasi perambatan gelombang dengan metode penjalaran sinar dilakukan dari dua arah akuisisi berbeda menggunakan perangkat lunak Norsar 2D untuk mendapatkan seismogram sintetik. Data yang dihasilkan kemudian digunakan sebagai masukan untuk pengolahan data seismik secara konvensional maupun menggunakan metode *Common Reflector Surface (CRS) Stack*. Hasilnya menunjukkan bahwa akuisisi data dari arah *foot wall* memberikan citra reflektor yang lebih representatif dibandingkan dari arah sebaliknya. Penegasan kualitas reflektor terlihat jelas di tiga area utama, yaitu CDP 20-100, CDP 120-180 dan CDP 160-330. Dengan demikian, metode *CRS Stack* berhasil merekonstruksi reflektor-reflektor berupa lipatan kecil dan perlapisan tipis pada struktur geologi kompleks dengan kualitas lebih baik dibandingkan metode konvensional.

Abstract. *Seismic modeling is important in understanding the subsurface*

Common Reflection Surface (CRS). *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 07(03), 164-177.

© 2021 JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi). This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

response to seismic waves described in terms of reflected seismic energy. Although seismic data processing technology has improved rapidly, inaccuracy of reflectors position in the resulting seismic section is still often found, especially in areas with complex geological structures. This study's complex geological structure model refers to the glaciotectionic architecture in the Fur Knudeklint, Denmark, which has many faults and folds on a small scale. The simulation of wave propagation using the ray tracing method was carried out from two different acquisition directions using Norsar 2D software to obtain synthetic seismograms. The resulting data is then used as input data for conventional seismic data processing and uses the Common Reflector Surface (CRS) Stack method. The results show that data acquisition from the footwall direction provides a more representative reflector image than the opposite direction. Affirmation of reflector quality is visible in three main areas: CDP 20-100, CDP 120-180, and CDP 160-330. Thus, the CRS stack method succeeded in reconstructing reflectors in small folds and thin layers on complex geological structures with better quality than conventional ones.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi akuisisi dan pengolahan data seismik refleksi saat ini telah memungkinkan untuk mendapatkan citra kondisi bawah permukaan dengan lebih baik dan akurat. Namun pada kondisi tertentu, seperti pada struktur geologi kompleks, pengolahan data seismik masih banyak memiliki ketidakpastian yang membatasi keakuratan pencitraan kondisi bawah permukaan akibat adanya fenomena difraksi dan lapisan-lapisan miring dan melengkung (Nainggolan & Subaryah, 2014). Pemilihan metode *stacking* yang tepat pada pengolahan data seismik akan sangat menentukan kualitas penampang seismik yang dihasilkan (Ruckemann, 2012).

Terdapat tiga metode *stacking* data yang umum digunakan untuk meningkatkan rasio S/N, yaitu: *Common Mid-Point* (CMP), *Common Reflection Point* (CRP) dan *Common Reflection Surface* (CRS). *CMP stacking* cukup ampuh untuk data dengan distribusi *offset* reguler pada interval konstan dalam *Common Depth Point* (CDP) *gathers*, namun kualitas penyebaran titik refleksi menurun pada reflektor miring. Kualitas titik refleksi pada lapisan miring kemudian dapat ditingkatkan

dengan mengaplikasikan *Dip Moveout Correction* (DMO) pada metode CRP *stacking* (Coimbria dkk., 2016; Yilmaz & Claerbout, 1980). Bagaimanapun, metode CRP *stacking* tidak mampu mengembalikan posisi reflektor yang melengkung atau akibat ketidakhomogenan lapisan. Müller (1998) dan Mann dkk. (1999) kemudian mempopulerkan metode CRS *stack* untuk mengatasi masalah pada reflektor melengkung atau ketidakhomogenan lapisan tersebut.

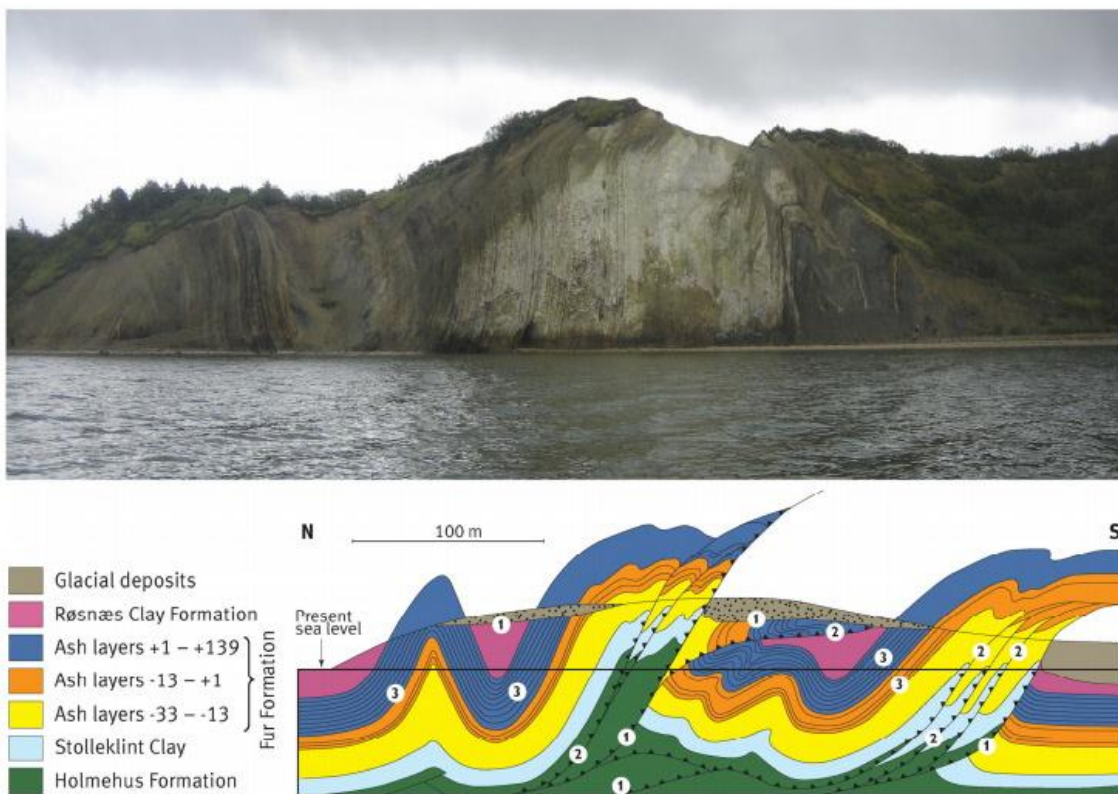
Pemodelan seismik dengan metode CRS dilakukan dengan mencari nilai atribut-atribut CRS, yaitu radius kelengkungan gelombang *normal incident point* (R_{NIP}), radius kelengkungan gelombang normal (R_N) dan sudut datang gelombang pantul (α). Ketiga atribut tersebut dapat diperoleh dengan beberapa teknik perhitungan, salah satunya adalah teknik langsung, yaitu dengan mencari nilai R_{NIP} , R_N dan α pada batas *aperture* tertentu. Teknik ini efektif mengembalikan posisi reflektor, namun memerlukan komputasi yang cukup rumit sehingga baru dapat diaplikasikan pada model geologi sederhana. Penelitian ini bertujuan untuk efektifitas metode CRS *stack* dengan teknik

langsung pada model struktur geologi yang lebih kompleks.

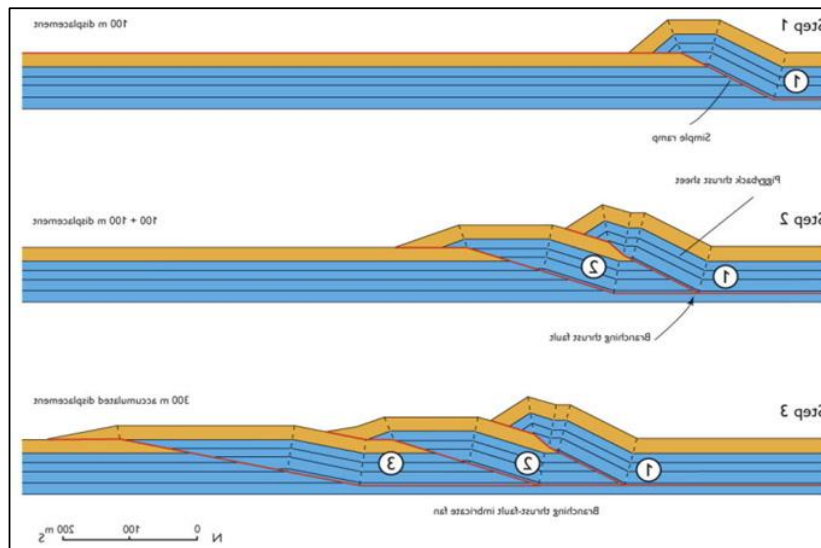
Struktur geologi kompleks yang akan dibahas dalam penelitian ini mengacu pada model geologi arsitektur glasiotektonik di daerah Fur Knudeklint, Denmark (Pedersen, 2014). Model ini memiliki karakteristik berupa lapisan-lapisan yang terkompresi dengan kuat pada skala yang kecil (**Gambar 1**). Model ini dipilih karena pembentukannya dipengaruhi oleh gaya kompresi yang dominan, dimana geologi struktur kompleks di Indonesia juga banyak dikontrol oleh gaya jenis ini, terutama di wilayah timur Indonesia seperti Pulau

Seram, Ambon, Halmahera dan lain-lain (Pownall dkk., 2013).

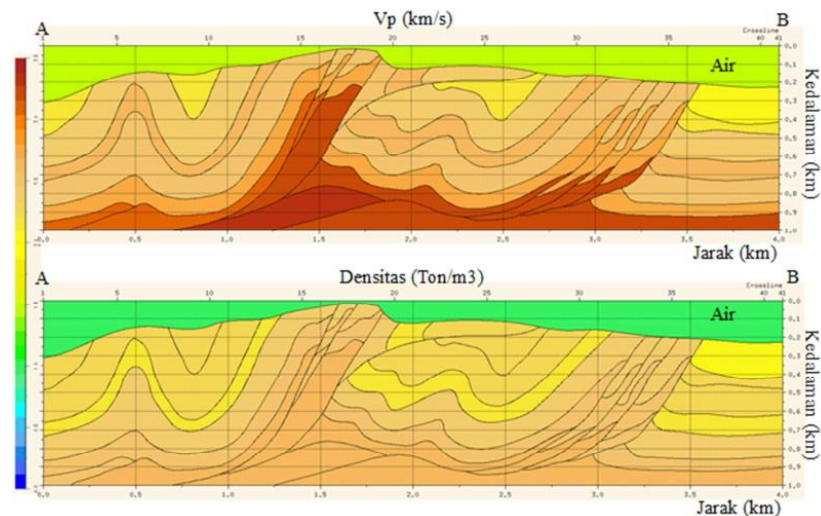
Gaya kompresi yang bekerja pada suatu lempeng dapat mengakibatkan terjadinya patahan pada lempeng tersebut yang dikenal dengan sesar naik. Salah satu bagian yang patah dapat menunjam ke bawah bagian yang lain atau terangkat ke atas (**Gambar 2**). Proses tersebut terjadi secara berulang-ulang sehingga menyebabkan terjadinya struktur geologi kompleks. Struktur geologi kompleks pada penelitian ini ditandai dengan gabungan beberapa sesar naik, sinklin dan antiklin dengan skala kecil (**Gambar 3**).



Gambar 1. Penampang struktur geologi kompleks di area Fur Knudeklint, Denmark, memperlihatkan lipatan dan patahan dalam skala kecil (Pedersen, 2014). Gambar atas memperlihatkan singkapan struktur geologi kompleks dan gambar bawah merupakan hasil rekonstruksi.



Gambar 2. Proses pembentukan struktur geologi kompleks yang dikontrol oleh gaya kompresi (Pedersen, 2014). Gaya kompresi menyebabkan patahan yang salah satu sisinya terangkat ke atas sisi lain (*step 1*). Proses tersebut terus terulang pada *step 2, 3* dan seterusnya.



Gambar 3. Model awal yang memperlihatkan model struktur kompleks.

Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan rekomendasi terhadap penentuan arah akuisisi data dan pemilihan metode *stacking* yang tepat untuk menghasilkan penampang seismik yang lebih baik pada area dengan struktur geologi kompleks. Rekomendasi ini penting untuk menekan ambiguitas reflektor yang dihasilkan agar pemetaan seismik pada daerah dengan

geologi struktur kompleks menjadi lebih efisien.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Penjalaran sinar (*ray tracing*) merupakan metode klasik dalam teori penjalaran gelombang yang telah digunakan selama bertahun-tahun dan dikenal memiliki banyak aplikasi praktis. Salah satu kelebihanannya

dibandingkan dengan metode lain seperti metode beda-hingga (*finite-difference*) adalah metode ini menghitung secara kuantitas jalur sinar dari sumber ke penerima tanpa menghitung solusi eikonal persamaan gelombang sehingga komputasinya menjadi lebih mudah (Antunes dkk., 2014). Penjalaran dapat diklasifikasikan sebagai solusi aproksimatif dari persamaan gelombang seismik dan berlaku untuk frekuensi tinggi (Lu dkk., 2012). Aspek teoritis sinar yang berkaitan dengan geometri sinar tersebut yang mengikuti persamaan gelombang refleksi atau transmisi dari hukum Snell.

Penjalaran merupakan metode pemodelan ke depan (*forward modeling*) yang bertujuan untuk mendapatkan seismogram sintetis dari model geologi yang diinginkan. Selanjutnya, seismogram sintetis tersebut digunakan untuk merekonstruksi model geologi dengan teknik pemodelan ke belakang (*inverse modelling*) menggunakan metode *CRS stack*.

Metode *CRS stack* adalah metode yang memanfaatkan tiga buah atribut gelombang seismik untuk membentuk kurva waktu penjalaran gelombangnya (Garabito dkk., 2012). Atribut-atribut gelombang tersebut adalah sudut kemiringan (α), jari-jari kelengkungan gelombang normal (R_N) dan jari-jari kelengkungan reflektor (R_{NIP}). Pada proses *CRS stacking*, data yang digunakan tidak hanya berasal dari satu titik CMP, melainkan melibatkan titik-titik CMP yang berada di sekitarnya, sehingga data yang digunakan lebih banyak.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Simulasi Penjalaran Sinar dan Metode Common Reflection Surface (CRS)

Berdasarkan geometrinya, penjalaran sinar dibagi menjadi dua bagian dasar, yaitu penjalaran sinar kinematik dan dinamik (Law & Trad, 2017). Penjalaran sinar kinematik menghitung jalur sinar (*ray path*) dan waktu

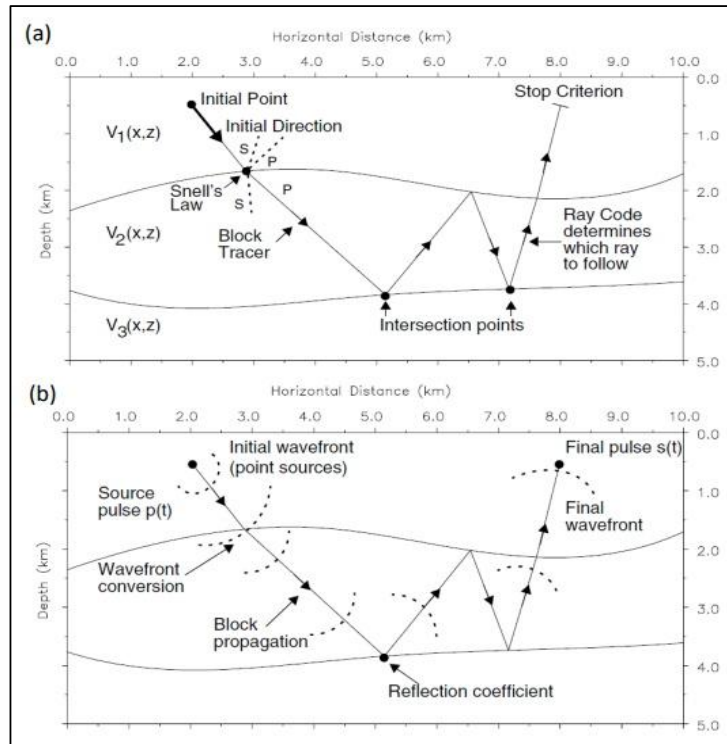
tempuh sepanjang jalur sinar tersebut (**Gambar 4a**). Dalam hal ini, pelacak sinar kinematik hanya membutuhkan kecepatan gelombang pada blok model seperti V_p dan/atau V_s , tergantung pada model gelombang yang diinginkan. Sedangkan, penjalaran sinar dinamis (**Gambar 4b**) menghitung sifat dinamis dari medan gelombang seismik seperti faktor geometris penyebaran, kelengkungan muka gelombang dan koefisien amplitudo sepanjang jalur sinar. Selain V_p dan V_s , pelacak sinar dinamis juga memanfaatkan fungsi densitas. Dengan menggunakan penjalaran sinar dinamis penuh, informasi yang diperoleh cukup untuk menghitung seismogram sintetis pada penerima yang terletak di dekat sinar.

Pada perangkat lunak Norsar 2D, hasil simulasi penjalaran sinar disimpan dalam bentuk spikeogram yang mengandung informasi waktu tempuh dan kode sinarnya. Dengan mengasumsikan pulsa sumber seismik $p(t)$, seismogram sintetis dapat dihitung dengan Persamaan 1.

$$s(t) = \sum U_i [p(t - T_i) \cos \varphi_i - g(t - T_i) \sin \varphi_i] \quad (1)$$

dimana U_i adalah total amplitudo dari kontribusi sinar ke- i , φ_i adalah sudut fase dan $g(t)$ adalah transformasi Hilbert dari pulsa sumber seismik $p(t)$.

Metode *CRS Stack* (Mann dkk., 1999; Müller, 1998) adalah teknik pencitraan seismik refleksi yang menghasilkan penampang *zero-offset*, yaitu tumpukan *trace* yang mana sumber dan penerima berada dalam batas-batas *aperture* tertentu di sekitar titik pusat x_0 . Tidak seperti metode konvensional CMP dan CRP yang mengasumsikan sinar dari sumber ke penerima dipantulkan oleh suatu titik di bawah titik CMP, metode CRS mengasumsikan bahwa sinar dari pasangan sumber dan penerima yang melewati reflektor melengkung dipantulkan oleh segmen-segmen reflektor.



Gambar 4. Elemen-elemen pada penjalaran sinar kinematis (a) dan dinamis (b) dari sumber (*source pulse*) ke penerima (*final pulse*).

Persamaan 1 secara matematis, kurva waktu tempuh CRS dapat diketahui sebagai orde kedua ekspansi Taylor berikut:

$$t_{hyp}^2(x_m, h) = \left[t_0 + \frac{2 \sin \alpha}{v_0} (x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \alpha}{v_0} \left[\frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right] \quad (2)$$

dimana t_0 dan x_0 adalah sampel waktu dan koordinat munculnya sinar normal pada setengah *offset* (h) sama dengan nol, $x_m - x_0$ merupakan *aperture* titik tengah dan v_0 merupakan kecepatan konstan di dekat permukaan. α adalah sudut datang gelombang pantul pada x_0 di permukaan, R_N adalah radius kelengkungan gelombang normal dan R_{NIP} adalah radius kelengkungan gelombang *normal incident point* (NIP). Metode CRS *stack* yaitu metode yang bertujuan mencari koherensi maksimal antara kurva waktu

tempuh data seismik dengan kurva waktu tempuh prediksi setelah nilai atribut CRS (α , R_N dan R_{NIP}) diketahui.

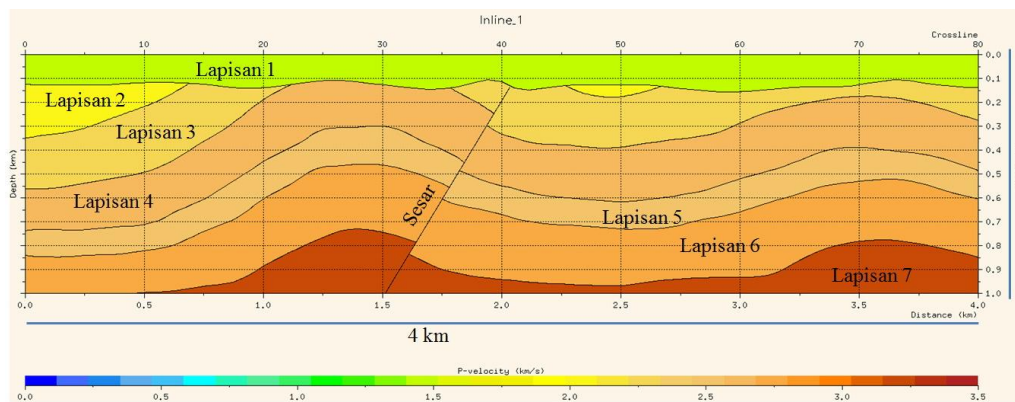
Terdapat dua teknik yang dapat digunakan untuk mencari nilai parameter CRS, yaitu metode bertahap dan metode langsung. Dalam penelitian ini, metode yang digunakan adalah metode langsung dimana proses pencarian atribut CRS dilakukan secara bersamaan pada satu set data yang besar dengan mencari nilai-nilai atribut yang memiliki tingkat koherensi yang tinggi (Sule dkk., 2013). Konsekuensinya, proses pencarian atribut CRS menjadi sangat lama karena banyaknya variasi atribut CRS yang dihitung secara bersamaan. Untuk mengatasi masalah itu, Lawrens dkk., 2015 telah membuat suatu algoritma yang memungkinkan komputasi pencarian atribut CRS dilakukan secara paralel untuk mempercepat waktu perhitungan.

3.2. Akuisisi Data Seismik Sintetik pada Model Lipatan dan Patahan

Model sederhana yang digunakan berupa tujuh lapisan bergelombang yang tersesarkan (**Gambar 5**), dimana lapisan pertama merupakan air ($V_s = 0$ km/s). Ketebalan masing-masing lapisan relatif sama secara lateral dengan struktur sinklin, antiklin dan sesar naik dibuat sebagai acuan untuk menganalisis hasil rekonstruksi seismik terhadap struktur-struktur dominan yang terdapat pada model kompleks. Setelah geometri model dan parameter elastik

ditentukan, kode sinar berupa refleksi P dipilih untuk dimulasi penjalaran sinar.

Konfigurasi sumber-penerima yang digunakan dalam penelitian ini adalah *common shot* dimana posisi sumber dan penerima di permukaan air mengikuti arah sumber. Jumlah sumber yaitu 401, jumlah penerima 48 buah, jarak antar sumber dan antar penerima 10 m, *sampling rate* yang digunakan 2 ms dan panjang rekaman 1 s serta tanpa penambahan *noise*. Dua skenario akuisisi data diujicobakan yaitu akuisisi arah AB (skenario 1) dan BA (skenario 2).



Gambar 5. Model sederhana berupa lapisan-lapisan batuan yang memperlihatkan struktur lipatan dan sesar naik.

3.3. Pengolahan Data Seismik Refleksi

Pengolahan data seismik adalah suatu proses yang dilakukan untuk mengubah data seismik lapangan atau hasil simulasi numerik menjadi suatu bentuk penampang seismik. Data seismik belum dapat merepresentasikan kondisi bawah permukaan yang sebenarnya karena masih banyak faktor yang merusak sinyal seismik seperti *noise*, pengulangan (*multiple*) dan sebagainya. Secara umum pengolahan data seismik konvensional pada penelitian ini mengikuti langkah-langkah standar seperti *reformatting*, *amplitude recovery*, filter frekuensi, analisa kecepatan dan koreksi NMO/DMO sehingga diperoleh hasil *stack* konvensional dengan metode CRP seperti **Gambar 6c**. Data sintetik yang

digunakan merupakan hasil simulasi penjalaran sinar menggunakan perangkat lunak Norsar 2D, baik untuk model sederhana maupun model struktur geologi kompleks.

Hasil pengolahan data seismik secara konvensional pada dasarnya memperlihatkan struktur bergelombang yang cukup mirip seperti model asalnya. Namun, di beberapa bagian juga ditemukan reflektor-reflektor artefak yang tidak sesuai dengan model awal dengan amplitudo cukup kuat. Fenomena itu terlihat terutama pada zona 1 yang merupakan zona kemiringan $> 30^\circ$ dan pada zona 2 yang merupakan zona sesar naik. Keberadaan artefak-artefak tersebut tentu akan mengurangi kualitas penampang seismik dan mempengaruhi proses interpretasi. Permasalahan lainnya terlihat pada

penampang yang berasal dari skenario 1 (**Gambar 6a**), dimana sesar yang terekonstruksi pada zona 2 justru seolah-olah menjadi sesar normal, sementara pada skenario 2 (**Gambar 6b**) rekonstruksi sesar naik cukup berhasil. Hal ini dapat terjadi karena adanya faktor iluminasi sinar yang berbeda dari kedua skenario tersebut. Dengan demikian, pemodelan seismik untuk model struktur geologi kompleks ini menggunakan skenario akuisisi yang kedua karena model didominasi oleh sesar naik dengan arah kemiringan yang sama dengan model sederhana.

3.4. Pencarian Atribut CRS: α , R_N dan R_{NIP}

Pencarian atribut CRS dengan metode langsung berdasarkan algoritma yang dibuat oleh Lawrens dkk. (2015). Prinsipnya, pencarian atribut CRS tersebut mengikuti langkah-langkah pada **Gambar 7**. Pertama, data seismik yang telah diurutkan dalam domain CMP *gather* dan data rentang nilai parameter atribut α , R_N dan R_{NIP} disiapkan untuk menghitung waktu tempuh gelombang (Persamaan 2). Dalam hal ini, rentang nilai parameter atribut CRS yang digunakan adalah seperti pada **Tabel 1**. Penentuan rentang nilai atribut inisial ini dilakukan dengan mempertimbangkan banyaknya perhitungan dan memori komputer.

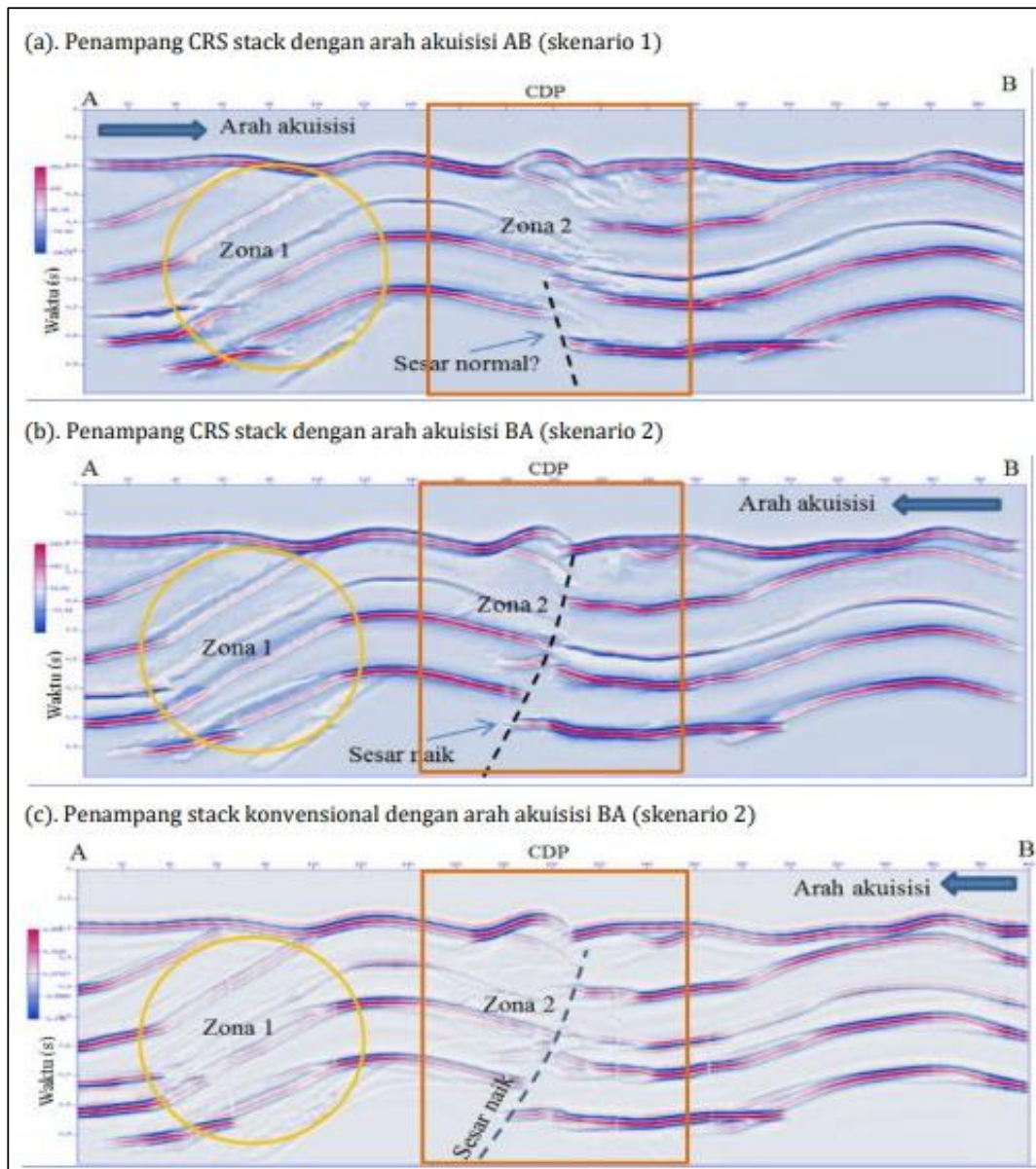
Kedua, satu sampel t_0 diambil pada tiap *trace* CDP, kemudian menghitung nilai koherensi sesuai dengan rentang nilai parameter atribut α , R_N dan R_{NIP} masukan yang digunakan. Pada saat perhitungan koherensi, dilakukan juga perbandingan nilai koherensi yang dihasilkan untuk tiap-tiap atribut. Atribut yang menghasilkan nilai koherensi paling

tinggi akan disimpan sehingga setiap satu sampel waktu t_0 hanya memiliki satu nilai α , R_N dan R_{NIP} .

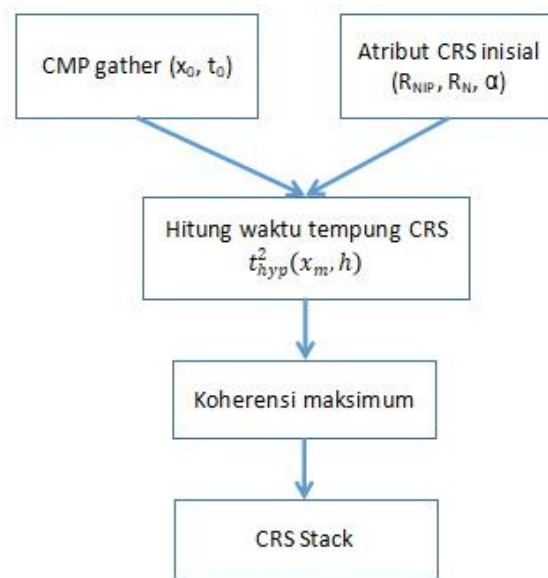
Selanjutnya, dua langkah di atas diulangi untuk seluruh *trace* CDP dan t_0 , sehingga terbentuk penampang atribut α , R_N dan R_{NIP} dalam domain CDP. Selain itu, proses pencarian atribut dengan metode langsung ini juga menghasilkan penampang CRS *stack* sesuai skenario akuisisi yang digunakan.

Dari **Gambar 6a** dan **6b**, terlihat bahwa tampilan penampang seismik menjadi lebih mirip dengan model asalnya. Reflektor dengan kemiringan $>30^\circ$ sudah terlihat lebih baik walaupun amplitudonya masih lemah. Walaupun artefak masih muncul di beberapa bagian, namun kuantitasnya sudah berkurang secara signifikan dibandingkan dengan hasil *stacking* konvensional. Untuk merekonstruksi sesar naik, arah akuisisi dari B ke A (skenario 2) terlihat lebih representatif dibandingkan dari arah sebaliknya. Oleh karena itu, skenario 2 dapat dipilih untuk diaplikasikan pada model struktur geologi kompleks.

Perbedaan signifikan terlihat antara hasil *stacking* menggunakan metode CRS dengan konvensional. Menggunakan skenario dan parameter akuisisi yang sama, reflektor hasil CRS terlihat lebih tegas dan jelas dibandingkan hasil *stacking* konvensional (**Gambar 6b** dan **6c**). Di zona 1 penampang konvensional, reflektor dengan sudut kemiringan yang besar terlihat sangat lemah dibandingkan dengan penampang CRS. Hal yang sama juga terlihat di zona 2. Ini membuktikan bahwa metode CRS lebih bisa mengembalikan posisi reflektor secara lebih baik.



Gambar 6. Hasil *stacking* dengan metode CRS pada model sederhana berdasarkan arah akuisisi. Pada skenario akuisisi arah A-B, citra sesar di zona 2 tidak merepresentasikan kondisi sebenarnya (a), sedangkan pada skenario akuisisi dengan arah B-A (a dan b) berhasil merepresentasikan sesar naik. Metode *stack* konvensional (c) kurang berhasil menampilkan reflektor miring di zona 1 dibandingkan metode CRS.



Gambar 7. Diagram alir dalam pencarian nilai atribut-atribut CRS.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengetahuan tentang struktur geologi sangat berpengaruh terhadap pemilihan skenario dan parameter akuisisi data seismik (Long & Hoffmann, 2003; Saffarzadeh dkk., 2018). Untuk struktur geologi yang dikontrol oleh sesar naik, akuisisi data dari arah depan bidang sesar atau *hanging wall* (skenario 1) justru menghasilkan penampang seismik yang menyerupai sesar normal. Sebaliknya, jika akuisisi data dilakukan dari arah *foot wall* (skenario 2), sesar naik dapat digambarkan dengan lebih baik terutama jika diproses dengan metode CRS. Hal itu disebabkan karena pada skenario 1, sebagian iluminasi sinar tidak direfleksikan oleh reflektor di belakang bidang sesar karena langsung direfleksikan oleh bidang sesar itu sendiri (**Gambar 8a**). Fenomena yang sama juga terjadi pada struktur kompleks (**Gambar 8c**) dimana sinar dari arah *foot wall* tidak sampai pada lapisan yang paling dalam. Sementara pada skenario 2, sinar-sinar dapat direfleksikan oleh reflektor baik di depan bidang sesar maupun di belakang bidang sesar (**Gambar**

8b). Perbedaan ini sesuai dengan karakter gelombang seismik yang akan menunjukkan struktur berbeda pada skala dan arah lintasan yang berbeda pula (Wason, 2017).

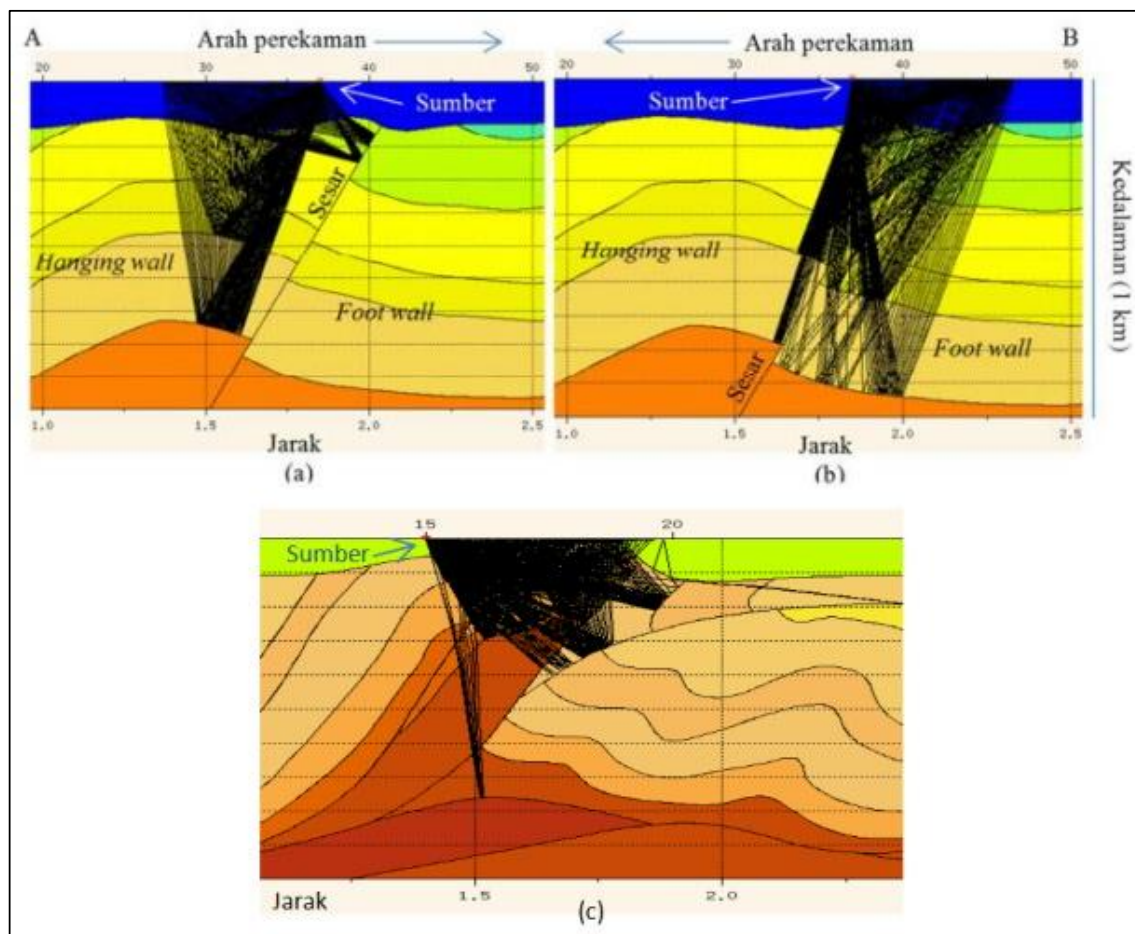
Simulasi penjalaran sinar untuk akuisisi data seismik pada model struktur geologi kompleks ini juga menggunakan parameter akuisisi yang sama dengan percobaan sebelumnya, tetapi hanya dilakukan pada satu skenario akuisisi, yaitu arah dari B ke A (skenario 2). Hasil *stack* secara konvensional dari model struktur geologi kompleks terlihat belum menunjukkan hasil yang cukup baik. Beberapa reflektor di bawah reflektor tegas (dasar laut) terlihat tegas pada reflektor yang relatif datar, namun pada daerah dengan reflektor yang kompleks atau kemiringan yang besar (>30°) amplitudo masih lemah. Metode CRS juga efektif untuk meningkatkan kualitas citra pada seismik laut (Daruartati dkk., 2015).

Penampang CRS *stack* juga diperoleh dengan menggunakan rentang nilai parameter yang sama seperti **Tabel 1** sebagai *input*, sehingga diperoleh penampang CRS *stack* seperti **Gambar 9a**. Pada gambar tersebut, penampang seismik CRS *stack* dengan arah

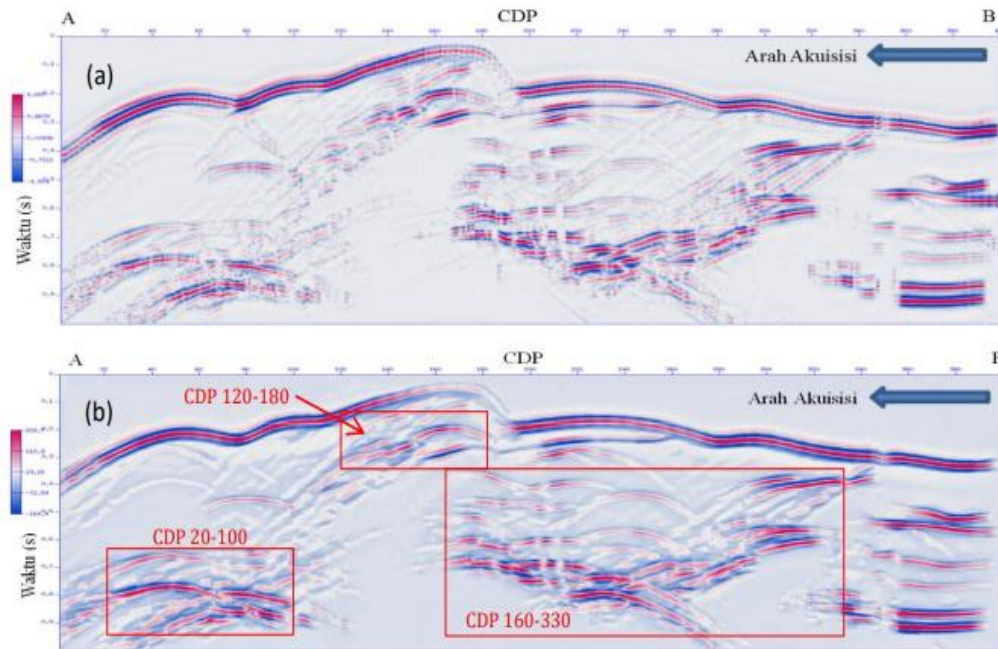
akuisisi dari B ke A memperlihatkan kualitas reflektor yang lebih baik dibandingkan dengan penampang hasil *stack* konvensional dengan metode CRP (**Gambar 9b**). Hal tersebut terlihat pada beberapa bagian yang ditunjukkan oleh tanda panah dimana reflektor pada penampang hasil CRS *stack* terlihat lebih menerus dibandingkan dengan hasil metode konvensional.

Metode CRS tidak bergantung pada model kecepatan seperti halnya pada metode konvensional, melainkan bergantung pada

atribut CRS itu sendiri (Rukmana & Minarto, 2016) sehingga diperlukan proses migrasi domain waktu untuk menghilangkan efek difraksi (Nainggolan & Subarsyah, 2014). Pada penelitian ini, pencarian atribut CRS dilakukan secara langsung dimana atribut CRS diperoleh dengan mencari nilai koherensi maksimum atas suatu perkiraan nilai atribut pada persamaan kurva waktu tempuh CRS. Walaupun efek difraksi masih ada karena tidak melewati proses migrasi, kualitas reflektor reflektor terlihat lebih tegas.



Gambar 8. Ilustrasi penjalaran sinar di sekitar sesar naik pada model sederhana (a dan b), gambar a arah perekaman dari belakang bidang sesar, gambar b arah perekaman dari depan bidang sesar dan pada model struktur geologi kompleks (c).



Gambar 9. Perbandingan penampang seismik dari model struktur geologi kompleks menggunakan metode *stacking* konvensional CRP (a) dan CRS (b) dengan skenario akuisisi yang sama (arah B-A). Area kotak merah menunjukkan peningkatan kualitas reflektor yang signifikan.

Tabel 1. Rentang nilai parameter atribut CRS yang digunakan sebagai inisial.

Parameter	Min.	Maks.	Delta
α	-60	60	1
RN	-20.000	20.000	2.000
RNIP	25	1000	25

Penegasan kulit reflektor dapat terlihat pada CDP ke 20-100 dengan $t = 0.65 - 0.95$ s, CDP ke 120-180 dengan $t = 0.15 - 0.35$ s dan sebagian besar reflektor pada CDP ke 160-330 (ditandai dengan kotak merah pada **Gambar 9b**). Di beberapa bagian masih terlihat reflektor yang hilang (lemah) diakibatkan oleh struktur lipatan yang rapat sehingga reflektor pada daerah-daerah tersebut tidak terekonstruksi dengan maksimal. Hal ini berkaitan dengan pemilihan rentang nilai dan ukuran parameter CRS yang digunakan untuk mencari nilai koherensi maksimum masih cukup besar (**Tabel 1**) untuk mempermudah komputasi. Rentang nilai yang besar dengan

ukuran parameter CRS yang lebih kecil akan meningkatkan *S/N ratio*, namun memerlukan waktu perhitungan yang lebih lama (Sule dkk., 2013).

5. KESIMPULAN

Struktur geologi sangat berpengaruh terhadap pemilihan skenario akuisisi data seismik. Untuk struktur geologi yang dikontrol oleh sesar naik, arah akuisisi yang tepat adalah dari belakang bidang sesar (*foot wall*) ke arah depan bidang sesar (*hanging wall*). Arah akuisisi yang salah akan mengakibatkan sesar naik pada model awal seolah-olah menjadi sesar normal setelah dilakukan pengolahan data seismik. Hal itu diakibatkan karena sinar yang dipancarkan di atas bidang sesar tidak mengenai reflektor pada kedua sisi bidang sesar. Skenario akuisisi yang dipilih pada penelitian ini telah terbukti berhasil merekonstruksi model geologi struktur kompleks di daerah Fur Knudeklint. Skenario

tersebut juga dapat diaplikasikan untuk lapangan-lapangan di Indonesia yang memiliki struktur geologi kompleks yang dikontrol oleh sesar naik.

Pada percobaan dengan model sederhana, reflektor-reflektor miring dan melengkung dapat digambarkan dengan sangat baik dengan metode CRS. Artefak-artefak berupa *fault shadow* yang banyak dijumpai pada penampang seismik dengan metode *stack* konvensional dapat dihilangkan secara signifikan.

Pengolahan data seismik dengan menggunakan metode CRS *stack* pada struktur geologi kompleks terbukti dapat menghasilkan reflektor dengan kualitas yang lebih baik secara visual dibandingkan dengan metode konvensional. Walaupun tidak terlalu sukses merekonstruksi reflektor-reflektor dengan tingkat kelengkungan tinggi, namun metode ini cukup efektif dalam meningkatkan kualitas reflektor. Dengan demikian, metode ini perlu digunakan untuk mengolah data seismik pada data lapangan di Indonesia yang memiliki struktur lipatan dan patahan dengan skala kecil agar pengolahan data seismik menjadi lebih efisien.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada *Center of Excellence for Carbon Capture and Sequestration or Carbon Capture Sequestration and Utilization in Indonesia* (CoE CCS/CCUS Indonesia) yang telah menyediakan tempat bagi penulis untuk menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Antunes, A. J. M., Leal-Toledo, R. C. P., Filho, O. T. S., & Toledo, E. M. (2014). Finite Difference Methods for Solving Acoustic Wave Equation using Locally Adjustable Time-Steps. *Journal Procedia Computer Science, Elsevier*, 29, 627–636.
- Coimbra, T. A., Facciopieri, J. H., Rueda, D. S., & Tygel, M. (2016). Common-Reflection-Point Time Migration. *Studia Geophysica Et Geodaetica*, 60, 500–530. <https://doi.org/doi:10.1007/s11200-015-0392-1>.
- Daruartati, H., Setyawan, A., & Kusuma, I. A. (2015). Aplikasi Metode Common Reflection Surface (CRS) untuk Meningkatkan Hasil Stack Data Seismik Laut 2D Wilayah Perairan “Y.” *Youngster Physics Journal*, 4(4), 291–298.
- Garabito, G., Stoffa, P. L., Lucena, L. S., & Cruz, J. C. R. (2012). Part I — CRS Stack: Global Optimization of The 2D CRS Attributes. *Journal of Applied Geophysics. Elsevier*, 85, 92–101.
- Law, B., & Trad, D. (2017). *Comparison of Traveltime Computation and Ray Tracing Methods*.
- Lawrens, F., Sule, M. R., & Afnimar. (2015). Parallel Computation for Speedup The Computation Time of Direct Determination of Common-Reflection-Surface (CRS) Attribute. *Proceedings of the 12th SEGJ International Symposium, Tokyo, 18-20 November 2015*.
- Long, A. S., & Hoffmann, J. (2003). 3D Strike vs Dip Streamer Shooting Direction Comparison. *ASEG Extended Abstracts*, 2, 1–4. <https://doi.org/DOI:10.1071/ASEG2003ab099>
- Lu, B., Darmon, M., & Potel, C. (2012). Stochastic Simulation of The High-Frequency Wave Propagation in a Random Medium. *Journal of Applied Physics*, 112(5), 1–13. <https://doi.org/doi:10.1063/1.4748274>
- Mann, J., Jager, R., Müller, T., Höcht, G., & Hubral, P. (1999). Common-Reflection Surface Stack- a Real Data Example. *Journal of Applied Geophysics*, 42, 301–318.
- Müller, T. (1998). Common Reflection Surface Stack Versus NMO/Stack dan NMO/DMO/Stack. *60th Meeting Europe Association Exploration Geophysics, Expanded Abstracts*.
- Nainggolan, T. B., & Subarsyah. (2014). *Suppression Diffraction Effects Using Kirchoff Pre-Stack Time Migration on 2D Seismic Multichannel Data at Flores Sea*.
- Pedersen, S. A. S. (2014). Architectures of Glaciotectonic Complexes. *Geosciences*, 4, 269–296.
- Pownall, J., Hall, R., & Watkinson, I. M. (2013). Extreme Extension Across Seram and Ambon, Eastern Indonesia: Evidence for Banda Slab

- Rollback. *Solid Earth Discussions, Elsevier*, 5(1), 525–560.
- Ruckemann, C. . (2012). Comparison of Stacking Methods Regarding Processing and Computing of Geoscientific Depth Data. *Proceeding in The 4th International Conference on Advance Geographic Information Syste, Aplication and Services, Valencia, Spain, January 30 - February 4, 2012*.
- Rukmana, K., I., & Minarto, E. (2016). Imaging Surface Menggunakan CRS: Studi Kasus Pada Steep Dip Reflector dan Data Low Fold. *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, 5(2), 94–98.
- Saffarzadeh, S., Javaherian, A., Hasani, H., & Talebi, M. A. (2018). Improving Fault Image by Determination of Optimum Seismic Survey Parameters Using Ray-Based Modeling. *Journal of Geophysics and Engineering*, 15(3), 668–680.
- Sule, M. R., Zaky, A., Lawrens, F., & M., J. (2013). Direct Determination of Common-Reflection-Surface Attributes. *Proceedings of the 11th SEGJ International Symposium, Yokohama, Japan, 18-21 November 2013*.
- Wason, H. (2017). *Simultaneous-Source Seismic Data Acquisition and Processing with Compressive Sensing*. University of British Columbia.
- Yilmaz, & Claerbout. (1980). Prestack Partial Migration., *Geophysics*, 45, 1753–1779.