



Pencitraan Bawah Permukaan Cekungan Majalengka: Analisis Data Gayaberat Untuk Eksplorasi Hidrokarbon pada Cekungan Sedimen Dengan Tutupan Vulkanik

Hidayat, Shofi I. Hawan dan Marjiyono

Pusat Survei Geologi
Jl Diponegoro no. 57, Bandung, Indonesia

ABSTRAK

Artikel Info:

Naskah Diterima:
20 Desember 2023

Diterima setelah
perbaikan:
24 Januari 2024

Disetujui terbit:
31 Januari 2024

Kata Kunci:

redesain

electric submersible pump

mengandung gas

wiggins

coltharp

Sub-Cekungan Majalengka dikategorikan sebagai cekungan sedimen dengan penemuan hidrokarbon. Penemuan rembesan migas di area ini merupakan bukti keberadaan batuan induk yang matang di Sub-Cekungan Majalengka. Kurangnya kualitas pencitraan bawah permukaan dari seismik refleksi akibat keberadaan endapan vulkanik menjadikan kawasan ini masih belum dieksplorasi lebih jauh. Survei non-seismik seperti metode gayaberat merupakan salah satu alternatif yang dapat digunakan untuk mengetahui kondisi geologi bawah permukaan pada kawasan ini. Survei gayaberat terdiri dari 398 titik pengukuran yang mencakup area studi seluas 55 x 60 km persegi dan dilengkapi dengan pengambilan data posisi dan ketinggian menggunakan Differential Global Positioning System (DGPS) untuk reduksi data. Berdasarkan anomali gayaberat, keberadaan dari Bogor Trough yang dipisahkan oleh suatu tinggian berarah relatif barat laut – tenggara berhasil dicitrakan. Beberapa informasi sumur produksi yang diikatkan dengan data gayaberat menunjukkan bahwa keberadaan anomali tinggi di bagian utara berkorelasi dengan sumur-sumur produksi di kawasan ini, sehingga keberadaan anomali tinggi yang memisahkan anomali rendah pada Bogor Trough menjadi kawasan yang menarik untuk dilakukan studi lanjutan. Pemodelan berupa sayatan vertikal dari data gayaberat dilakukan dengan pendekatan pemodelan inversi dan menunjukkan korelasi yang sangat baik dengan penampang seismik refleksi 3D yang ada di ujung bagian utara area survei. Analisis derivative dilakukan untuk penafsiran penampang vertikal dan mengindikasikan keberadaan unexplored area yang memiliki properti fisis yang identik dengan area yang telah terbukti memproduksi minyak.

ABSTRACT

Majalengka Sub-Basin is categorized as a sedimentary basin with hydrocarbon discovery. The presence of oil/gas seep in this area is strong evidence for active mature source rocks in Majalengka Sub-Basin. Unfortunately, the poor quality of seismic reflection imaging caused by volcanic deposits makes this place "a terra incognita" for further study. The non-seismic method i.e. gravity can be an alternative method to obtain more information on subsurface geological imaging related to the petroleum system in this area. The gravity survey, complemented by Differential Global Positioning System (DGPS) measurements, consists of 398 stations that covered 55 x 60 km square area. Through gravity anomaly, it is obtained that the presence of Bogor Trough is separated by NW – SE high anomaly trend. All high gravity anomaly regions are well correlated with the distribution of oil production wells in the northern part of the study area. Furthermore, the identical high anomaly regions in the southern part of the study area could also be interesting areas for oil and gas discovery in the future, considering those are prolific for oil production in the northern part of the study area. In addition to lateral analysis, the vertical sections were

Korespondensi:

E-mail: hidayathidayat01@gmail.com (Hidayat)

made through calculation of inverse modelling approach which is well suited to available 3D seismic section in the northern part of study area. Finally, derivative analysis are performed for further interpretation of gravity vertical sections and delineated unexplored regions within the study area which are characterized by identical physical properties to areas that have been proven to produce oil.

PENDAHULUAN

Sub-Cekungan Majalengka merupakan bagian timur dari Cekungan Bogor yang dikategorikan sebagai cekungan dengan penemuan hidrokarbon dan terletak di Provinsi Jawa Barat bagian utara (Pusat Survei Geologi, 2023), Sub-Cekungan Majalengka juga merupakan cekungan tempat pemboran pertama di Indonesia, yaitu pada sumur Tjibodas Tanggat-1 (Maja-1) yang dibor dan mulai berproduksi pada tahun 1871 oleh Jan Reerink, seorang berkebangsaan Belanda. Sumur produksi sedalam 125 kaki tersebut berhasil mengangkat sekitar 6000 liter minyak bumi pada saat itu. Saat ini, beberapa sumur produksi telah beroperasi di kawasan Jawa Barat Utara, selain itu ditemukan pula beberapa rembesan migas oleh para peneliti di sekitar area studi yang membuktikan adanya sistem perminyakan (*petroleum system*) aktif di kawasan Sub-Cekungan Majalengka.

Kawasan ini dilewati oleh sesar geser manganan (*dextral strike slip fault*) Pamanukan – Cilacap yang terindikasi dari analisis data gayaberat regional dan ditandai dengan munculnya manifestasi berupa rembesan migas dan juga *gas smell* (Satyana, 2007) yang memanjang dari Cilacap hingga Pamanukan. Keberadaan sesar geser manganan ini juga dibuktikan oleh adanya *event* gempa yang terekam dengan pola distribusi barat laut – tenggara oleh jaringan seismograf milik Pusat Survei Geologi (Hidayat dkk, 2021).

Studi terdahulu telah membuktikan keberadaan batuan induk (*source rock*) yang potensial di sekitar Sub-Cekungan Majalengka berdasarkan uji kekayaan material organik dan kematangannya. Analisis biomarker dari beberapa sampel rembesan minyak dan ekstrak dari sampel batuan Formasi Cinambo menunjukkan adanya keberadaan *Oleanane* (OL) yang mengindikasikan migas berasal dari lingkungan pengendapan *fluvial – deltaic* dan terendapkan pada masa Kapur – Eosen (Praptisih, 2018), namun batuan tertua yang tersingkap di area ini adalah Formasi Cinambo yang terendapkan pada masa Oligosen Akhir – Miosen Awal (Djuri, 1995), sehingga tidak ada sampel batuan berusia Kapur – Eosen yang dapat

disampel dan dianalisis lebih lanjut. Berdasarkan tahapan dari tektonostratigrafi pada kebanyakan cekungan sedimen di Pulau Jawa dan Sumatra, batuan induk kemungkinan terendapkan pada masa *synrift* yang terjadi pada masa Kapur – Oligosen (Pratiwi, 2021), sehingga pemodelan geologi bawah permukaan menjadi hal yang penting dalam upaya mendelineasi zona tempat terendapkannya batuan induk berusia Kapur - Eosen di Sub-Cekungan Majalengka.

Untuk memberikan informasi geologi bawah permukaan, dibutuhkan data geofisika yang *reliable* untuk dapat menembus endapan vulkanik hingga kedalaman yang cukup dalam untuk memberikan informasi seperti: kedalaman batuan dasar (*basement*) yang berimplikasi dengan ketebalan sedimen, dan keberadaan struktur geologi yang kemungkinan dapat menjadi tempat akumulasi hidrokarbon di bawah permukaan. Metode seismik refleksi 2D yang terdapat di sekitar area penelitian tidak dapat memberikan informasi tersebut karena kurangnya kualitas data seismik yang diduga akibat keberadaan endapan vulkanik yang cukup tebal, sedangkan data seismik 3D yang memiliki resolusi lebih baik hanya terdapat pada bagian utara dari area penelitian, sehingga potensi migas di bagian selatan dari Sub-Cekungan Majalengka belum terpetakan secara baik.

Metode geofisika nonseismik seperti gayaberat (*gravity*) dapat digunakan sebagai alternatif dalam memberikan informasi umum terkait hal tersebut. Berdasarkan data gayaberat, keberadaan struktur geologi bawah permukaan dapat didelineasi dengan menggunakan analisis *derivative* yang cukup populer digunakan oleh banyak peneliti sebelumnya (Rosid & Siregar, 2023), sedangkan pemodelan bawah permukaan berupa penampang vertikal dapat diperoleh menggunakan algoritma *Singular Value Decomposition* (Pirttijärvi, 2014). Pemodelan data gayaberat menggunakan pendekatan ini telah terbukti *comparable* dengan penampang seismik refleksi, terutama dalam mendelineasi struktur-struktur geologi utama (skala regional) di suatu daerah (Hidayat dkk, 2021).

Penelitian dengan metode gayaberat di Sub-Cekungan Majalengka pernah dilakukan sebelumnya dengan fokus untuk mendelineasi struktur tinggian yang menjadi potensi perangkap migas (Wardhana dkk, 2016) dan pemetaan struktur geologi bawah permukaan secara lokal (Adlan dkk, 2023) ataupun regional (Setiadi dan Pratama, 2018), sedangkan fokus dari studi ini adalah memberikan hasil lanjutan dengan gambaran area penelitian yang lebih luas berdasarkan spasi pengukuran yang lebih detil dan informasi posisi serta elevasi yang diperoleh dari data pengukuran *Differential Global Positioning System* (DGPS).

Studi ini akan memberikan gambaran bawah permukaan berdasarkan pemodelan inversi data gayaberat. Hasil model bawah permukaan tersebut akan dikombinasikan dengan hasil analisis *derivative* data gayaberat untuk melihat keberadaan struktur patahan bawah permukaan. Keberadaan patahan bawah permukaan dapat menjadi kendala karena berpengaruh terhadap kualitas mekanisme perangkap di kawasan ini. Keberadaan antiklin dan indikasi adanya struktur patahan bawah permukaan berdasarkan data gayaberat pada kasus ini memiliki kesesuaian dengan posisi sumur migas yang kosong (*dry hole*) di kawasan Sub-Cekungan Majalengka dan sekitarnya.

Lokasi Penelitian

Survei gayaberat dilakukan di provinsi Jawa Barat bagian utara (Gambar 1) yang secara administratif termasuk dalam lima kabupaten yaitu Kabupaten Majalengka, Kabupaten Indramayu, Kabupaten Sumedang, Kabupaten Cirebon dan Kabupaten Garut dengan *coverage area* seluas 3000 km². Setiap titik stasiun data gayaberat dilengkapi dengan data DGPS yang terdiri dari 398 titik pengukuran dengan spasi antara 2 – 3 km dengan sistem pengukuran semi grid.

Bagian utara dari area studi merupakan area yang aktif berproduksi minyak bumi dan terdapat beberapa area akuisisi seismik 3D. Pada bagian selatan, area studi terletak diantara dua gunung api kuarter yaitu Gunung Tampomas dan Gunung Ciremai, pada kawasan ini terdapat beberapa lintasan seismik refleksi 2D, namun kurangnya kualitas data seismik menjadikan kawasan ini belum banyak diketahui tatanan geologi bawah permukaannya.

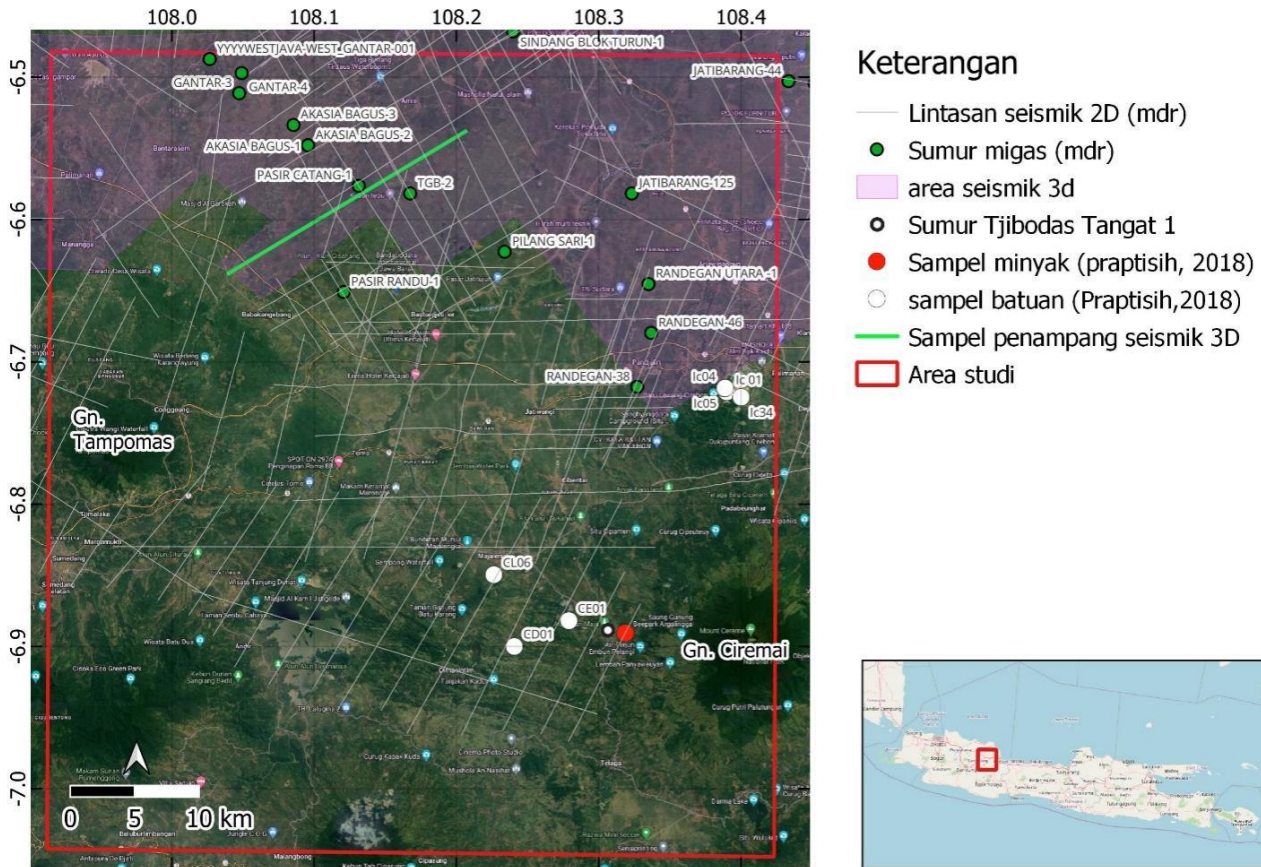
Geologi Regional

Area penelitian melingkupi tiga lembar peta geologi skala 1 : 100.000 (Gambar 2), yaitu lembar

Arjawinangun (Djuri, 2011), lembar Cirebon (Silitonga dkk, 1996) dan lembar Indramayu (Achdan dan Sudana, 1992). Berdasarkan sebaran litologinya, bagian selatan dari area studi tersingkap formasi Cinambo yang sekaligus merupakan formasi batuan tertua di area studi ini.

Penelitian terkait dengan *petroleum system* di kawasan ini sudah cukup banyak dilakukan. Berdasarkan pengamatan lapangan dan analisis geokimia, potensi batuan induk dapat berasal dari serpih Formasi Cinambo dan serpih Formasi Halang. Berdasarkan analisis geokimia batuan untuk mengevaluasi kekayaan material organikya, beberapa sampel batuan serpih yang diambil dari Formasi Halang menunjukkan kualitas yang buruk sebagai batuan induk (Yogi dkk, 2022). Sedangkan sampel batuan Formasi Cinambo yang bersifat *autochthonous* juga menunjukkan kualitas yang buruk sebagai batuan induk. Namun, hasil ekstrak beberapa sampel batuan serpih hitam yang diambil dari Formasi Cinambo menunjukkan karakteristik yang mirip dengan rembesan minyak di Kawasan Cirebon yang berdasarkan analisis biomarker kemungkinan bersifat *allochthonous* atau hasil migrasi dari hidrokarbon yang berusia lebih tua (Praptisih, 2018). Hal ini membuktikan kemungkinan batuan induk berusia lebih tua dari Formasi Cinambo yang berpotensi sebagai batuan induk untuk Sub-Cekungan Majalengka.

Sebagai *reservoir*, batupasir dari Formasi Cinambo bagian atas memiliki potensi yang baik berdasarkan karakteristik porositas dan permeabilitasnya (Yogi dkk, 2022). Batuan tudung (*cap rock*) yang potensial pada Sub-Cekungan Majalengka diduga merupakan serpih dari Formasi Subang karena memiliki porositas dan permeabilitas yang kecil serta tersebar luas di sekitar area Sub-Cekungan Majalengka. Hidrokarbon diduga dapat terperangkap dengan mekanisme perangkap stratigrafi ataupun perangkap struktur berupa antiklin yang berasosiasi dengan *thrust fault belt* Jawa Barat. Studi ini tidak akan membahas mekanisme perangkap stratigrafi karena metode gayaberat tidak memiliki resolusi yang cukup baik dalam mengidentifikasi jenis perangkap ini. Seperti hampir semua cekungan sedimen di pulau Jawa dan Sumatra, terjadi empat tahapan tektonostratigrafi yang dapat dikarakterisasi pada area studi ini (Doust and Noble, 2008). *Early Synrift* yang terjadi pada masa Eosen – Oligosen. Pada tahap inilah batuan induk berusia Eosen diendapkan. Kemudian diikuti oleh tahapan



Gambar 1

Area studi gayaberat Sub-Cekungan Majalengka yang melingkupi area seluas 55 x 60 km persegi. Data seismic 3D dan aktivitas pemboran terkonsentrasi di bagian utara area studi, sedangkan bagian selatan belum banyak dieksplorasi karena kurangnya kualitas data seismic di kawasan ini

Late Synrift pada masa Oligosen – Miosen dan *Early Postrift* pada masa Miosen Awal – Miosen Tengah serta diakhiri oleh tahapan *Late Postrift* pada masa Miosen Tengah – Pliosen yang ditandai dengan episode tektonik kompresi dan diikuti pada pembentukan struktur perlipatan dan patahan naik yang menjadi mekanisme perangkap bagi cekungan – cekungan yang terdapat di Kawasan Jawa Barat bagian utara (Pratiwi, 2021).

BAHAN DAN METODE

Penelitian ini diawali dengan akuisisi data gayaberat dan DGPS sebanyak 398 titik pengukuran yang dilakukan pada kegiatan survei geofisika Pusat Survei Geologi tahun 2023. Data tersebut dilanjutkan dengan melakukan reduksi data gayaberat hingga memperoleh peta *Complete Bouguer Anomaly* (CBA). CBA diperoleh menggunakan perangkat lunak yang dikembangkan oleh Pusat Survei Geologi

yang melingkupi beberapa koreksi seperti koreksi apungan (drift), koreksi lintang, koreksi udara bebas (*free air correction*), koreksi bouguer dan koreksi *terrain* dengan menggunakan densitas rata-rata batuan 2.41 gr/cc berdasarkan perhitungan dengan metode paransis. Kemudian dilakukan pemisahan anomali residual menggunakan filter berbasis panjang gelombang (*wavelength-based filter*). Anomali residual yang merupakan representasi kedalaman yang relatif dangkal dari data gayaberat akan digunakan sebagai *data input* dalam pemodelan inversi 3D.

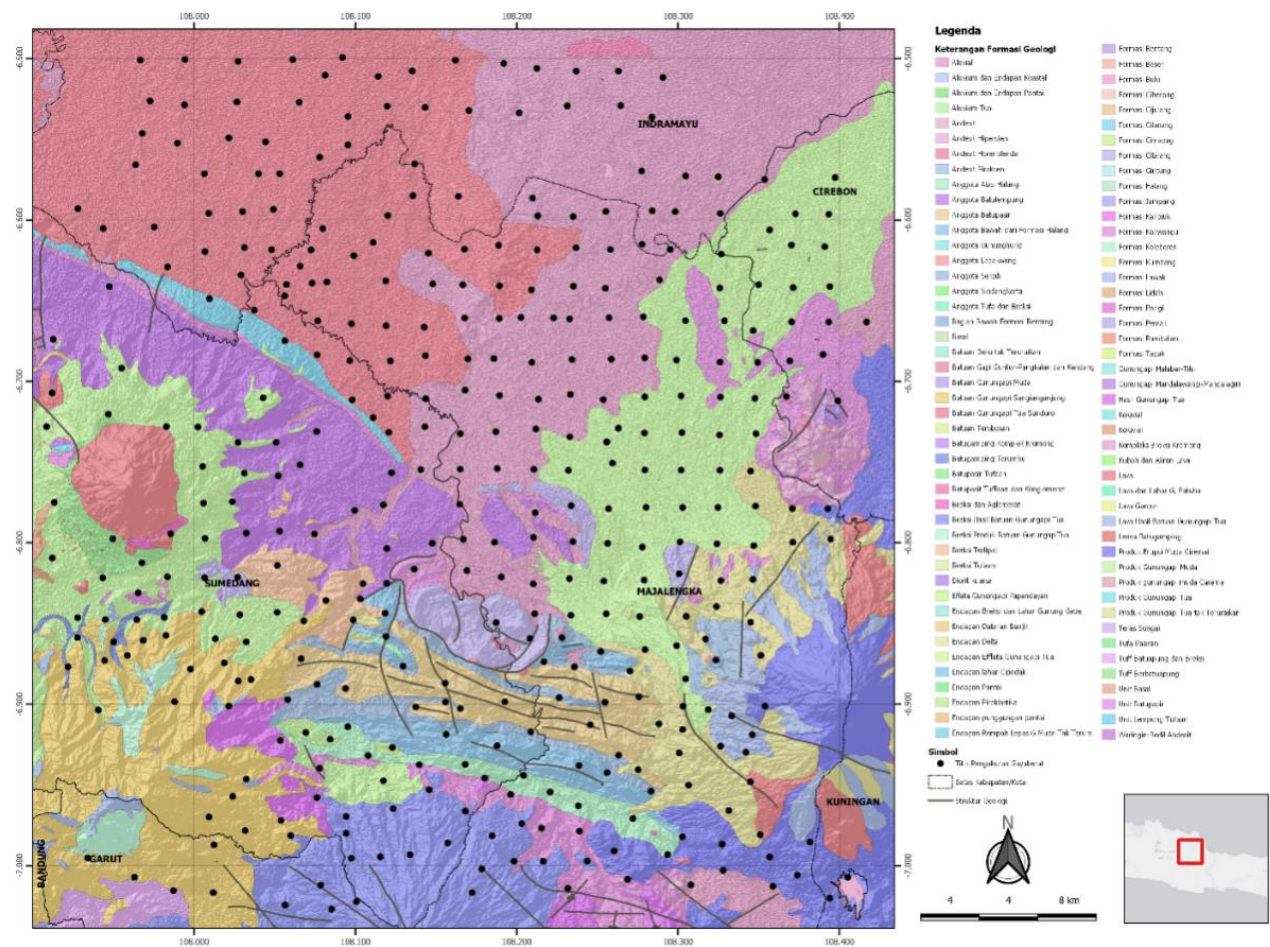
Dalam melakukan identifikasi struktur bawah permukaan untuk mengetahui kondisi mekanisme perangkap di bawah permukaan, digunakan analisis *derivative* meliputi *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD). Hasil dari analisis *derivative* ini kemudian digunakan sebagai *apriori* dalam interpretasi model bawah permukaan yang ditampilkan dalam

bentuk penampang vertikal menggunakan *3D inverse modelling* yang diperoleh dari perhitungan dengan algoritma *Singular Value Decomposition*. Penampang vertikal yang ditampilkan merupakan penampang vertikal yang melewati sumur-sumur migas untuk dapat menganalisis berbagai parameter baik pada sumur produksi ataupun sumur kosong. Validasi hasil pemodelan inversi 3D dilakukan dengan melakukan komparasi dengan penampang seismik 3D terpilih pada lintasan yang sama untuk mengetahui *reliability* dari hasil pemodelan yang dihasilkan berdasarkan data gayaberat.

Metode Gayaberat

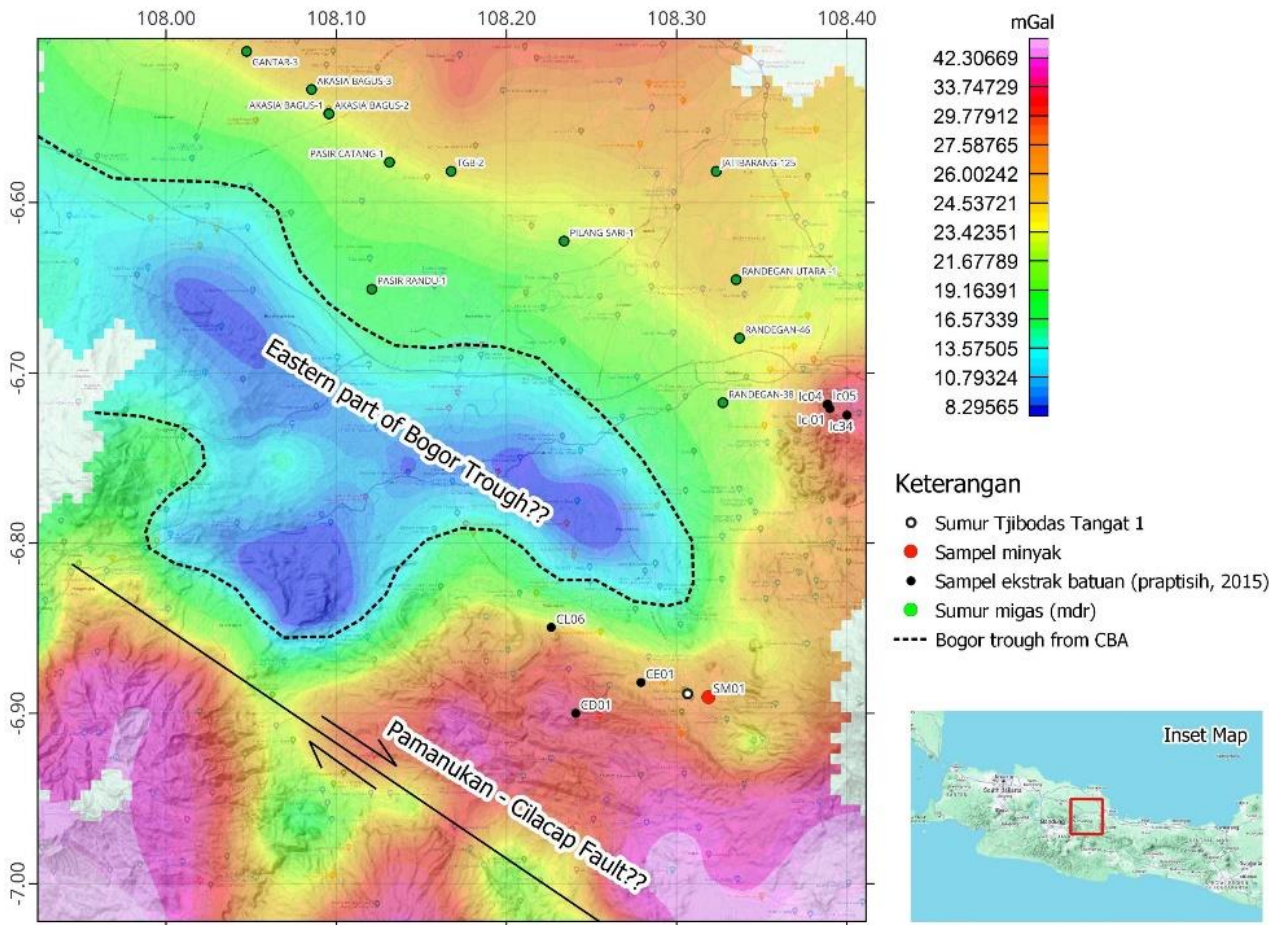
Metode gayaberat merupakan salah satu metode geofisika ekuipotensial berdasarkan properti fisis nilai berat jenis (densitas) batuan bawah permukaan

untuk mengidentifikasi kondisi jenis litologi maupun keberadaan struktur geologi bawah permukaan. Data yang digunakan pada tulisan ini merupakan data hasil akuisisi tim geofisika Pusat Survei Geologi (PSG) yang dilakukan di Sub-Cekungan Majalengka pada tahun 2023. Akuisisi dilakukan di darat (*land survey*) menggunakan instrumen Gravimeter Scintrex CG-5 sebanyak 398 titik pengukuran dengan spasi antar titik sejauh 1 – 3 km. Data ketinggian diukur menggunakan *Differential Global Positioning System* (DGPS) yang memiliki ketelitian hingga orde milimeter (mm). Data posisi dan elevasi yang diperoleh merupakan hasil perhitungan dari titik referensi ellipsoid WGS-84. Pengambilan data ketinggian yang akurat memiliki peran penting dalam koreksi data pengukuran gayaberat hingga menghasilkan CBA.



Gambar 2

Peta Geologi dari area studi gayaberat Sub-Cekungan Majalengka. Singkapan batuan tertua di Kawasan ini adalah Formasi Cinambo yang terendapkan di bagian selatan area studi (modifikasi dari : Djuri, 2011; Silitonga dkk, 1996; Achdan dan Sudana, 1992)



Gambar 3

Sebaran Anomali Bouguer Lengkap (CBA) pada area studi. Anomali rendah (biru) ditafsirkan merupakan kemenerusan dari Bogor Trough. Bagian selatan dari area studi menunjukkan adanya struktur berarah barat laut – tenggara yang kemungkinan berasosiasi dengan sesar mendatar Pamanukan – Cilacap. Bagian utara dari area studi merupakan area yang telah terbukti memproduksi minyak

Analisis Spektrum

Analisis spektrum merupakan suatu proses untuk mengubah domain spasial dari *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) data gayaberas menjadi domain frekuensi menggunakan operator *Fourier Transform* pada persamaan medan gravitasi. Solusi dari operasi tersebut akan ditampilkan dalam bentuk grafik logaritma natural amplitudo ($\ln A$) di sumbu y dan nilai bilangan gelombang (k) di sumbu x (Indriana, 2008; Zulfawati, dkk., 2019). Analisis ini digunakan untuk memisahkan anomali medan gravitasi yang masih berbentuk superposisi dari anomali gravitasi dalam (regional), anomali gravitasi dangkal (residual), serta noise dengan menggunakan *band pass filter* dalam domain frekuensi. Anomali gravitasi dalam (regional) akan ditandai dengan gelombang berfrekuensi rendah, sedangkan anomali gravitasi dangkal (residual) akan ditandai dengan gelombang berfrekuensi relatif lebih tinggi (Indriana, 2008).

First Horizontal Derivative (FHD)

FHD merupakan salah satu analisis untuk memperoleh nilai perubahan anomali gayaberas secara horizontal. Adanya perubahan anomali pada bidang kontak dikarakterisasi dengan adanya nilai anomali FHD yang tinggi, sehingga *reliable* untuk digunakan dalam mengindikasikan keberadaan struktur geologi bawah permukaan atau batas dari suatu kontras anomali gayaberas yang telah dibuktikan dengan simulasi menggunakan data sintetik ataupun data lapangan pada studi sebelumnya (Rosid dan Siregar, 2016). Persamaan umum FHD dapat diekspresikan dengan memenuhi persamaan (1).

$$FHD = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

Second Vertical Derivative (SVD)

Analisis *derivative* seperti SVD diketahui dapat digunakan untuk mengidentifikasi orientasi kemiringan (*dip orientation*) dari kontras anomali densitas bawah permukaan dengan meninjau dari nilai relatif dan berdasarkan simulasi dari berbagai model sintetik (Sumintadireja dkk, 2018).

Secara matematis, SVD pada prinsipnya diperoleh dari dari penurunan persamaan Laplace seperti pada persamaan (2) (Telford, dkk., 1990).

$$\nabla^2 \Delta g = 0 \quad (2)$$

dengan

$$\frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

$$\text{Sehingga } \frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial z^2} = - \left[\frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial y^2} \right] \quad (4)$$

Berdasarkan persamaan Laplace pada persamaan 3, SVD atau turunan orde II gayaberasat arah vertikal dapat dituliskan sebagai nilai negatif dari penjumlahan gradien horizontal arah x dan arah y .

Pemodelan Inversi 3D

Pemodelan inversi merupakan proses memprediksi data atau memprediksi hasil pengukuran berdasarkan beberapa prinsip dan model umum (Menke, 1984). Pemodelan inversi juga sering disebut sebagai kebalikan dari *forward modeling* karena parameter model yang dicari didapatkan langsung dari parameter observasi atau data. Pemodelan inversi secara umum dirumuskan sebagai berikut (Grandis, 2009).

$$d = G m \quad (5)$$

Dengan d adalah matriks data, G merupakan matriks atau matriks kernel, dan merupakan matriks model yang dicari.

Matriks kernel (G) memiliki dua kemungkinan, yaitu bentuk *singular matrix* yang memiliki nilai dan berbentuk *non-singular matrix* yang memiliki nilai . Pemodelan inversi pada *singular matrix* dapat menimbulkan kesulitan dalam mencari solusi hasil inversi, sehingga perlu dilakukan dekomposisi matriks dengan metode *Singular Value*

Decomposition. Singular Value Decomposition yang mendekomposisi matriks *singular* menjadi matriks *non-singular* yang dirumuskan seperti persamaan 6 dan persamaan 7.

$$A = U \Sigma V^T \quad (6)$$

atau

$$A_{(m \cdot n)} = U_{(m \cdot m)} \Sigma_{(m \cdot n)} V_{(n \cdot n)}^T \quad (7)$$

Matriks A merupakan solusi dari algoritma inversi *Singular Value Decomposition* yang merupakan matriks berisi parameter densitas dan kedalaman (Pirttjarvi, 2014). Sedangkan U merupakan matriks orthogonal kanan, Σ merupakan matriks diagonal, dan V^T merupakan matriks orthogonal kiri yang merupakan dekomposisi dari matriks A .

HASIL DAN PEMBAHASAN

Anomali Bouguer Lengkap

Sebaran Anomali Bouguer Lengkap (CBA) melingkupi area survei seluas 3000 km² yang ditunjukkan pada Gambar 3. Rentang anomali yang diperoleh berkisar antara nilai 8,29 hingga 42,30 mGal yang ditandai dengan adanya tren anomali tinggi pada bagian selatan, dan tren anomali rendah yang diduga merupakan kemenerusan dari *Bogor Trough*, sedangkan bagian utara dari area studi merupakan kawasan yang telah terbukti memproduksi hidrokarbon.

Bagian selatan area studi ditandai dengan adanya ketidakmenerusan anomali tinggi yang mengindikasikan kawasan ini kemungkinan dilewati oleh segmen dari sesar geser manganan (dextral) Pamanukan – Cilacap yang menerus dari Cekungan Banyumas. Kawasan ini ditandai dengan rembesan minyak dan *gas smell* dengan tren persebaran yang sama, yaitu barat laut – tenggara (Satyana, 2007). Secara persebaran litologinya, kawasan ini merupakan lokasi tempat tersingkapnya Formasi Cinambo, formasi batuan yang terendapkan pada masa Oligosen Akhir – Miosen Awal sekaligus formasi batuan tertua yang tersingkap di area studi ini (Djuri, 2011).

Di bagian tengah area survei, terdapat hamparan anomali rendah yang dikarakterisasi oleh nilai 8,29 – 13,57 mGal yang ditafsirkan sebagai kemenerusan dari *Bogor Trough* dengan tren persebaran relative

barat laut – tenggara. Anomali rendah ini ditafsirkan sebagai zona depositer dari area studi ini. Kawasan dengan anomali rendah ini secara umum merupakan zona yang memiliki peluang terbesar sebagai tempat terendapkannya batuan induk. Studi terkait tektonostratigrafi menyatakan bahwa batuan induk berusia Kapur – Eosen kemungkinan diendapkan pada episode *synrift*. Di bagian utara terdapat anomali relatif tinggi yang tersebar dengan tren barat laut – tenggara dengan rentang anomali berkisar antara 23,42 – 29,77 mGal yang ditandai dengan persebaran sumur pemboran yang beberapa di antaranya aktif berproduksi pada zona transisi anomali rendah ke anomali tinggi. Tabel 1 menunjukkan beberapa informasi sumur dari Pertamina EP Regional 2 yang secara kategori batas cekungan sudah masuk kedalam area Cekungan Jawa Barat Utara (NWJB). Pada NWJB, batuan induk yang telah terbukti adalah serpih yang berasal dari Formasi Talang Akar yang terendapkan pada masa Miosen (Pratiwi, 2021).

Tabel 1.
Nama dan status sumur migas di area studi

Nama Sumur	Status
Pasirandu-1	<i>Plug & Abandoned</i>
Pilangsari-1	<i>Dry</i>
Randegan Utara-1	<i>Oil & Gas</i>
Akasia Bagus-1	<i>Oil & Gas</i>
Jatibarang-125	<i>Oil & Gas</i>
Gantar-3	<i>Oil & Gas</i>
Akasia Bagus-2	<i>Gas & Condensate</i>

Anomali Bouguer Residual

Tahapan awal dalam menafsirkan data gayaberat adalah dengan melakukan pemisahan anomali residual dari CBA. Secara prinsip, anomali residual adalah representasi anomali pada batuan yang terdapat pada kedalaman lebih dangkal.

Anomali bouguer residual ditunjukkan pada Gambar 4. Anomali rendah yang sebelumnya ditafsirkan sebagai kemenerusan *Bogor Trough* di-*overlay* pada peta anomali bouguer residual dengan symbol garis berwarna hitam putus-putus. Terlihat bahwa anomali rendah dari *Bogor Trough* terpisah oleh anomali tinggi dengan tren persebaran barat laut – tenggara yang memisahkan 2 sub-basin

yaitu *northern low anomaly* dan *southern low anomaly*. Zona ini diduga dapat menjadi tempat terendapkannya batuan induk di Sub-Cekungan Majalengka.

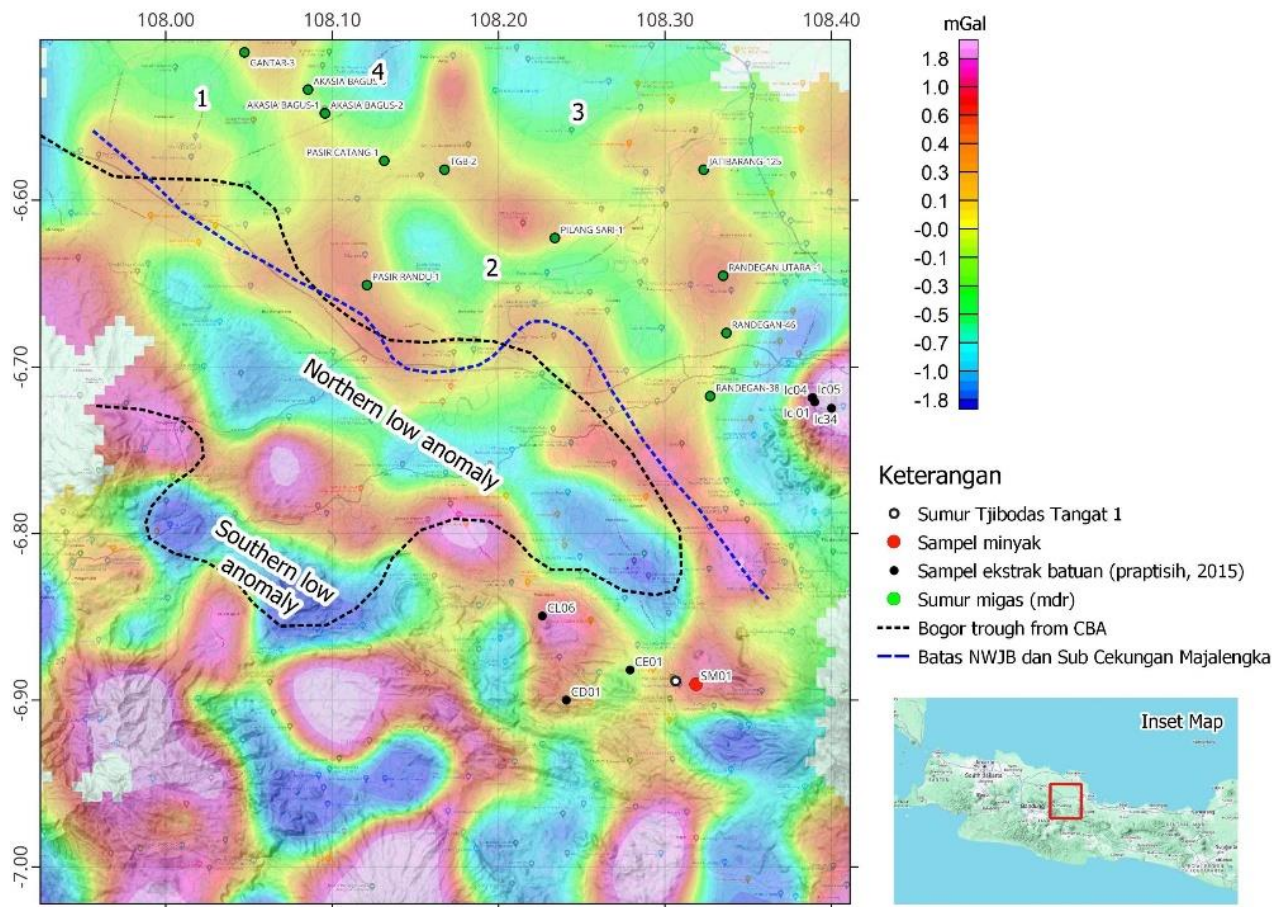
Sumur produksi yang berada di bagian utara area studi seluruhnya mengikuti pola sebaran anomali tinggi pada Gambar 4. Terdapat beberapa zona anomali rendah yang memiliki kemungkinan menjadi lokasi terendapkannya batuan induk bagi sumur produksi di utara area studi, yaitu zona 1, zona 2, zona 3 dan zona 4. Keempat zona anomali rendah ini dipisahkan oleh suatu *closure* anomali tinggi dari *Northern Low Anomaly* dan *Southern Low Anomaly* yang masuk ke dalam zona Cekungan Bogor bagian timur (Sub-Cekungan Majalengka). Zona ini diduga sebagai batas antara NWJB dan Sub-Cekungan Majalengka (dikarakterisasi oleh garis biru putus-putus pada Gambar 4).

Analisis Derivative

Analisis *derivative* yang diaplikasikan dalam studi ini adalah *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Berdasarkan anomali FHD, diketahui bahwa bagian selatan dari area studi didominasi oleh nilai anomali tinggi. Berdasarkan model matematisnya, puncak anomali dari FHD dapat diasosiasikan dengan indikasi keterdapatannya struktur sesar bawah permukaan baik yang menerus hingga ke permukaan ataupun yang hanya terkubur di bawah permukaan (Rosid & Siregar, 2023). Berdasarkan hal tersebut, dapat dikatakan bahwa bagian selatan dari area studi memiliki kompleksitas struktur bawah permukaan yang lebih kompleks dibandingkan dengan bagian utara. Hal ini koheren dengan fakta bahwa pada bagian selatan area studi ditandai dengan kemunculan rembesan migas dan manifestasi struktur kompleks yang terlihat pula pada singkapan batuan di permukaan (Satyana, 2007).

Berbeda dengan FHD yang menunjukkan indikasi ada atau tidaknya struktur bawah permukaan, anomali SVD digunakan dalam penentuan jenis struktur bawah permukaan. Berdasarkan beberapa studi dengan menggunakan model matematis/sintetik, nilai relatif SVDmax terhadap SVDmin akan menunjukkan kecenderungan jenis struktur bawah permukaan (Sumintedireja dkk, 2018). Pada studi ini, respon anomali SVD akan dilihat berdasarkan beberapa penampang vertikal gayaberat yang melewati beberapa sumur migas di bagian utara dan mencari atribut yang sama di bagian selatan.

Pencitraan Bawah Permukaan Cekungan Majalengka: Analisis Data Gayaberat Untuk Eksplorasi Hidrokarbon pada Cekungan Sedimen Dengan Tutupan Vulkanik (Hidayat, dkk.)



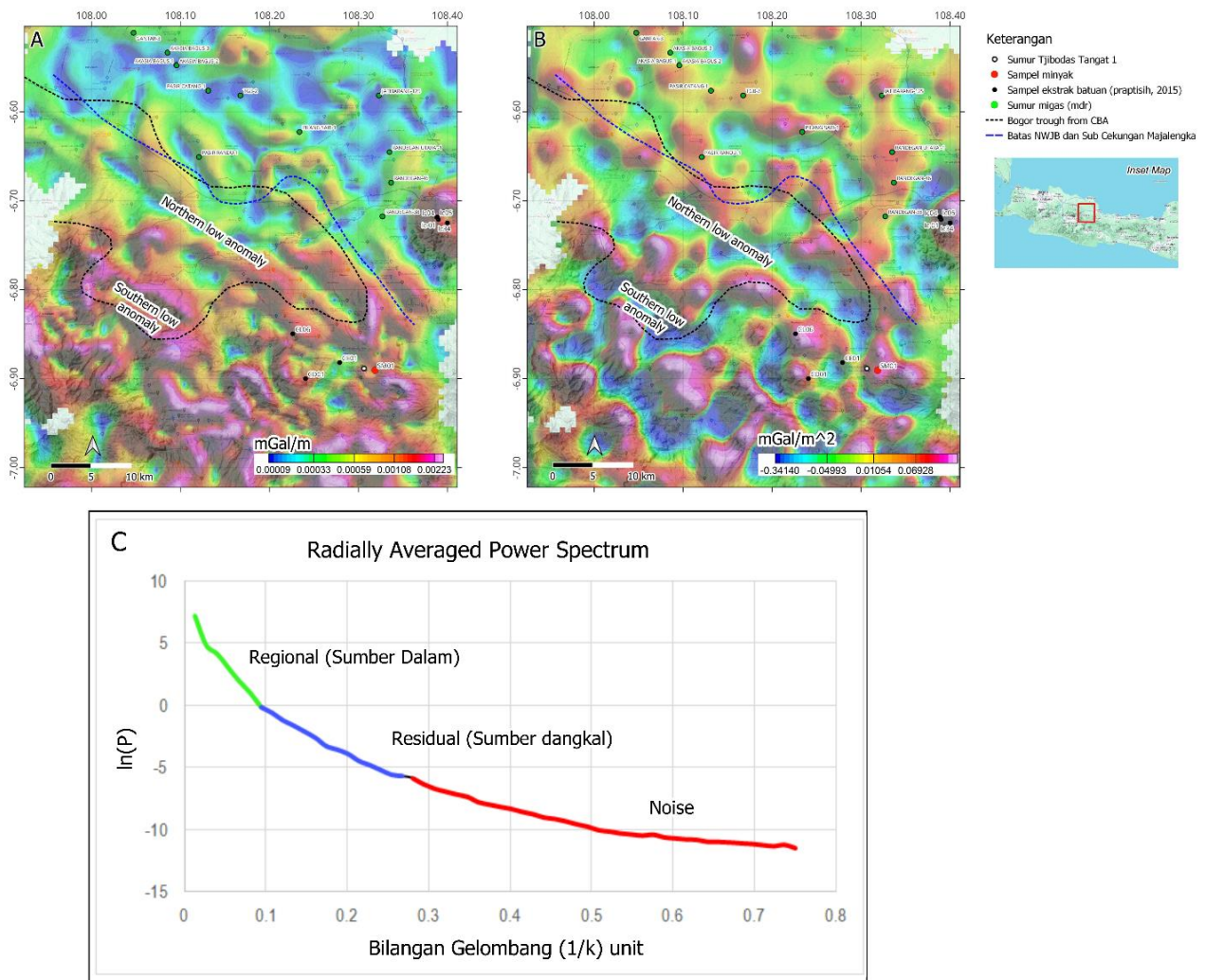
Gambar 4

Sebaran Anomali Bouguer Residual pada area studi. Area yang ditandai oleh garis putus-putus merupakan penafsiran dari Bogor Trough pada CBA yang terpisahkan oleh sebuah anomali tinggi berarah relative barat laut – tenggara pada anomali residual yang sekaligus memisahkan dua anomali rendah (*northern low anomaly* dan *southern low anomaly*). Pada bagian utara, terlihat bahwa seluruh titik pemboran terdapat pada zona anomali tinggi atau transisi anomali rendah ke tinggi.

Penampang Vertikal

Pemodelan bawah permukaan data gayaberat dilakukan dengan algoritma Singular Value Decomposition yang merupakan algoritma untuk pemodelan inversi 3D. Hasil perhitungan dari pemodelan inversi 3D ini adalah model 3D (*3D cube*). Sampel salah satu penampang vertikal dari model *3D cube* tersebut (Lintasan A – A’) diambil untuk dibandingkan dengan penampang vertikal seismik refleksi 3D milik PT Pertamina EP regional 2 dan menunjukkan kesesuaian yang baik dalam menggambarkan struktur-struktur bawah permukaan utama pada lintasan yang sama (Gambar 6). Berdasarkan hal ini, model *3D cube* yang dihasilkan dari perhitungan untuk memperoleh model bawah permukaan berdasarkan data gayaberat memiliki *reliability* yang baik dalam menggambarkan struktur perlipatan berupa antiklin yang mungkin

dapat menjadi perangkap struktur dari petroleum system Sub-Cekungan Majalengka. Sementara itu, respon anomali FHD dan SVD pada lintasan yang sama akan digunakan untuk memberikan apriori dalam interpretasi kuantitatif dari setiap penampang vertikal. Pada studi ini, analisis kualitas jebakan struktur dilandasi oleh asumsi bahwa keberadaan sesar pada suatu perangkap struktur antiklin akan menurunkan kualitas perangkap migas. Untuk mengetahuinya, maka masing-masing penampang vertikal data gayaberat akan dilihat berdasarkan beberapa kriteria, pertama pada penampang vertikal menunjukkan geometri perlipatan berupa antiklin, kedua memiliki nilai anomali FHD yang rendah yang secara matematis tidak mengindikasikan adanya struktur berupa patahan yang berkembang pada antiklin tersebut, dan yang ketiga adalah anomali SVD yang tidak berada pada nilai 0 (Rosid & Siregar, 2023) pada titik puncak anomali FHD.



Gambar 5

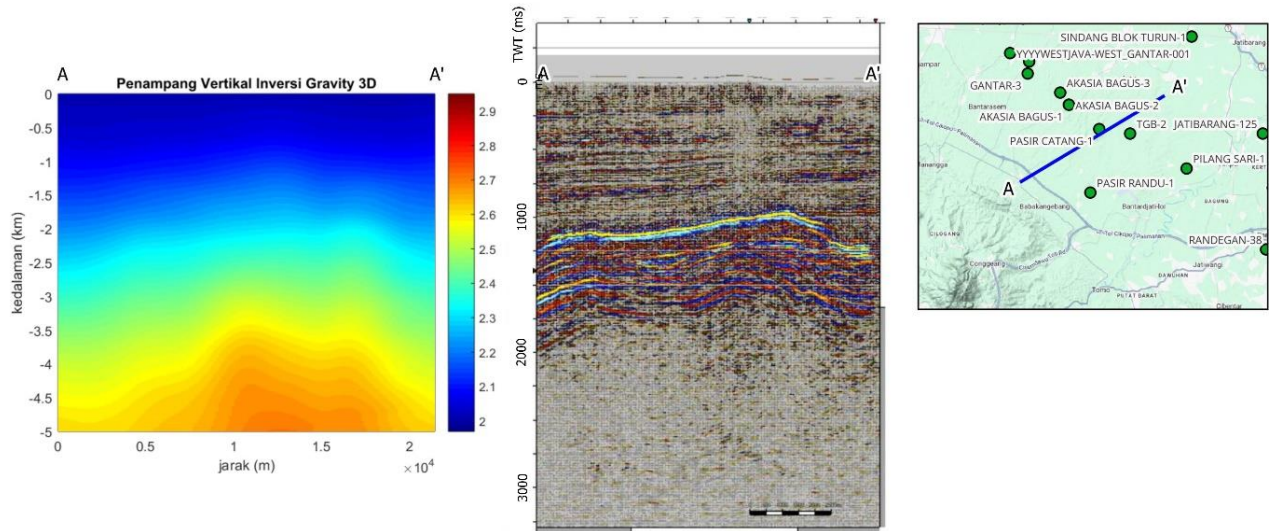
Analisis derivative pada area studi. A) Sebaran anomali FHD yang menunjukkan bahwa kompleksitas struktur bawah permukaan bagian selatan lebih tinggi dibandingkan dengan kompleksitas struktur bawah permukaan kawasan utara area studi. Hal ini diduga memiliki implikasi dengan kualitas mekanisme jebakan struktur di bawah permukaan. B) Sebaran anomali SVD yang merupakan model matematis untuk menduga jenis struktur yang ada di bawah permukaan. Bersama dengan analisis FHD, nilai SVD akan memberikan apriori dalam interpretasi penampang vertikal gayaberat. C) Spektrum frekuensi pada data yang digunakan sebagai acuan untuk memisahkan anomali residual dari komponen regional dan noise sebagai input untuk analisis derivative.

Peta FHD dan SVD sulit dipahami struktur geologinya dibandingkan peta CBA atau residual, terlalu kompleks. Apakah saudara dapat memisahkan mana sinyal dan mana noise yang diampifikasi? Jika bisa coba berikan dalam spektrum frekuensi atau bilangan gelombangnya, dan sajikan dalam bentuk peta lagi hasilnya. Dengan demikian kami yakin FHD dan SVD yang saudara gunakan merupakan tool yang robust untuk analisis sesar yang kompleks untuk daerah penelitian. Respon: Spektrum frekuensi sudah ditambahkan pada Gambar 5. FHD dan SVD diperoleh dari anomali residual yang telah difilter menggunakan band pass filter dari komponen regional dan noisennya. Sehingga FHD dan SVD diperoleh dari sinyal, bukan pseudo-sinyal

Hasil analisis ini akan dikontrol oleh baik status sumur produksi yang saat ini aktif memproduksi migas maupun sumur kosong (*dry hole*) yang berada di area studi. Gambar 7 menunjukkan salah satu penampang vertikal yang melewati sumur Randegan Utara-1, sumur ini merupakan salah satu sumur yang

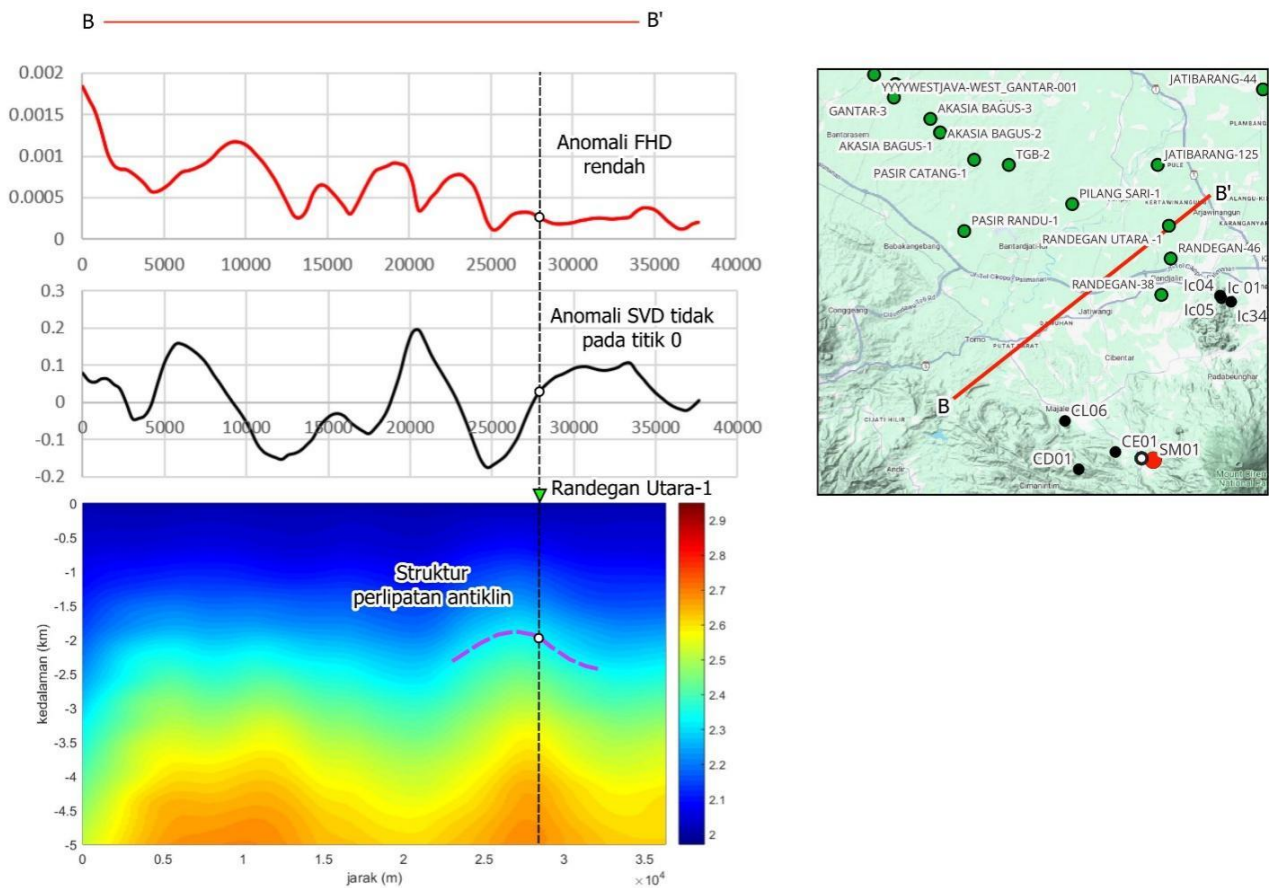
sudah terbukti memproduksi migas. Bila dilihat dari geometri dari penampang vertikalnya, anomali FHD dan juga SVD dari sumur Randegan Utara-1, maka diketahui bahwa posisinya berada pada geometri puncak antiklin yang memiliki anomali FHD rendah dan SVD yang tidak berada pada nilai = 0.

Pencitraan Bawah Permukaan Cekungan Majalengka: Analisis Data Gayaberat Untuk Eksplorasi Hidrokarbon pada Cekungan Sedimen Dengan Tutupan Vulkanik (Hidayat, dkk.)



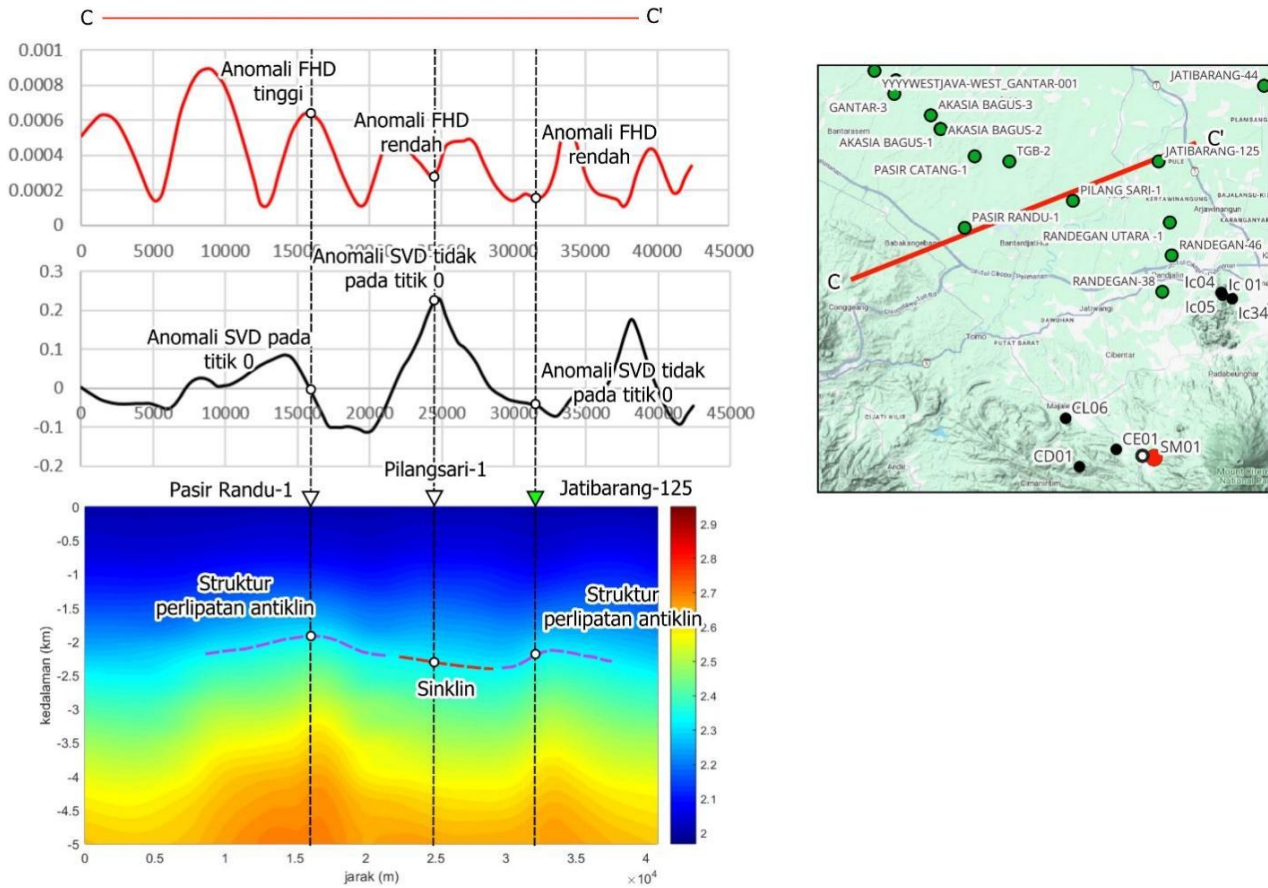
Gambar 6

Validasi hasil pemodelan 3D gayaberat menggunakan algoritma SVD dengan penampang seismik 3D pada lintasan yang sama dan menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dan *comparable*.



Gambar 7

Penampang vertikal dan analisis derivative pada sumur produksi Randegan Utara-1. Kurva berwarna merah adalah representasi respon FHD, sedangkan kurva hitam adalah SVD di sepanjang lintasan B – B'



Gambar 8

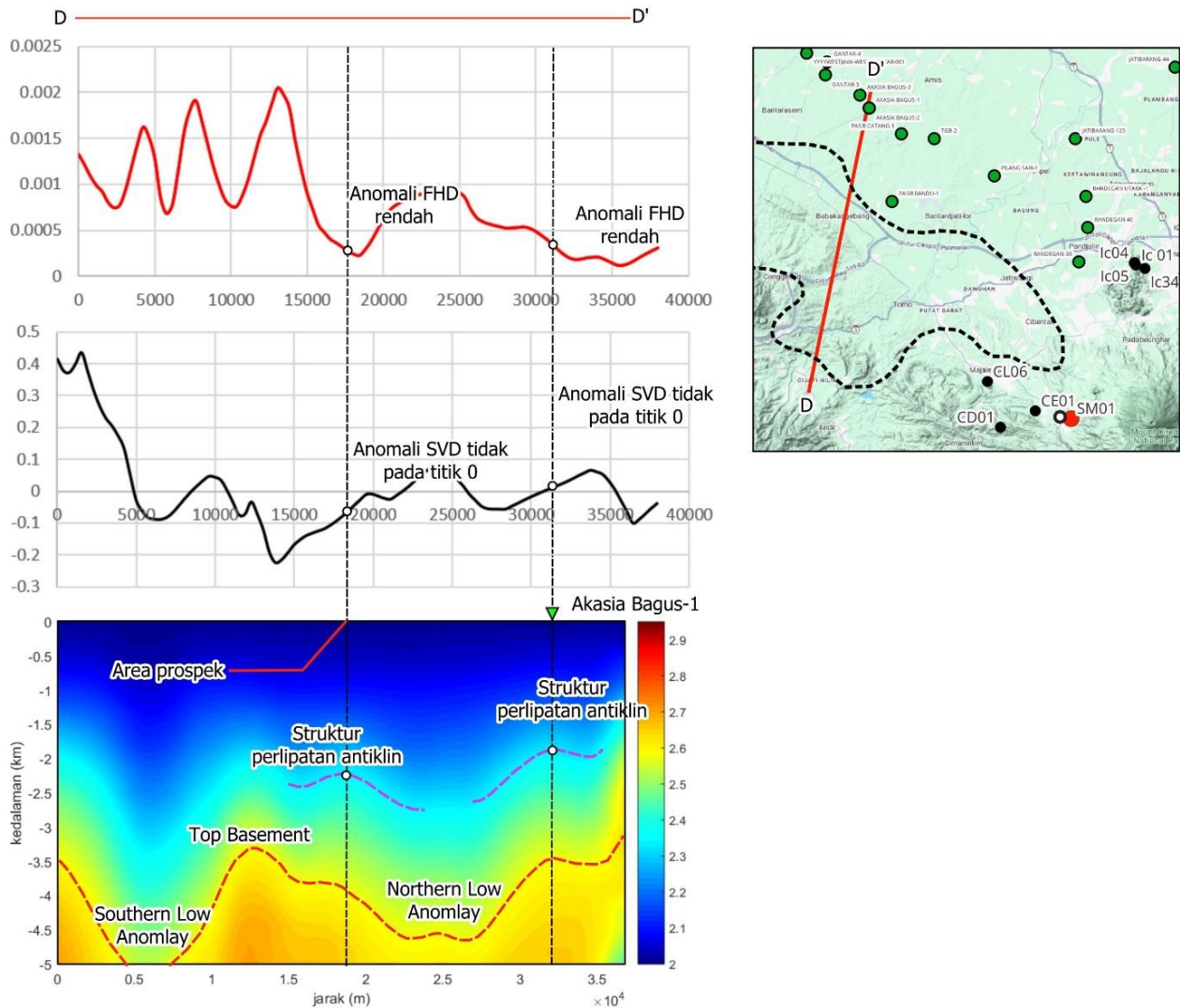
Penampang vertikal dan analisis derivative yang melewati sumur Pasir Randu-1 dengan status “*plug and abandoned*”, “*dry hole*” Pilangsari-1 dan sumur produksi Jatibarang-125. Kurva berwarna merah adalah representasi respon FHD, sedangkan kurva hitam adalah SVD di sepanjang lintasan C – C’

Berdasarkan studi sebelumnya terkait dengan analisis data gayaberasat lanjutan (Rosid & Siregar, 2023) hal ini mengindikasikan tidak adanya struktur bawah permukaan menurut analisis data gayaberasat, sehingga memungkinkan migas bisa terakumulasi pada struktur antiklin yang terdapat di bawah sumur Randegan Utara-1.

Gambar 8 menunjukkan penampang vertikal C – C’ yang melewati 3 sumur migas berturut-turut dari barat ke timur yaitu sumur Pasir Randu-1 yang merupakan sumur yang sudah dalam status “*plug and abandoned*”, sumur Pilangsari-1 yang merupakan sumur kosong (*dry hole*), dan sumur Jatibarang-125 yang merupakan sumur produksi migas. Berdasarkan karakter dari sumur produksi Jatibarang-125, diketahui bahwa karakter fisis dari sumur ini mirip dengan karakter fisis yang ditunjukkan juga oleh sumur Randegan Utara-1, yaitu berada pada zona struktur antiklin, serta memiliki anomali FHD yang rendah serta anomali SVD yang tidak menunjukkan indikasi jenis struktur tertentu. Hal

ini berbeda dengan karakter fisis yang ditunjukkan oleh sumur Pilangsari-1 yang merupakan *dry hole*. Pada sumur Pilangsari-1, diketahui bahwa struktur yang berkembang di kawasan ini adalah struktur sinklin yang bukan merupakan lokasi yang tepat untuk terakumulasinya hidrokarbon dalam konteks jebakan struktur. Sedangkan sumur Pasir Randu-1 merupakan contoh unik lainnya, dimana sumur ini berada diatas struktur yang memiliki geometri menyerupai antiklin, namun ditinjau dari atribut FHD dan SVDnya terindikasi adanya struktur sesar bawah permukaan yang ditandai dengan nilai FHD yang tinggi dan nilai anomali SVD berada pada nilai = 0 dan dikarakterisasi oleh $SVD_{max} < SVD_{min}$ yang mencirikan kemungkinan jenis sesar yang berkembang adalah sesar naik. Diduga keberadaan struktur sesar ini mengakibatkan kurangnya kualitas dari mekanisme perangkap pada kawasan Pasir Randu-1 yang kemungkinan berimplikasi pada tidak adanya migas yang terakumulasi pada perangkap antiklin tersebut.

Pencitraan Bawah Permukaan Cekungan Majalengka: Analisis Data Gayaberasat Untuk Eksplorasi Hidrokarbon pada Cekungan Sedimen Dengan Tutupan Vulkanik (Hidayat, dkk.)



Gambar 9

Penampang vertikal dan analisis *derivative* yang melewati sumur produksi Akasia Bagus-1. Kurva berwarna merah adalah representasi respon FHD, sedangkan kurva hitam adalah SVD di sepanjang lintasan D – D'. Karakter pada sumur Akasia Bagus-1 memiliki kesamaan dengan area yang ditandai dengan “area prospek”.

Lintasan D – D’ merupakan lintasan vertikal sepanjang 37 km yang melewati sumur produksi Akasia Bagus-1 (Gambar 9). Parameter analisis yang diperoleh pada sumur Akasia Bagus-1 identik baik dengan sumur Randegan Utara-1 maupun Jatibarang-125 yang ketiganya dikonfirmasi merupakan sumur produksi di bagian utara dari area studi. Lintasan D – D’ juga memperlihatkan geometri bawah permukaan dari *Bogor Trough* yang menunjukkan zona *southern low anomaly* dan *northern low anomaly* yang dipisahkan oleh *basement high*. Kedua zona ini merupakan zona yang memiliki kemungkinan yang cukup tinggi sebagai tempat terendapkannya batuan induk berusia lebih tua dari Formasi Cinambo yang terjadi pada episode

synrift pada Sub-Cekungan Majalengka. Area prospek dikarakterisasi oleh parameter yang identik dengan tiga sumur produksi lainnya di kawasan ini, yaitu sumur Akasia Bagus-1, Randegan Utara-1 dan Jatibarang-125. Karakter yang identik tersebut memperlihatkan bahwa di bawah area prospek terdapat geometri struktur perlipatan berupa antiklin yang dikarakterisasi oleh anomali FHD rendah dan anomali SVD yang tidak mengindikasikan adanya jenis struktur tertentu yang berkembang di kawasan ini. Dilihat dari konteks perangkat struktur dari kacamata data gayaberasat, area prospek ini memiliki potensi sebagai tempat terakumulasinya hidrokarbon yang kemungkinan dapat berasal dari zona *southern low anomaly* ataupun *northern low anomaly*.

KESIMPULAN DAN SARAN

Akuisisi data gayaberat terkini diambil untuk dapat memberikan pencitraan bawah permukaan pada cekungan Bogor bagian timur (Sub-Cekungan Majalengka) yang merupakan cekungan sedimen dengan tutupan vulkanik. Analisis data gayaberat dilakukan dengan melakukan analisis *derivative* yaitu FHD dan SVD yang digunakan dalam penafsiran model penampang vertikal gayaberat. Objektif dari studi ini adalah untuk mengetahui geometri bawah permukaan tempat terendapkannya batuan induk yang terendapkan pada episode *synrift* yang berdasarkan beberapa peneliti sebelumnya menyatakan bahwa batuan induk pada kawasan ini kemungkinan berasal dari batuan induk berusia kapur – tersier atau berusia lebih tua dari singkapan batuan tertua di kawasan ini, yaitu Formasi Cinambo. Selain itu, objektif dari studi ini adalah untuk mengkaraktisasi beberapa peluang jebakan hidrokarbon dibawah permukaan berdasarkan kemiripan atribut dari beberapa sumur yang terbukti memproduksi migas.

Berdasarkan CBA diperoleh bahwa Bogor Trough bagian timur tergambar baik di kawasan studi ini, sedangkan dari anomali residual diketahui bahwa *Bogor Trough* tersebut terbagi menjadi dua kawasan low anomali yaitu zona *southern low anomaly* ataupun *northern low anomaly* yang dipisahkan oleh suatu *basement high* melalui lintasan D – D'. Kedua zona ini diduga merupakan tempat terendapkannya batuan induk berusia Kapur – Tersier pada episode *synrift* di Sub-Cekungan Majalengka.

Berdasarkan model penampang vertikal yang telah divalidasi oleh penampang seismik 3D, area prospek berhasil didelineasi berdasarkan kemiripan dari atribut dari sumur-sumur produksi di kawasan ini, yaitu dilihat dari keterdapatannya berupa antiklin bawah permukaan, nilai FHD yang rendah dan juga SVD yang tidak mengindikasikan keberadaan jenis struktur tertentu di kawasan prospek tersebut.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada kepala Pusat Survei Geologi Bapak Hermansyah atas dukungan dan kesempatan yang diberikan untuk melakukan survei rinci dengan metode gayaberat di Sub-Cekungan Majalengka. Ucapan terimakasih juga penulis ucapkan kepada PT Pertamina EP Regional 2 atas informasi status sumur migas milik PT Pertamina, dan juga memberikan sampel dari

penampang seismik 3D yang dapat digunakan sebagai “validator” dari hasil pemodelan data gayaberat. Terakhir, penulis ucapkan terimakasih kepada Bapak/Ibu ASN Pusat Survei Geologi dan Pusat Sumber Daya Mineral dan Panas Bumi atas dukungan peralatan gravimeter dan sumber daya manusia yang terlibat dalam pengambilan data.

DAFTAR ISTILAH/SINGKATAN

Simbol	Definisi	Satuan
CBA	Complete Bouguer Anomaly	mGal
DGPS	Differential Global Positioning System	
FHD	First Horizontal Derivative	mGal/m
NWJB	North West Java Basin	
SVD	Second Vertical Derivative	mGal/m ²
SVDmax	Nilai simpangan positif tertinggi dari Second Vertical Derivative	mGal/m ²
SVDmin	Nilai simpangan negatif tertinggi dari Second Vertical Derivative	mGal/m ²

REFERENSI

- Achdan, A. and Sudana, D. (1992). Peta Geologi Lembar Indramayu, Jawa. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Adlan, F., Pratama, A.H., Wibowo, S.R. and Supriyanto, S. (2018), October. Identification of sub-basins using gayaberat data in Majalengka, Indonesia. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2023, No. 1). AIP Publishing.
- Djuri, M. (2011). Peta Geologi lembar Arjawinangun, Jawa, skala 1: 100.000. Pusat Survei Geologi, Bandung
- Doust, H. and Noble, R.A. (2008). *Petroleum*

- systems of Indonesia. Marine and Petroleum Geology*, 25(2), pp.103-129.
- Dwi Indriana, R.** (2008). Estimasi Ketebalan Sedimen dan Kedalaman Diskontinuitas Mohorovicic Daerah Jawa Timur dengan Analisis Power Spectrum Data Anomlai Gravitasi. *Berkala Fisika*, 11(2), pp.67-74.
- Hidayat, H., Nugraha, A. D., Priyono, A., Marjiyono, M., Setiawan, J. H., Sahara, D. P., & Setiawan, A.** (2021). *Travel time tomography to delineate 3-D regional seismic velocity structure in the Banyumas Basin, Central Java, Indonesia, using dense borehole seismographic stations. Frontiers in Earth Science*, 9, 639271.
- Hidayat, Nanda, M. D., Junursyah, G. M. L., Marjiyono, Setiawan J. H., Supriyana, E., Praromadani Z. S., dan Subagio.** (2023). Pemodelan Data Gayaberat Dengan Metode Inversi 3d, Studi Kasus : Cekungan Banyumas, Jawa Tengah. Pusat Survei Geologi, Badan Geologi, KESDM, pp. 27-32.
- Parttijavri, M.** (2004). GRABLOX: Gayaberat Interpretation and Modelling Software Based on 3D Block Model. *User's Guide Geological Survey of Finland*.
- Praptisih, P.** (2018). Karakteristik Batuan Induk Hidrokarbon di Cekungan Bogor, Jawa Barat.
- Praptisih** (2018), February. *Biomarker characteristics of source rock and oil seepage correlation in Central Java. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 118, No. 1, p. 012008). IOP Publishing.
- Pratiwi, R.,** 2021. *Source rock characterization and oil grouping in the NW Java, Central Java and NE Java Basins, Indonesia. Berita Sedimentologi*, 47(2), pp.48-66.
- Pusat Survei Geologi.,** 2023, Peta Cekungan Sedimen Indonesia Berdasarkan DataGeologi Dan Geofisika, Skala 1: 5000.000.
- Rosid, M.S. and Siregar, H.,** 2017, July. *Determining fault structure using first horizontal derivative (FHD) and horizontal vertical diagonal maxima (HVDM) method: A comparative study. In AIP Conference Proceedings* (Vol. 1862, No. 1). AIP Publishing.
- Satyana, A.H.** (2007). *Central Java, Indonesia—A “Terra Incognita” in petroleum exploration: New considerations on the tectonic evolution and petroleum implications.*
- Setiadi, I. and Pratama, A.W.** (2018). Pola Struktur dan Konfigurasi Geologi Bawah Permukaan Cekungan Jawa Barat Utara berdasarkan Analisis Gayaberat. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 19(2), pp.59-72.
- Silitonga, P.H., Masria, M. and Suwarna, N.** (1996). Peta Geologi Lembar Cirebon. Jawa, Skala, 1(100.000).
- Sumintadireja, P., Dahrin, D. and Grandis, H.** (2018). A Note on the Use of the Second Vertical Derivative (SVD) of Gravity Data with Reference to Indonesian Cases. *Journal of Engineering & Technological Sciences*, 50(1).
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E.** (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.
- Wardhana, D.D., Kamtono, K. and Gaol, K.L.** (2016). High Structure in Majalengka Sub Basin Based On Gayaberat Method. *Riset Geologi dan Pertambangan*, 26(2), pp.85-99.
- Yogi, A., Fadhilah, R. A., Gumilar, I. S., Putra A. P., Hamzah, A., Slameto, E., Firdaus M., dan Nugroho E. H.** (2022). Laporan Rekomendasi Wilayah Keprospekan Migas Kuningan. Pusat Survei Geologi
- Zulfawati, L., Minardi, S. and Angraini, L.M.** (2019). Analisis Spektrum Pada Data Gaya Berat Daerah Lombok Tengah Dan Lombok Timur Untuk Menentukan Estimasi Ketebalan Sedimen. *Jurnal Inovasi dan Pembelajaran Fisika*, 6(1), pp.34-44.