

DAFTAR ISI

Analisis perubahan Coulomb stress gempa bumi Mw 5,8 di kabupaten Tapanuli Utara 1 Oktober 2022 (Lailatul Husna Lubis*, Faradilla Firdani Harefa, Christofel Haposan Sibuea, Mira Hestina Ginting)	1
Analisis mineral magnetik sedimen sungai Jeneberang berdasarkan data suseptibilitas magnetik (M Reski Saputra, Vistarani Arini Tiwow*, Agus Susanto).....	7
Rancang bangun <i>spin coater</i> sederhana untuk deposisi lapisan tipis polimer (Amalia C Nur'aidha*, Mira Setiana, Dena Anugrah).....	14
Analisis petrofisika dan <i>shale gouge ratio</i> pada formasi Ngrayong untuk menentukan potensi CCS lapangan Gundih, Jawa Tengah (Muhammad Hilmy Shubhi*, Ginanda Salfira, M. Aditya Makki, Rahmat C. Wibowo, Karyanto, dan Ilham Dani).....	20
Pemodelan dapur magma gunungapi Ciremai berdasarkan data anomali gravitasi satelit (Esa Pallewi Hasby, Seha*, Sugito)	29
Analisis kolerasi dan determinasi antara <i>fault fracture density</i> (FFD) dengan bencana tanah longsor kabupaten Simalungun, Sumatera Utara (Hana Rosyida*, Nugroho Budi Wibowo, Icha Khaerunnisa, Indar Mery S. A., Dea Mutiara Jannah, Fathunajah Elsha C., Salma Khoirunnisa).....	39

Analisis perubahan Coulomb stress gempa bumi Mw 5,8 di kabupaten Tapanuli Utara 1 Oktober 2022

Lailatul Husna Lubis^{1*}, Faradilla Firdani Harefa²,
Christofel Haposan Sibuea³, Mira Hestina Ginting⁴

^{1,2} Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Sumatera Utara
Jln. Lapangan Golf, Desa Durian Jangak, Kecamatan Pancur Batu, Kabupaten Deli Serdang
^{3,4} Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika
Jln. Geofisika No.1 Tuntungan 1, Pancur Batu, Deli Serdang
*email:lailatulhusnalubis@uinsu.ac.id

Abstrak - Gempa bumi dengan magnitudo Mw 5,8 mengguncangkan wilayah Tapanuli Utara pada tanggal 1 Oktober 2022 (02:28:43 WIB) pada segemen Renun yang disebabkan oleh jenis sesar (right-lateral strike slip). Data gempa bumi utama dan parameter sesar dari mekanisme sumber diperoleh dari Global CMT dan data gempa bumi susulan diperoleh dari katalog BMKG dengan rentang wilayah lokasi penelitian berada pada 1,60° LU – 2,52° LU dan 98,55° BT – 99,50° BT. Metode yang digunakan adalah metode Coulomb Stress dengan menggunakan software Coulomb 3.4. Hasil analisa perubahan coulomb stress yaitu daerah yang terdapat peningkatan stress batuan sebesar 0 hingga 0,2 bar dan penurunan stress batuan sebesar 0 hingga -0,2 bar. Daerah yang memiliki peningkatan stress berada pada arah utara, timur laut ke timur, tenggara, dan barat daya. Sedangkan daerah yang mengalami penurunan stress berada pada arah timur laut, timur ke tenggara, selatan dan barat ke barat laut

Kata kunci: Gempa bumi, Perubahan Coulomb Stress, Mekanisme Sumber.

Abstract – An earthquake with a magnitude of Mw 5.8 shook the North Tapanuli region on October 1, 2022 (02:28:43 WIB) on the Renun segment caused by right-lateral strike slip. The main earthquake data and fault parameters of the source mechanism were obtained from Global CMT and aftershock data were obtained from the BMKG catalog with the range of the research location area at 1.60° LU - 2.52° LU and 98.55° East - 99.50° East. The method used is the Coulomb Stress method using Coulomb 3.4 software. The results of the analysis of coulomb stress changes are areas where there is an increase in rock stress of 0 to 0.2 bar and a decrease in rock stress of 0 to -0.2 bar. Areas that have increased stress are in the north, northeast to east, southeast, and southwest directions. While areas that experience a decrease in stress are in the northeast, east to southeast, south and west to northwest directions.

Key words: Earthquake, Coulomb Stress Change, Source Mechanism

PENDAHULUAN

Kawasan tektonik aktif di dunia di antaranya adalah daerah Sumatera. Berdasarkan kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, di antara daerah tinggi bahaya gempa terletak pada daratan Sumatera Utara. Kuatnya efek kegempaan di daerah Sumatera dikuasai oleh keadaan geografis daerahnya, di mana seluruh daerah daratan Sumatera dilalui oleh patahan aktif, zona subduksi dan jalur gunung berapi [1]. Daerah Sumatera Utara ditemukan tiga patahan ialah sesar Renun, sesar Toru dan sesar Angkola. 3 sesar tersebut membagi daerah Sumatera Utara dan menjadi pusat jalur perambatan gempa bumi [2]. Sumatera Utara mempunyai sebagian segmen gempa bumi

tektonik aktif yang berada di Renun yang terhampar dari Tapanuli Utara hingga Sidikalang [3].

Timbulnya pelepasan tegangan batuan yang saling menekan merupakan sebab terjadinya gempa bumi. Ketidakmampuan batuan menahan tekanan menyebabkan batas fleksibel batuan terlewati maka timbul pelepasan energi sebagai gempa bumi. Sehingga terjadi pergantian ambang stress batuan di wilayah pusat dan di wilayah lingkungannya. Cara memeriksa penyebaran stress batuan yang disebabkan oleh gempa bumi adalah dengan metode perubahan *Coulomb stress* [4]. *Coulomb stress* difungsikan secara luas mampu menjabarkan hubungan gempa bumi dalam area tegangannya. Kondisi

ini mempunyai indikasi krusial dalam penggambaran wilayah rawan gempa bumi [5].

LANDASAN TEORI

A. Geologi dan Tektonik Tarutung

Ibu kota kabupaten Tapanuli Utara adalah Tarutung berdasarkan geografis berlokasi di titik $2,010^{\circ}$ LU dan $98,959^{\circ}$ BT. Adanya struktur *pull-apart basin* (cekungan tarik-pisah) yang terbentuk sepanjang Sumatera Fault Zone (SFZ). Keberadaan *pull-apart basin* disebabkan karena adanya modifikasi tahap dan jurusan aktifitas lempeng Indo-Australia yang menimbulkan pembagian pada patahan Sumatera.

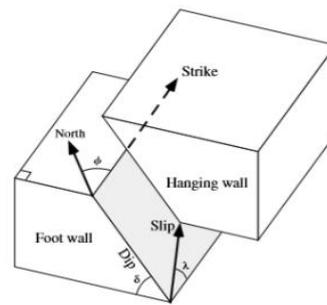
Menurut data historis kegempaan dan keberadaan sesar (Renun, Toru dan Angkola) yang bergerak aktif di Sumatera Fault Zone (SFZ). Tarutung adalah wilayah yang mempunyai potensi bahaya kegempaan yang cukup tinggi. Kemudian karakteristik wilayah tarutung dikuasai oleh batuan vulkanik, yaitu batuan beku (seperti batuan beku andesit yang diperkirakan berumur tersier yang sudah mengalami pelapukan), piroklastik (yang di perkirakan berumur kuartar) dan breksi vulkanik [6]. Batuan yang berumur tersier yang sudah melapuk juga sedimen kuartar yang berkelakuan lepas, urai dan unconsolidated akan meningkatkan dampak getaran, mengakibatkan rawan gempa bumi [7].

B. Mekanisme Sumber

Mekanisme sumber gempa bumi adalah metode yang difungsikan dalam memastikan jenis sesar dengan mempelajari parameter sesar yaitu *dip*, *rake* dan *strike* yang ditinjau berdasarkan gelombang P yang tercatat oleh stasiun pencatat. Gelombang P adalah gelombang badan yang menjalar di dalam bumi baik di media cair (air dan magma), padat, gas maupun udara. Gelombang ini merupakan gelombang yang pertama tercatat oleh seismograf karena mempunyai kecepatan yang lebih tinggi dari pada gelombang lainnya [8]. Mekanisme sumber dihasilkan dari solusi momen tensor dengan menggunakan gelombang P. Hasil dari solusi momen tensor ditampilkan secara grafik menggunakan diagram bola fokus (*beach ball*) [9]

Sesar adalah bentuk dari patahan yang sudah terjadi pergeseran. Gempa bumi sangat berdampak terhadap pergerakan lempeng atau batuan pada sesar. Untuk mengetahui suatu jenis sesar pada gempa bumi, diperlukan nilai-nilai

dari parameter sesar ditunjukkan pada **gambar 1**.



Gambar 1. *Strike*, *dip* dan *rake* pada bidang sesar

- Strike* atau Jurus (ϕ) adalah arah garis potongan jurus patahan dengan arah utara. jurus diukur dari arah utara ke timur. Besarnya nilai sudut *strike* yaitu $0^{\circ} \leq \phi \leq 360^{\circ}$.
- Dip* (δ) yaitu sudut yang dibuat dari bidang patahan dengan bagian sejajar dan dihitung pada bagian tegak lurus *strike* sesar. Besar nilai *dip* yaitu $0^{\circ} \leq \delta \leq 90^{\circ}$.
- Rake* (λ) merupakan sudut yang terbentuk oleh *slip* dan *strike*. Pada sesar naik bobot *rake* positif dan sesar turun berbobot minus. Besar nilai *rake* yaitu $-180^{\circ} \leq \lambda \leq 180^{\circ}$.

Jenis-jenis sesar pada umumnya ada tiga, yakni:

- Strike slip faults* merupakan sesar yang bergeser secara horizontal. Jika bidang di depan yang bergeser ke kiri dinamakan dengan *left-lateral*, sedangkan jika bergeser ke kanan dinamakan *right-lateral*.
- Dip-slip fault* merupakan patahan yang bergeser secara vertikal. Jika bergeser ke atas atau naik dinamakan dengan *reverse fault*. Sedangkan jika bergeser kebawah atau turun dinamakan dengan *normal fault*.

Dip-strike slip fault adalah campuran dari *strike-slip fault* dengan *dip-slip fault*. Sesar campuran ini dinamakan dengan *Obique fault* [8].

METODE PENELITIAN

A. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini berada di wilayah Tapanuli Utara pada koordinat $1,60^{\circ}$ LU – $2,52^{\circ}$ LU dan $98,55^{\circ}$ BT – $99,50^{\circ}$ BT. Tujuan Penelitian ini dilaksanakan untuk menganalisis perubahan coulomb stress gempa bumi utama dan selanjutnya proses penelitian dilakukan di

BMKG stasiun Geofisik kelas I Deli Serdang dan kampus IV UIN Sumatera Utara.

B. Data

Data yang diperlukan dalam penelitian ini berupa data gempa bumi utama dan parameter besarnya di wilayah Kabupaten Tapanuli Utara yang diambil dari website Global CMT dengan mencari wilayah Tapanuli Utara 1,60° LU – 2,52° LU dan 98,55° BT – 99,50° BT. Data yang diperoleh waktu kejadian: 1 Oktober 2022, *longitude*: 98,90°, *latitude*: 2,17°, kedalaman: 16 km, magnitudo: 5,8 Mw, *strike*: 146°, *dip*: 81°, *rake*: -176° dan bentuk bola fokusnya [10](Global CMT, 2023). Selanjutnya data katalog gempa susulan bersumber dari BMKG dengan mencari wilayah Tapanuli Utara 1,60° LU – 2,52° LU dan 98,55° BT – 99,50° BT. Data tersebut diambil dari tanggal 30 September 2022 (19:40:31 UTC) hingga 9 Oktober 2022 (00:00:00 UTC), dari skala magnitudo 2-10. Data yang bersumber dari website BMKG diperoleh sebanyak 92 gempa susulan dengan rata-rata kedalaman 10 km [10].

C. Coulomb Stress

Software yang diperuntukkan untuk proses analisis perubahan *coulomb stress* adalah software *coulomb* 3.4.2 dari *United States Geological Survey* (USGS).

Coulomb stress ialah selisih tegangan geser dengan kekuatan gesekan. Tegangan geser yaitu tegangan yang posisinya sejajar dengan permukaan bidang sesar dan kekuatan gesekan ialah batas kekuatan dalam menahan gesekan sebelum pecah pada permukaan. Berdasarkan teori kerutuhan *coulomb*, saat ada dua batuan yang saling bergeser dengan arah yang berbeda maka tegangan geser akan bekerja sejajar dengan bidang sesar. Selain dari pada itu juga bekerja tegangan yang tegak lurus terhadap bidang sesar yang disebut tegangan normal [11].

Coulomb stress adalah cara yang dilakukan dalam memeriksa persebaran tegangan yang masih tersimpan atau telah terlepas pada suatu sesar. Cara ini mampu menunjukkan arah pergerakan tegangan dalam menganalisis arah persebaran gempa bumi susulan [12]. Definisi perubahan *coulomb stress* (ΔCS) dapat dilihat pada rumusan sebagai berikut [4]

$$\Delta CS = \Delta \tau + \mu' \Delta \sigma \quad (1)$$

Diketahui:

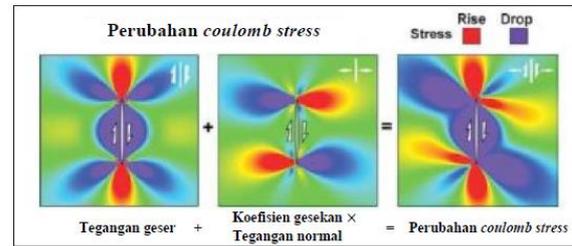
ΔCS = Perubahan *coulomb stress* (bar)

$\Delta \tau$ = Tegangan geser (bar)

μ' = Koefisien gesekan (0,4)

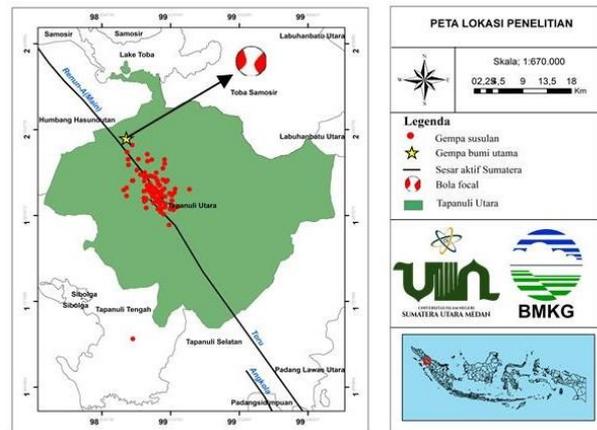
$\Delta \sigma$ = Tegangan normal (bar)

Gambar 2 merupakan ilustrasi dari perubahan *coulomb stress* [13]



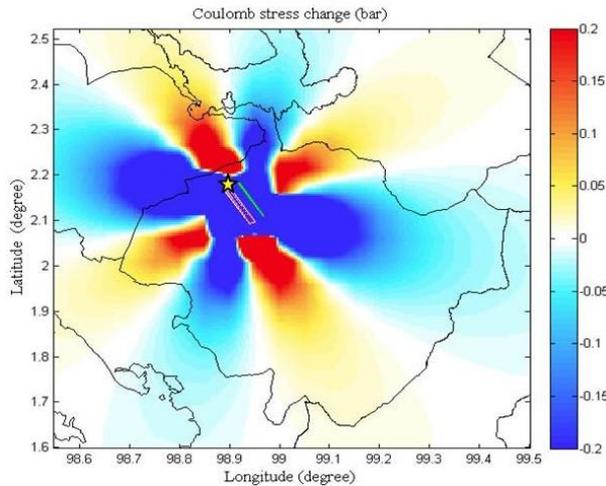
Gambar 2. Ilustrasi perubahan *coulomb stress*. Warna merah menunjukkan perubahan *coulomb stress* positif (meningkat) dan warna biru menunjukkan perubahan *coulomb stress* negatif (menurun).

HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 3. Peta Lokasi Penelitian

Gambar 3 menunjukkan bahwa lokasi episenter gempa bumi utama terletak pada segmen renun, sedangkan episenter gempa susulannya mendominasi di daerah Tarutung terkhususnya pada wilayah cekung tarik pisah (*Pull Apart Basin*). Gempa bumi tersebut merupakan gempa bumi tipe *mainshock-aftershock* yaitu gempa bumi utama dan kemudian diikuti oleh serangkaian gempa bumi susulan. Hasil mekanisme sumber menunjukkan bahwa gempa bumi utama Mw 5,8 terjadi pada segmen Renun yang disebabkan oleh jenis sesar geser ke kanan (*right-lateral strike slip*) [14].

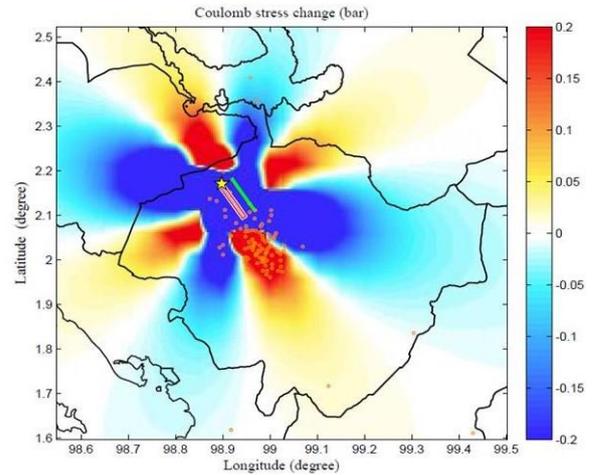


Gambar 4. Hasil analisis perubahan *coulomb stress* gempa bumi Mw 5,8 pada 1 Oktober 2022.

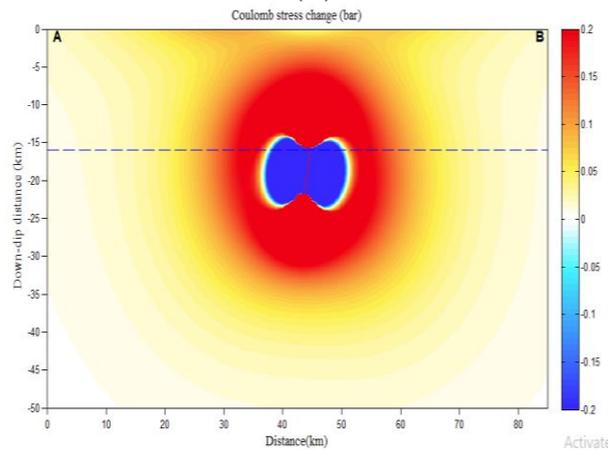
Gambar 4 menunjukkan hasil analisis perubahan *coulomb stress* secara horizontal dari gempa bumi Mw 5,8 di Kabupaten Tapanuli Utara, di mana pada gambar tersebut menjelaskan bahwa terdapat delapan lobus yang terdiri dari Empat lobus biru dan 4 lobus merah. Daerah yang mengalami penurunan *stress* batuan ditandai lobus biru terjadi dari timur laut, timur ke tenggara, selatan dan barat ke barat laut, sedangkan daerah yang terjadi peningkatan *stress* batuan ditandai lobus merah berarah barat laut ke utara, timur laut ke timur, tenggara, dan barat daya. Simbol bintang kuning memperlihatkan lokasi hiposenter gempa bumi utama Mw 5,8 di Kabupaten Tapanuli Utara. Dari posisi tersebut terlihat bahwa hiposenter gempa bumi utama berada pada lobus negatif berkisar 0 sampai -0,2 bar. Sehingga pada lobus negatif tersebut *stress* batuan telah terlepas dan daerah ini mengalami relaksasi tetapi masih diperkirakan terdapat *stress* di daerah ini.

Pada **gambar 5 (a)** menunjukkan titik persebaran gempa bumi susulan yang disimbolkan bulatan oranye setelah kejadian gempa pada tanggal 1 Oktober 2022 yang dominan tersebar di daerah yang memiliki tingkat *stress* tinggi pada arah tenggara. **Gambar 5 (b)** menunjukkan hasil perubahan *coulomb stress* secara vertikal gempa bumi 1 Oktober 2022 Mw 5,8. Pada zona lobus merah yang mengalami peningkatan *stress* batuan sebesar 0 hingga 0,2 bar berada pada kedalaman berkisar 30 km, sedangkan zona lobus biru yang merupakan daerah penurunan *stress* batuan sebesar 0 hingga -0,2 bar berada pada kedalaman berkisar 23 km. hasil penelitian ini daerah yang memiliki tingkat *stress* tinggi berdasarkan teori pada penelitian yang

dilakukan oleh Siwi dkk. ([4]) akan menimbulkan kejadian gempa bumi yang terjadi pasca terjadi gempa 1 Oktober 2022 terbukti setelah kejadian gemp utama tersebut daerah yang menyimpan *stress* tinggi pada arah tenggara mampu menimbulkan gempa susulan yang ditunjukkan pada **gambar 5 (a)**.



(A)



(B)

Gambar 5. (A). Titik persebaran gempa susulan. (B). Cross section dari perubahan *coulomb stress* terhadap kedalaman.

Terjadinya peningkatan *stress* di wilayah Tapanuli Utara disebabkan oleh sesar geser ke kanan yang terjadi pada segmen Renun dan didukung oleh litologi daerah tarutung yang didominasi oleh batuan vulkanik, berupa batuan beku (seperti batuan beku andesit yang diperkirakan berumur tersier yang sudah mengalami pelapukan), piroklastik (yang diperkirakan berumur kuartar) dan breksi vulkanik [6]. Batuan yang berumur tersier yang sudah melapuk juga sedimen kuartar yang berkelakuan lepas, urai, dan unconsolidated akan meningkatkan dampak getaran, akibatnya rawan gempa bumi [7].

KESIMPULAN

Terdapat delapan lobus hasil dari analisis perubahan coulomb stress pada gempa bumi utama. Empat lobus biru dan empat lobus merah. Gempa bumi utama berada pada lobus negatif berkisar 0 sampai $-0,2$ bar dengan kedalaman berkisar 23 km sehingga pada lobus negatif tersebut stress telah terlepas. Sedangkan daerah yang mengalami peningkatan stress ditandai dengan lobus merah berkisar 0 hingga $0,2$ bar dengan kedalaman 30 km.

Hasil penelitian ini mampu menunjukkan zona yang memiliki peningkatan stress batuan yang dapat menimbulkan gempa bumi dimasa yang akan datang sehingga memberikan informasi lebih awal dalam mitigasi bencana alam terkhususnya gempa bumi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Metrikasari, & A. Choiruddin, "Pemodelan Risiko Gempa Bumi di Pulau Sumatera Menggunakan Model Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process", *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, vol. 9 no.2, 2021.
<https://doi.org/10.12962/j23373520.v9i2.52318>
- [2] L. Kurniawan, "Kajian penilaian bahaya tanah longsor provinsi sumatera utara", *Jurnal Sains Dan Teknologi Indonesia*, vol. 10 no. 2, pp. 90–98, 2008.
- [3] S. Wulandari, A. F. T. Parera, & L. H. Lubis, "Relokasi Gempabumi di Sesar Renun A, B, Dan C dengan Menggunakan Metode Double Difference (Hypo-DD)", *GRAVITASI: Jurnal Pendidikan Fisika dan Sains*, vol. 4, no. 2, pp. 30-35, 2021.
- [4] P. W. Siwi, S. P. D. Sriyanto, A. T. Rondonuwu, & P. M. Silangen, "Perubahan coulomb stress akibat gempa bumi laut maluku 7 Januari 2019", *Jurnal Geosaintek*, vol. 6, no. 3, pp. 137–142, 2020).
<https://doi.org/10.12962/j25023659.v6i3.7030>
- [5] I. M. K. A. Astra, "Coulomb static stress change dalam interaksi gempa bumi doublets 5.8 Mw dan 5.9 Mw 22 Januari 2007 dan gempa bumi 7.0 Mw 16 Juni 2010 di wilayah Papua", *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*, vol. 12, no. 1, pp. 103–111, 2011).
<https://doi.org/10.31172/jmg.v12i1.83>
- [6] R. Safitri, & Fattah. "Analisa Relokasi Hiposenter Gempa Tarutung Sumatera Utara 2008 menggunakan Metode Coupled Velocity-Hypocenter", *Repo.Itera.Ac.Id.*, 2008.
http://repo.itera.ac.id/assets/file_upload/SB2009140100/12116107_20_124203.pdf
- [7] N. K. Praja, & A. Omang, "Gempa bumi merusak Jawa Timur selatan", *Jurnal Geominerba*, vol 6, no. 2, pp. 136–149, 2021.
- [8] N. N. S. K. Wardani, K. N. Suarbawa, & R. Kusnandar, "Penentuan jenis sesar pada gempa bumi Lombok tanggal 1 Juli sampai 31 Desember 2018 menggunakan metode mekanisme fokus determination of fault type of Lombok earthquakes from July 1 to using focal mechanism method", *Buletin Fisika*, vol. 22, no. 2, pp. 91–96, 2021.
- [9] W. Rahmawati, & M. Madlazim, "Analisis distribusi tegangan normal gempa bumi di wilayah sesar Sumatera menggunakan metode inversi tegangan", *Inovasi Fisika Indonesia*, vol. 10, no. 2, pp. 73–80, 2021.
<https://doi.org/10.26740/ifi.v10n2.p73-80>
- [10] Global CMT. (2023). Global CMT Catalog [Online]. <https://www.globalcmt.org/cgi-bin/globalcmt-cgi-bin/CMT5/form?itype=ynd&yr=2022&mo=9&day=30&otype=ynd&oyr=2022&omo=10&oday=30&jyr=1976&jday=1&ojyr=1976&ojday=1&nday=1&lmw=0&umw=10&lms=0&ums=10&lmb=0&umb=10&llat=01.57&ulat=4&llon=98.5&ulon=110&lhd=0&uhd=10>
- [11] BMKG, (2023). "Skala intensitas gempa bumi (SIG) BMKG", www.bmkg.go.id.
<https://bmkg.go.id/gempabumi/skala-intensitas-gempabumi.bmkg>
- [12] H. U. Mala, & J. N. Mohamad, "Arah Penyebaran Stress Coulomb pada Batuan akibat Gempabumi Kairatu 26 September 2019", *Jurnal Wahana Fisika*, vol. 5. no. 1, pp. 62–70, 2020.
<https://doi.org/10.17509/wafi.v5i1.24500>
- [13] T. A. P. Setiadi, Y. H. Perdana, & S. Rohadi, "Analisis coulomb stress gempa bumi Deli Serdang 16 Januari 2017", *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-*

- JOURNAL) SNF2017*, 56–64, 2017.
<https://doi.org/10.21009/03.SNF2017.02.EPA.09>
- [14] T. A. P. Setiadi, M. A. Rahman, Y. H. Perdana, A. A. Martha, N. Heryandoko, & S. Rohadi, "Analisis Sumber Gempa Bumi Lebak 23 Januari 2018", *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, vol. 10, no. 3, pp. 149–158, 2019).
<https://doi.org/10.34126/jlbg.v10i3.254>
- [15] P. Supendi, P. Priyobudi, R. T. Imananta, J. Jatnika, D. Sianipar, Y.H. Ali, N. Heryandoko, D. Daryono, S. P. Adi, D. Karnawati, S. D. Anugerah, I.Fatchurochman, A. Sudrajat, "Analisis gempa bumi Tarutung (Sumatera Utara) Mw 5.8 tanggal 1 Oktober 2022", Badan Meterorologi, Klimatologi, Dan Geofisika (BMKG).
<https://www.bmkg.go.id/artikel/?p=analisis-gempabumi-tarutung-sumatera-utara-mw-5-8-tanggal-1-oktober-2022&lang=ID,2022>.
- [16] Badan Meterorologi, Klimatologi, Dan Geofisika (BMKG).
<https://www.bmkg.go.id/artikel/?p=analisis-gempabumi-tarutung-sumatera-utara-mw-5-8-tanggal-1-oktober-2022&lang=ID>

Analisis mineral magnetik sedimen sungai Jeneberang berdasarkan data suseptibilitas magnetik

M Reski Saputra, Vistarani Arini Tiwow*, Agus Susanto

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Makassar
Jalan Daeng Tata Raya, Kampus UNM Parangtambung, 90224 Makassar

*email: vistatiwow@unm.ac.id

Abstrak – Telah dilakukan penelitian bertujuan untuk menganalisis nilai suseptibilitas magnetik sedimen Sungai Jeneberang. Sampel diperoleh di Sungai Jeneberang pada koordinat $05^{\circ}17'06,5''$ S $119^{\circ}34'49,1''$ E dengan mengambil sampel pada 30 titik yang berbeda. Metode yang digunakan adalah metode suseptibilitas magnetik. Hasil menunjukkan bahwa nilai suseptibilitas magnetik sedimen Sungai Jeneberang bervariasi dengan rentang $254,3 \times 10^{-8}$ m³/kg hingga $4507,8 \times 10^{-8}$ m³/kg. Hal ini mengindikasikan bahwa sampel mengandung mineral magnetit (Fe₃O₄) yang bersifat ferrimagnetik. Fe₃O₄ diduga bersumber dari litogenik (secara alami) hasil pelapukan batuan beku dan proses pedogenik serta juga antropogenik (aktivitas manusia) yaitu hasil pembakaran.

Kata kunci: sedimen, mineral magnetik, suseptibilitas magnetik, sungai Jeneberang.

Abstract – Research has been carried out aimed at analyzing the magnetic susceptibility value of Jeneberang River sediments. Samples were obtained in the Jeneberang River at coordinates $05^{\circ}17'06.5''$ S $119^{\circ}34'49.1''$ E by taking samples at 30 different points. The method used is the magnetic susceptibility method. The results show that the magnetic susceptibility value of Jeneberang River sediment varies with a range of 254.3×10^{-8} m³/kg to 4507.8×10^{-8} m³/kg. These results indicate that the sediment samples contain the mineral magnetite (Fe₃O₄) which is ferrimagnetic. Fe₃O₄ is thought to originate from lithogenic (natural) weathering of igneous rocks and pedogenic processes as well as anthropogenic (human activity), namely the result of combustion.

Key words: sediment, magnetic mineral, magnetic susceptibility, Jeneberang river

PENDAHULUAN

Sungai Jeneberang adalah salah satu sungai besar yang ada di Kabupaten Gowa. Sungai ini terletak pada dua wilayah administrasi kota dan kabupaten yaitu Kota Makassar dan Kabupaten Gowa. Sungai ini berasal dan mengalir dari bagian timur Gunung Bawakaraeng dan Gunung Lompobattang (Kabupaten Gowa) yang kemudian menuju hilirnya di selat Makassar (Kota Makassar). Secara geografis Daerah Pengaliran Sungai (DPS) Jeneberang terletak pada koordinat $05^{\circ} 10' 00''$ LS - $05^{\circ} 26' 00''$ LS dan $119^{\circ} 23' 50''$ BT - $119^{\circ} 56' 10''$ BT. Pada lokasi dimana daerah aliran sungai jeneberang berada, secara topografi merupakan wilayah pegunungan Malino (Gunung Lompobattang), wilayah lipatan tersier selatan Combi, dan wilayah dataran rendah aluvial selatan Makassar. Luas wilayah pengaliran sungai Jeneberang sebesar 727 km² dengan panjang sungai 78,75 km. Tidak dapat dipungkiri bahwa Sungai Jeneberang yang berada di daerah

selatan Kota Makassar memiliki peran yang sangat besar bagi kota ini [1].

Sungai Jeneberang yang memiliki peran penting dalam pengendalian banjir Kota Makassar dan Kabupaten Gowa memerlukan perhatian khusus terutama setelah terjadinya longsor di hulu sungai ini yaitu di Gunung Bawakaraeng yang memiliki volume longsor ± 200 juta kubik lumpur dan pasir. Pasir dan lumpur yang terdapat pada hulu sungai akan terbawa di sepanjang aliran sungai yang mempengaruhi sedimentasi di sepanjang sungai [1].

Permasalahan Sungai Jeneberang adalah pencemaran air sungai yang diakibatkan oleh aktivitas antropogenik. Badan Lingkungan Hidup Daerah (BLHD) Sulawesi Selatan (Sulsel) bahkan melabeli kualitas air sungai yang melintasi Kabupaten Gowa dan dua kecamatan di Makassar ini, sangat buruk. Masalah lain yang dihadapi adalah aktivitas masyarakat di sekitar sungai yang berakibat pada pencemaran sungai pertanian, limbah rumah tangga, hotel, dan tempat wisata.

Berakibat pada sungai menjadi tercemar dan membawa endapan sedimen sungai yang tercemar. Umumnya pencemaran air Sungai Jeneberang ini berasal dari erosi di pinggir sungai yang disebabkan oleh penebangan hutan. Pencemaran juga diakibatkan oleh aktivitas pertambangan yang dilakukan di pinggir sungai. Hal inilah yang menjadi penyebab terjadinya peningkatan sedimentasi di aliran Sungai Jeneberang.

Sedimen sungai merupakan hasil dari sebuah proses sedimentasi di lingkungan sungai yang berasal hasil pelapukan batuan dasar maupun yang berasal dari proses erosi, bahan organik, partikel atau senyawa antropogenik (limbah yang dihasilkan dari aktivitas manusia). Permasalahan yang timbul pada sedimen sungai adalah kehadiran bahan (zat) yang bersifat membahayakan lingkungan (polutan). Polutan yang berasal dari antropogenik merupakan sumber polutan yang dominan pada sedimen sungai, seperti kegiatan penggunaan lahan (perkotaan dan pedesaan) yang berada di sekitar sungai, pembuangan limbah industri, limbah rumah tangga, limbah pertambangan maupun limbah pertanian [2].

Sifat mineral magnetik pada sedimen bergantung pada batuan dan juga lingkungan pembentuknya. Sensifitas mineral magnetik terhadap lingkungan pembentuknya menjadi proxy indicator untuk mengetahui proses lingkungan pembentuknya baik yang dipengaruhi oleh proses alamiah atau litogenik maupun karena komponen antropogenik. Hal ini sangat membantu dalam menginvestigasi sumber mineral magnetik pada sedimen sungai sehingga dapat diketahui proses perubahan lingkungan yang terjadi di perairan sungai [3].

Dalam metode kemagnetan batuan salah satu parameter yang lazim dimanfaatkan untuk menginvestigasi sumber mineral magnetik pada batuan dan sedimen yaitu parameter suseptibilitas magnetik. Parameter suseptibilitas magnetik ternyata telah berhasil membuktikan bahwa terdapat sedimen Sungai Biyonga yang masuk ke Danau Limboto yang cenderung berasal dari komponen antropogenik terutama dari aktivitas pertanian dan limbah pemukiman yang terdapat di perairan Sungai Biyonga [3].

Dalam penelitian ini digunakan metode suseptibilitas magnetik yang merupakan salah satu parameter magnetik paling umum untuk mengetahui mineral magnetik dan logam berat, dan pengukurannya sangat mudah sehingga banyak digunakan dalam studi kemagnetan

dalam penerapannya di berbagai bidang terutama masalah lingkungan. Suseptibilitas magnetik adalah ukuran dari kemampuan suatu bahan untuk termagnetisasi [4].

Suseptibilitas magnetik sering juga digabungkan dengan perubahan unsur kimia terutama untuk membedakan kondisi lingkungan tertentu. Suseptibilitas magnetik secara teoritis, berkorelasi positif dengan kandungan mineral feromagnetik yang akan terlihat dengan adanya unsur Fe dalam pengujian unsur sampel kimia [5]–[7]. Kandungan mineral magnetik di alam yang ditandai dengan adanya unsur kimia Fe umumnya bersifat ferrimagnetik yang dominan dengan nilai x serta dapat digunakan sebagai indikator kondisi lingkungan. Karena unsur Fe yang dapat berasosiasi dengan unsur lain untuk membentuk mineral paramagnetik sehingga keberadaan unsur Fe terukur tidak selalu bernilai positif dengan y dan jika pun bernilai positif, seringkali koefisien korelasinya sangat rendah. Hal ini karena unsur Fe dominan dalam sampel tidak selalu berkorelasi positif dengan suseptibilitas magnetik [8].

Berdasarkan penelitian sebelumnya, beberapa studi telah menunjukkan analisis mineral magnetik pada sedimen sungai. Berdasarkan hasil pengukuran suseptibilitas magnetik, sampel suspended sedimen Sungai Citarum memiliki nilai yang cenderung menurun dari hulu ke hilir, yang mana sampel di hulu memiliki nilai suseptibilitas $1005,8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ dan sampel hilir memiliki nilai suseptibilitas magnetik $319,6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Sementara nilai suseptibilitas anak Sungai Citarum bervariasi dari $(652,4-256,0) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ [9].

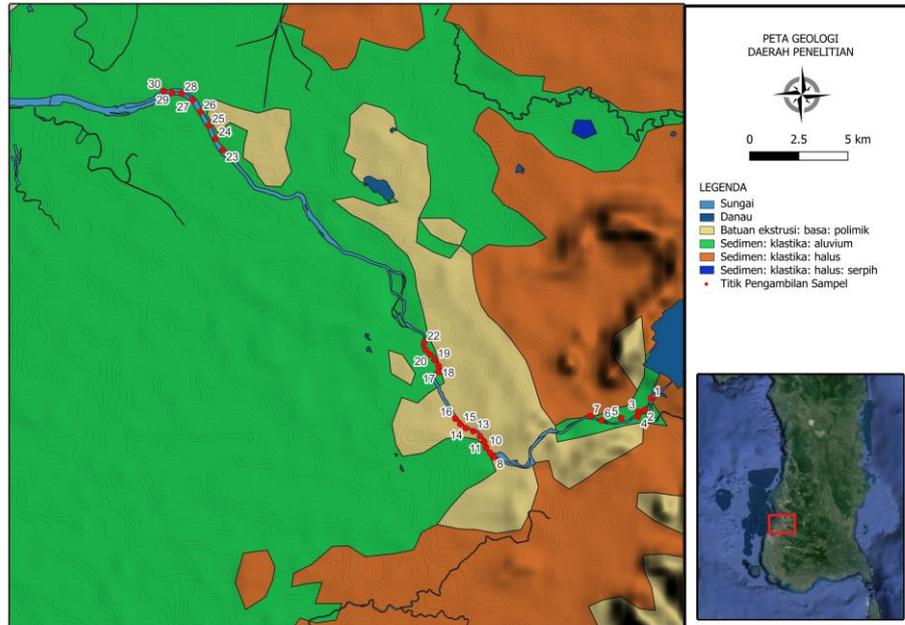
Penelitian lain mengenai suseptibilitas magnetik yaitu nilai suseptibilitas mineral magnetik (χ_{LF}) sedimen Sungai Biyonga lebih tinggi dari $10 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Ini menunjukkan bahwa semua sampel sedimen mengandung mineral magnetik yang didominasi oleh kelompok mineral feromagnetik karena pada umumnya nilai χ_{LF} lebih tinggi dari $10 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ yang mengindikasikan bahwa sampel dikontrol oleh mineral feromagnetik [3].

Berdasarkan latar belakang di atas, maka perlu dilakukan penelitian yang bertujuan untuk menganalisis sifat mineral magnetik sedimen Sungai Jeneberang menggunakan metode suseptibilitas magnetik. Karakterisasi mineral magnetik pada sedimen diharapkan dapat digunakan sebagai monitoring kondisi lingkungan di Sungai Jeneberang.

PROSEDUR PENELITIAN

Lokasi pengambilan sampel di Sungai Jeneberang (Gambar 1). Pengambilan sampel menggunakan sedimen grab. Sedimen grab

diturunkan ke dasar Sungai Jeneberang menggunakan tali. Sampel yang diperoleh, kemudian dimasukkan ke dalam wadah plastik penyimpanan sementara (holder) yang sudah diberikan label berupa lokasi dan nomor sampel.



Gambar 1. Lokasi pengambilan sampel.

Sampel sedimen yang sudah diambil, diletakkan pada wadah plastik. Sampel kemudian dikeringkan di bawah sinar matahari sampai sampel mengering. Sampel kemudian digerus dengan pastel dan mortar hingga berukuran 100 mesh.

Sampel selanjutnya diayak menggunakan ayakan 100 mesh dan kemudian sampel ditimbang sebesar 10 g lalu sampel dikemas dan diberi label, sampel siap diuji dengan metode susceptibilitas magnetik menggunakan Bartington MS2B Susceptibility Meter.

Sampel yang telah dikemas dalam sampel holder kemudian diukur susceptibilitas magnetiknya. Susceptibilitas magnetik diukur dalam dua frekuensi, yaitu 47 Hz untuk frekuensi rendah (χ_{LF}) dan 4700 Hz untuk frekuensi tinggi (χ_{HF}) menggunakan Bartington MS2 Susceptibility Meter dengan sensor MS2B (Bartington Instrument Ltd., Oxford, United Kingdom).

Berdasarkan data nilai susceptibilitas magnetik, maka diperoleh plot grafik hubungan antara nilai χ_{LF} dan χ_{FD} . Nilai χ_{LF} sebagai sumbu x dan nilai χ_{FD} sebagai sumbu y. Grafik ini digunakan untuk melihat bagaimana hubungan antara χ_{LF} dan χ_{FD} . Grafik antara nilai χ_{LF} dan χ_{FD}

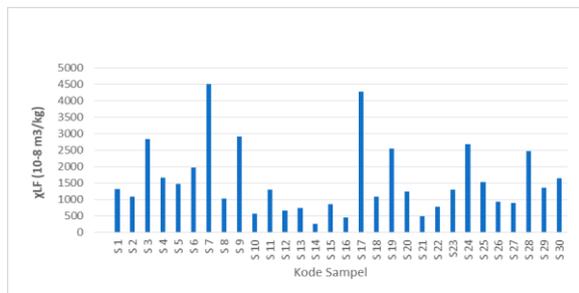
ini juga dapat digunakan untuk membedakan antara ukuran butir magnetik dan sebaran domain serta memberikan pesan awal tentang klasifikasi sifat magnetik serta sumbernya [10]–[12]. Setelah didapatkan hasil dari χ_{FD} kemudian dicocokkan hasil pengukuran dengan nilai susceptibilitas berdasarkan [13].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran susceptibilitas magnetik menggunakan alat Bartington MS2 Susceptibility meter (Bartington Instrument Ltd., Oxford United Kingdom) dilengkapi sensor MS2B yang bekerja pada 2 frekuensi yakni 470 Hz untuk frekuensi rendah dan 4700 Hz untuk frekuensi tinggi. Tingginya nilai susceptibilitas magnetik pada frekuensi rendah mengindikasikan tinggi pula kandungan mineral magnetik pada sampel yang diuji. Pengukuran yang dilakukan pada dua frekuensi diterapkan pada medan magnet bolak balik, umumnya digunakan untuk mendeteksi keberadaan mineral ultrafine ferrimagnetik (superparamagnetik fraksinya kurang dari $0.03\mu\text{m}$) yang terjadi sebagai kristal dan sampai batas domain tertentu (kira-kira fraksi lebih

besar dari 0.03 sampai kurang dari 0.06 μm) pengukuran frekuensi yang lebih tinggi tidak memungkinkan butir superparamagnetik [13].

Hasil pengukuran nilai suseptibilitas magnetik sedimen Sungai Jeneberang pada frekuensi rendah dan frekuensi tinggi direpresentasikan dalam bentuk diagram batang pada Gambar 2 dan Gambar 3. Gambar 2 menunjukkan bahwa nilai suseptibilitas magnetik sedimen sungai terendah berada pada sampel S14 sebesar $253,4 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ dan tertinggi berada pada sampel S7 sebesar $4507,8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Sementara, Gambar 3 menunjukkan bahwa nilai suseptibilitas magnetik sedimen sungai terendah berada pada sampel S14 sebesar $250,0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ dan tertinggi berada pada sampel S7 sebesar $4489,1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$.

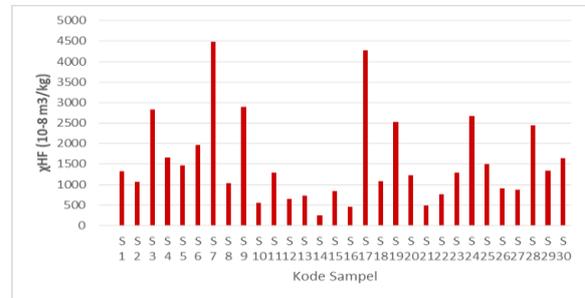


Gambar 2. Nilai suseptibilitas magnetik pada frekuensi rendah (χ_{LF}) sampel sedimen Sungai Jeneberang

Nilai suseptibilitas magnetik yang paling rendah yaitu $253,4 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ berada pada titik S14 sekitar daerah perkebunan dan suseptibilitas magnetik tertinggi yaitu $4507,8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ berada pada daerah tambang pasir besi. Nilai suseptibilitas yang rendah mengindikasikan bahwa kandungan Fe pada sampel tersebut rendah. Sedangkan nilai suseptibilitas magnetik yang tinggi mengindikasikan bahwa kandungan Fe pada sampel tersebut tinggi [11], [14]–[17]. Beberapa hal yang dapat mempengaruhi nilai suseptibilitas magnetik adalah geologi, sedimentasi, dan kandungan mineral magnetik (Kucer, 2012).

Berdasarkan hasil pengukuran suseptibilitas magnetik, mineral magnetik yang terkandung pada sedimen Sungai Jeneberang diduga termasuk mineral bersifat ferimagnetik. Hal ini nampak pada nilai suseptibilitas magnetik sedimen Sungai Jeneberang lebih dari $10 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Menurut [13], pada umumnya nilai χ_{LF} lebih tinggi dari $10 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ mengindikasikan bahwa sampel dikontrol oleh mineral

ferimagnetik. Mineral ferimagnetik diduga Penelitian in sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh [3], nilai suseptibilitas mineral magnetik (χ_{LF}) sedimen Sungai Biyonga lebih tinggi dari $10 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$.

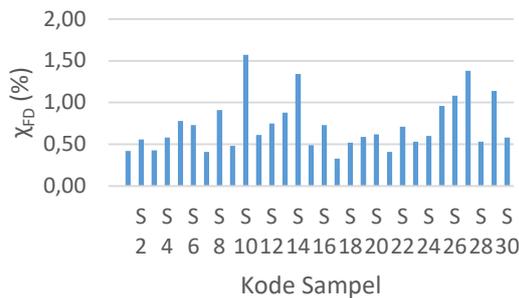


Gambar 3. Nilai suseptibilitas magnetik pada frekuensi tinggi (χ_{HF}) sampel sedimen Sungai Jeneberang

Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai χ_{FD} berada pada rentang 0,33-1,57%. Jika nilai χ_{FD} dibawah <2% maka berada pada kategori rendah (low category) χ_{FD} . Menurut [13] χ_{FD} dengan nilai persentase kurang dari 2% artinya hampir tidak ada bulir superparamagnetik (SP). Selain itu ukuran bulir magnetik sedimen Sungai Jeneberang terindikasi berukuran besar dan bertekstur kasar. Bulir superparamagnetik merupakan mineral dengan ukuran bulir yang sangat halus (lebih kecil dari $\sim 0,03 \mu m$) dan memiliki perilaku magnetik yang memperlihatkan perubahan terhadap waktu seperti pada sampel sedimen Sungai Citarum bagian hilir. Bulir magnetik alami (litogenik) sebagian besar merupakan bulir superparamagnetik [18]. Pada sedimen yang tercemar oleh polutan (antropogenik) sering ditemukan nilai χ_{FD} (%) rendah (1–4%), sedangkan tanah yang mengalami proses secara alami atau litogenik memiliki nilai χ_{FD} (%) yang lebih tinggi (>10%) [19].

Gambar 5 menunjukkan plot grafik antara χ_{FD} versus χ_{LF} yang mendeskripsikan mengenai tipikal sampel yang didominasi oleh variasi domain dan sumber mineral magnetik. Hasil yang diperoleh sampel sedimen Sungai Jeneberang dominan mengandung domain SSD (*Single Stable Domain*) dan MD (*Multi Domain*). Temuan domain tersebut menggambarkan bahwa mineral ferimagnetik yang terkandung pada sampel sedimen Sungai Jeneberang diduga berasal dari litogenik (secara alami) yaitu pelapukan batuan beku dan proses

pedogenik, serta berasal dari antropogenik yaitu hasil pembakaran [13].

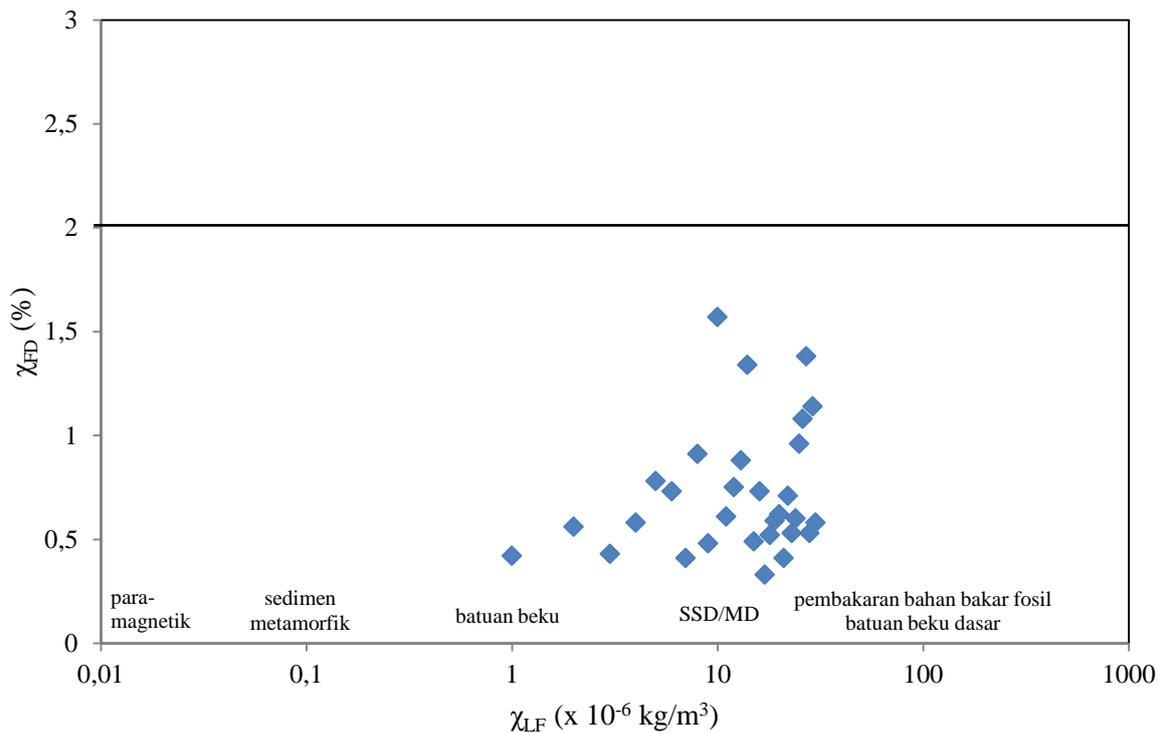


Gambar 4. Nilai suseptibilitas magnetik bergantung pada frekuensi (χ_{FD}) sampel sedimen Sungai Jeneberang

Sesuai dengan geologi lokasi penelitian, dimana pada titik sampel S1 sampai S7 dan titik sampel S17-S30 merupakan daerah sedimen

klastika endapan alluvium, sedangkan pada titik sampel S8 sampai S16 merupakan batuan ekstruksi basa polimik. Batuan sedimen klastika disebut juga dengan batuan klastika-klastika atau hancuran batuan yang mengendap secara alami maupun mekanik. batuan jenis ini kemudian terbentuk sebagai hasil pengerjaan kembali dari batuan yang sudah ada sebelumnya. Proses pengerjaan kembali yang terjadi sebagai pembentukan batuan ini sendiri meliputi erosi, transportasi, pelapukan, dan juga redeposisi atau pengendapan kembali.

Batuan alluvium adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan sedimen yang diendapkan oleh sungai. Sungai terus-menerus membawa material sedimen sepanjang alirannya, biasanya akibat erosi. Sebagian besar bahan ini diambil di daerah sungai di mana air mengalir sangat cepat dan memiliki kekuatan lebih.



Gambar 3. Sebaran χ_{LF} - χ_{FD} (%) sampel sedimen Sungai Jeneberang

Batuan basa ekstruktif (batuan beku luar) atau batuan beku vulkanik batuan yang berasal dari magma dan mencapai permukaan bumi untuk kemudian mengalami pembekuan. Pembekuan batu basa ekstruktif umumnya relatif singkat sehingga tidak memiliki cukup waktu untuk membentuk kristal-kristal mineral.

Dengan demikian, sedimen Sungai Jeneberang sepanjang daerah aliran sungai banyak mengandung sedimen klastika jenis endapan alluvial dan juga batuan ekstruksi basa polimik yang bersumber dari longsor Gunung Bawakaraeng. Sesuai dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh [20] penyebaran batuan sedimen yang berada di atas

permukaan yang merupakan longsor dari Gunung Bawakaraeng, kemudian didominasi endapan alluvium yang tersebar di setiap lintasan pengukuran dengan menggunakan geolistrik. Pada kedalaman di bawah 15 m terdapat batuan andesit dan batu gabro.

KESIMPULAN

Nilai susceptibilitas magnetik sedimen sungai Jeneberang bervariasi dengan kisaran $250,0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ sampai dengan $4507,8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Tinggi rendahnya nilai susceptibilitas magnetik dipengaruhi oleh kadar Fe (besi) pada sampel sedimen sungai Jeneberang. Jenis mineral magnetik yang terkandung pada sampel Sungai Jeneberang diduga adalah mineral magnetit (Fe_3O_4) yang bersifat ferimagnetik. Mineral ferimagnetik diduga bersumber dari litogenik (aktivitas alami) seperti pelapukan batuan beku dan proses pedogenik, serta antropogenik (aktivitas manusia) seperti hasil pembakaran.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Kepala Balai Besar Wilayah Sungai Jeneberang yang telah memberikan izin kepada kami untuk melakukan penelitian. Ucapan terima kasih juga kepada Sitti Hasaniyah dan Rindah Putri Aslami yang telah membantu dalam pengambilan sampel.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. A. Cenne, "Studi Karakteristik Sedimen dan Morfologi Dasar di Muara Sungai Jeneberang," Skripsi, Universitas Hasanuddin, 2016.
- [2] C. Perry dan K. Taylor, "Environmental sedimentology," *Geogr. J.*, vol. 174, no. 2, p. 190, 2008, doi: 10.1111/j.1475-4959.2008.283_10.x.
- [3] R. Yunginger, I. Supu, S. Zulaikah, A. Wijaya, A. I. W. S. Ramadani, dan M. Mariyanto, "Investigasi sumber mineral magnetik pada sedimen Sungai Biyonga sebagai inlet Danau Limboto menggunakan parameter susceptibilitas magnetik," *Positron*, vol. 12, no. 1, p. 18, 2022, doi: 10.26418/positron.v12i1.50470.
- [4] F. Brempong, Q. Mariam, dan K. Preko, "The use of magnetic susceptibility measurements to determine pollution of agricultural soils in road proximity," *African J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 9, pp. 263–271, 2016, doi: 10.5897/ajest2015.2058.
- [5] M. Mariyanto et al., "Heavy metal contents and magnetic properties of surface sediments in volcanic and tropical environment from Brantas river, Jawa Timur province, Indonesia," *Sci. Total Environ.*, vol. 675, pp. 632–641, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.244.
- [6] I. Szczepaniak-Wnuk, B. Górka-Kostrubiec, S. Dytłow, P. Szwarczewski, P. Kwapuliński, dan J. Karasiński, "Assessment of heavy metal pollution in Vistula River (Poland) sediments by using magnetic methods," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 27, pp. 24129–24144, 2020, doi: 10.1007/s11356-020-08608-4.
- [7] S. Sudarningsih et al., "Magnetic susceptibility and heavy metal contents in sediments of Riam Kiwa, Riam Kanan and Martapura rivers, Kalimantan Selatan province, Indonesia," *Heliyon*, vol. 9, no. 6, p. e16425, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16425.
- [8] B. H. Iswanto dan S. Zulaikah, "Selection Method to Identify the Dominant Elements that Contribute to Magnetic Susceptibility in Sediment," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1402, no. 1, p. 044087, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1402/4/044087.
- [9] Sudarningsih et al., "Magnetic characterization of sand and boulder samples from Citarum river and their origin," *J. Math. Fundam. Sci.*, vol. 49, no. 2, pp. 116–126, 2017, doi: 10.5614/j.math.fund.sci.2017.49.2.2.
- [10] V. A. Tiwow dan M. J. Rampe, "Studi susceptibilitas magnetik bergantung frekuensi pada sedimen sungai Kota Makassar," *J. Fis. Unand*, vol. 11, no. 4, pp. 474–481, 2022, doi: 10.25077/jfu.11.4.474-481.2022.
- [11] A. Boroallo, V. A. Tiwow, dan S. Sulistiawaty, "Studi mineral magnetik tanah TPA Antang Makassar berdasarkan data susceptibilitas magnetik," *ORBITA J. Kajian, Inov. dan Apl. Pendidik. Fis.*, vol. 9, no 1, pp. 16–22, 2023, doi: 10.31764/orbita.v9i1.11663.

- [12] M. Mulyana, V. A. Tiwow, dan S. Sulistiawaty, "Analisis suseptibilitas magnetik tanah TPA Antang Makassar berdasarkan kedalaman," *ORBITA J. Kajian, Inov. dan Apl. Pendidik. Fis.*, vol. 8, no 2 pp 234–240, 2022, doi: 10.31764/orbita.v8i2.11252.
- [13] J. A. Dearing, *Environmental Magnetic Susceptibility: Using the Bartington MS2 System*. British Library Cataloguing in Publication Data, 1999.
- [14] V. A. Tiwow, M. J. Rampe, dan M. Arsyad, "Kajian suseptibilitas magnetik bergantung frekuensi terhadap pasir besi Kabupaten Takalar," *Sainsmat*, vol. 7, no. 2, pp. 136–146, 2018, doi: 10.35580/sainsmat7273662018.
- [15] V. A. Tiwow, M. J. Rampe, dan S. Sulistiawaty, "Suseptibilitas magnetik dan konsentrasi logam berat sedimen Sungai Tallo di Makassar," *J. Ilm. Sains*, vol. 22, no. 1, pp. 60–66, 2022, doi: 10.35799/jis.v22i1.38681.
- [16] M. Arsyad, V. A. Tiwow, M. J. Rampe, dan H. L. Rampe, "Relationships of magnetic properties and heavy metals content of guano in Bat cave, South Sulawesi, Indonesia," *Karbala Int. J. Mod. Sci.*, vol. 8, no. 3, pp. 406–414, 2022, doi: 10.33640/2405-609X.3254.
- [17] I. A. Sandi, M. F. A. Fauzan, Fitriani, M. J. Rampe, dan V. A. Tiwow, "A review of the magnetic susceptibility of guano deposits in caves," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1899, no. 1, p. 012125, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1899/1/012125.
- [18] J. S. Solomon, A. L. Ahmed, I. H. Adamu, dan O. O. Dimu, "Identifying anthropogenic metallic pollutants using frequency dependent magnetic susceptibility," *Curr. Trends Nat. Sci.*, vol. 6, no. 11, pp. 13–22, 2017.
- [19] S. Bijaksana dan E. K. Huliselan, "Magnetic properties and heavy metal content of sanitary leachate sludge in two landfill sites near Bandung, Indonesia," *Environ. Earth Sci.*, vol. 60, no. 2, pp. 409–419, 2010, doi: 10.1007/s12665-009-0184-4.
- [20] A. M. Massinai, Lantu, Virman, dan S. Akbar, "Aplikasi metoda geolistrik untuk identifikasi sesar bawah permukaan di wilayah DAS Jeneberang Sulawesi Selatan," in *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Pendidikan Sains VIII*, 2013, vol. 4, no. 1, pp. 305–310.

Rancang bangun *spin coater* sederhana untuk deposisi lapisan tipis polimer

Amalia C Nur'aidha*¹, Mira Setiana¹, Dena Anugrah²

¹Program Studi Teknik Biomedis, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas PGRI Yogyakarta

²Program Studi Teknologi Rekayasa Elektro-Medis, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas PGRI Yogyakarta

Jl. PGRI I No.117, Sonosewu, Kab. Bantul, D.I Yogyakarta

*email: amalia@upy.ac.id

Abstrak – Pelapisan tipis polimer memiliki peranan penting dalam bidang medis, salah satunya meningkatkan fungsionalitas perangkat medis. Selain itu pelapisan tipis polimer dapat memperbaiki biokompatibilitas perangkat medis untuk mencegah reaksi negatif tubuh manusia. Untuk menghasilkan lapisan tipis dapat digunakan beberapa metode, salah satunya adalah metode spin coating yang sering digunakan. Metode tersebut sangat fleksibel serta dapat digunakan oleh berbagai macam material. Selain itu dibutuhkan kontrol kecepatan rotasi dan waktu yang presisi. Berdasarkan hal tersebut dirancanglah *Spin Coater* menggunakan motor DC Brushless serta arduino nano sebagai pengontrol serta dilengkapi dengan push button sebagai pemilihan nilai kecepatan yang diperlukan, dengan rentang kecepatan 1000-8000RPM. Pengujian hasil perancangan, dilakukan dengan meneteskan tinta warna merah di atas substrat. Hasil spin coating menunjukkan pada 1000RPM pelapisan belum sempurna, sedangkan pada 5000RPM hasil pelapisan mencapai 90%. Untuk 6000-8000RPM motor DC brushless mengalami error lingkungan, dimana chamber PLA tidak mampu menahan getaran yang dihasilkan oleh motor DC.

Kata kunci: Motor DC, Lapisan Tipis, Polimer, *Spin Coater*

Abstract – Polymer thin coatings have an important role in the medical field, one of which is to improve the functionality of medical devices. In addition, polymer thin coatings can improve the biocompatibility of medical devices to prevent negative reactions of the human body. Several methods can be used to produce thin films, one of which is the spin coating method which is often used. The method is very flexible and can be used by a variety of materials. In addition, it requires precise control of rotational speed and time. Based on this, a *Spin Coater* was designed using a Brushless DC motor and arduino nano as a controller and equipped with a push button to select the required speed value, with a speed range of 1000-8000RPM. Testing of the design results was carried out by dripping red ink on the substrate. The spin coating results show that at 1000RPM the coating is not perfect, while at 5000RPM the coating results reach 90%. For 6000-8000RPM the brushless DC motor experiences environmental errors, where the PLA chamber is unable to withstand the vibrations generated by the DC motor.

Key words: DC Motor, Thin Coating, Polymer, Spin Coating

PENDAHULUAN

Pelapisan tipis polimer memiliki peran penting dalam aplikasi bidang medis karena memberikan manfaat bagi perangkat dan sistem medis [1][2], salah satu manfaat pelapisan tipis polimer yaitu, meningkatkan fungsionalitas perangkat medis[3][4]. Pelapisan polimer dapat memperbaiki biokompatibilitas[5] perangkat medis[6] yang sangat penting untuk mencegah reaksi negatif tubuh terhadap perangkat tersebut, hal ini dapat mengurangi resiko peradangan dalam tubuh manusia. Selain itu, pelapisan polimer dapat meningkatkan interaksi antara perangkat medis dan jaringan tubuh manusia untuk memfasilitasi penyembuhan, serta sebagai sistem penghantar obat yang terkontrol

dalam pengiriman obat[7]. Pelapisan polimer juga dapat melindungi perangkat medis dari faktor-faktor eksternal seperti korosi, abrasi ataupun reaksi kimia yang dapat merusak perangkat tersebut. Berdasarkan hal tersebut, pelapisan tipis sangat dibutuhkan dalam bidang medis[4].

Metode pelapisan tipis antara lain, pelapisan celup, *spin coating*, *spray coating*, *blade coating*, dan *roll coating*[8]. Metode *spin coating* merupakan salah satu metode yang mudah dari beberapa metode tersebut [9][10]. Metode tersebut sangat fleksibel, dapat digunakan pada beberapa jenis material. Untuk menghasilkan pelapisan tipis yang optimal dibutuhkan kontrol kecepatan rotasi dan waktu yang presisi [11][12]. Meskipun *Spin Coater*

memiliki kelebihan yang signifikan dalam pelapisan tipis [13], penggunaannya seringkali terbatas oleh harganya yang relatif mahal. Untuk mengatasi keterbatasan ini dan membuat teknologi pelapisan tipis lebih terjangkau, perlu dilakukan langkah desain *Spin Coater* digital berbasis Arduino Nano. Desain ini memanfaatkan platform open-source yang ekonomis dan tersedia secara luas, seperti Arduino Nano, untuk mengendalikan *Spin Coater* dengan presisi yang tinggi [14].

Beberapa penelitian telah dilakukan dengan membuat desain *Spin Coater* menggunakan motor DC dengan kecepatan 1000-1500RPM[9]. Selain itu telah dirancang dan diuji oleh Mohua *Spin Coater* sederhana berbiaya rendah menggunakan motor DC dengan kecepatan putar 350-3800RPM [15][16][13]. Ali juga mendesain *Spin Coater* dengan kecepatan 1000-2000RPM menggunakan arduino Uno dan untuk pengontrol dilakukan secara manual menggunakan resistor variabel [17][18].

Penelitian ini difokuskan pada perancangan *Spin Coater* yang diintegrasikan dengan Arduino Nano sebagai pengontrol terhadap kecepatan rotasi (1000-8000RPM) dan waktu pemrosesan (60 detik), serta mengoptimalkan efisiensi penggunaan material. Selain itu, pada penelitian ini menekankan aspek fleksibilitas dalam penggunaan *Spin Coater* ini, sehingga dapat digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk dalam bidang biomedis dan teknik medis. Dengan demikian, penelitian ini menghadirkan kontribusi berharga dalam menghadirkan solusi yang lebih terjangkau dan efisien dalam teknologi pelapisan tipis menggunakan Arduino Nano sebagai kontroler utama.

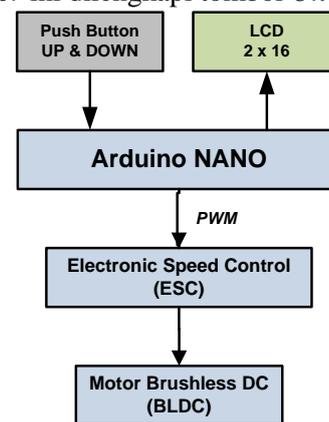
METODE PENELITIAN

Spin Coating salah satu metode yang digunakan untuk proses pelapisan yang seragam pada penampang sensor (substrat). Metode tersebut paling mudah digunakan. Prinsip kerja spin coater menggunakan konsep gerak melingkar, pada saat benda berputar makan akan terjadi

gaya sentripetal dan sentrifugal, serta akan terjadi gaya berat yang menghasilkan gaya gesek antara substrat dan larutan. Tahapan saat proses spin coater bekerja adalah deposisi, *spin up*, dan *spin off* sekaligus evaporasi. Berdasarkan prinsip kerja *Spin Coater* tersebut maka pada penelitian ini akan dirancang *Spin Coater* menggunakan motor dan arduino nano sebagai pengontrol.

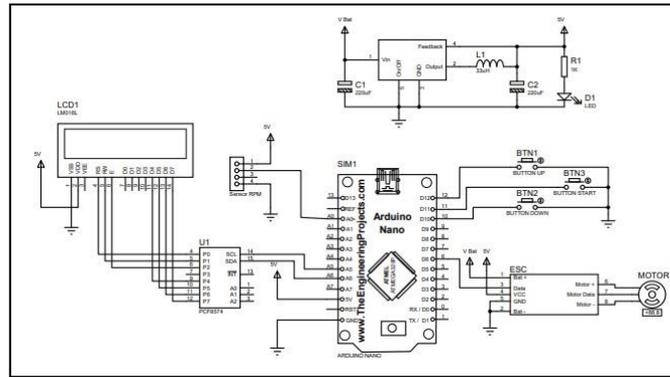
A. Rangkaian Skematik

Spin coater dirancang menggunakan Arduino Nano sebagai pengontrol (gambar 1). Berdasarkan diagram blok gambar 1 perancangan spin coater menggunakan motor Brushless DC (BLDC) sebagai rotor dilengkapi dengan ESC (*Electronic Speed Control*), push button *up* dan *down* untuk menentukan RPM yang diinginkan, LCD ukuran 2 x 16 untuk menampilkan informasi (RPM, Start, Stop) serta *spin coater* ini dilengkapi tombol *On / Off*.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem *Spin Coater*

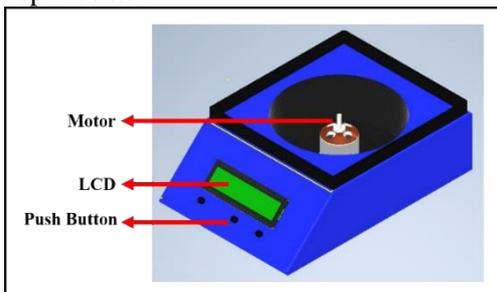
Gambar 2 merupakan rangkaian skematik sistem spin coater yang akan dirancang. Nilai masukan RPM menggunakan push button UP & DOWN kelipatan 1000RPM, dengan nilai maksimum mencapai 15.000 RPM. Push button sebagai masukan dihubungkan dengan port D. Nilai tersebut akan muncul pada LCD 2 x 16 yang dihubungkan dengan port A mikrokontroler. Putaran motor Brushless DC diatur oleh ESC yang telah diprogram melalui Arduino Nano.



Gambar 2. Rangkaian Skematik Sistem Spin Coater

B. Desain Chamber Spin Coater

Sistem spin coater yang pada gambar 2 akan diletakkan ke dalam sebuah chamber untuk menggerakkan piringan yang difungsikan untuk meletakkan object (substrat) pelapisan. Desain chamber dibuat menggunakan software Inventor. Gambar 3 merupakan desain chamber dari spin coater.

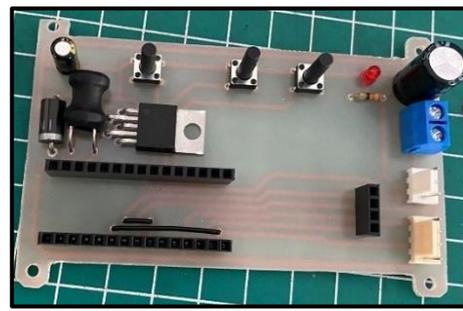


Gambar 3. Desain Chamber Spin Coater

Berdasarkan hasil desain (gambar 3) chamber memiliki dimensi luar 13x13 cm dengan



(a)



(b)

Gambar 4. (a) PCB Board LCD dan push button dan (b) PCB Board Pengontrol berbasis Arduino Nano

kedalaman 5 cm. Motor Brushless DC ditempatkan pada bagian dalam chamber, dibagian atas motor akan diletakkan piringan dengan diameter 10cm sebagai tatakan object (substrat). Bagian depan chamber diletakkan LCD 2x16 serta push button sebagai masukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil fabrikasi pada gambar 2 disajikan pada gambar 4. Hasil fabrikasi (gambar 4.a) merupakan implementasi LCD sebagai penampil nilai RPM serta "START & STOP" dan push button "UP & DOWN" sebagai masukan nilai RPM untuk motor brushless DC. Gambar 4b merupakan fabrikasi Arduino NANO sebagai pengontrol kecepatan berbasis PWM. Hasil dari implementasi motor brushless DC dapat berputar dengan kecepatan 8000RPM selama 60 detik. Nilai RPM akan terlihat pada LCD yang sudah tertanam pada chamber.

A. Implementasi Desain Chamber

Desain rangkaian *Spin Coater* telah dibuat, disusun dan dilengkapi komponen-komponen, kemudian dilakukan proses desain chamber menggunakan software inventor. Konsep desain chamber ini terdiri dari bagian bawah sebagai tempat motor serta pengontrol dan bagian atas chamber berupa piringan sebagai peletakan object (substrat) pelapisan.

Berdasarkan desain chamber gambar 3 dicetak menggunakan 3D print menggunakan bahan PLA untuk luar chamber, bahan akrilik untuk penempatan substrat dan penutup luar. Hasil dari chamber disajikan pada gambar 5.



Gambar 5. Hasil Chamber *Spin Coater*

B. Pengujian Spin Coater

Pengujian *Spin Coater* dilakukan dengan cara meneteskan sampel tinta merah menggunakan mikro pipet pada kaca preparat yang ditempelkan di bagian dalam chamber ketika motor sedang berputar. Pengujian dilakukan sebanyak lima kali dengan nilai 1000rpm, 2000rpm, 3000rpm, 4000rpm, dan 5000rpm. Hasil pengujian terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian *Spin Coater*

No	Kecepatan Motor	Hasil Pengujian
1	1000rpm	
2	2000rpm	

No	Kecepatan Motor	Hasil Pengujian
3	3000rpm	
4	4000rpm	
5	5000rpm	

KESIMPULAN

Penelitian ini telah merancang *Spin Coater* digital yang mampu digunakan di laboratorium untuk melakukan pelapisan. *Spin Coater* ini dapat bekerja pada rentang 1000 RPM hingga 8000RPM dengan waktu 60 detik. Pengujian *Spin Coater* dilakukan dengan meletakkan preparat ke substrat holder, kemudian di teteskan air mineral berwarna untuk melihat penyebaran dalam proses *Spin Coater*. Berdasarkan pengujian tersebut masih belum sempurna melakukan pelapisan, jika dilihat pada mikroskop pelapisan hanya mampu hingga 90%, sehingga desain *Spin Coater* ini perlu adanya pengembangan kembali.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada tim penelitian dan penelitian ini dapat terlaksana atas hibah DRTPM-PDP dengan nomor SK: 181/E5/PG.02.00.PL/2023.

DAFTAR PUSTAKA

[1] V. Van Tran, S. Lee, D. Lee, and T. H. Le, "Recent Developments and Implementations of Conductive Polymer-Based Flexible Devices in Sensing Applications," *Polymers (Basel)*, vol. 14,

- no. 18, pp. 1–29, 2022,
doi: 10.3390/polym14183730.
- [2] P. Z. Hanakata, J. F. Douglas, and F. W. Starr, “Interfacial mobility scale determines the scale of collective motion and relaxation rate in polymer films,” *Nat. Commun.*, vol. 5, no. May, 2014, doi: 10.1038/ncomms5163.
- [3] M. S. Thanigaivel, A. K. Priya, D. Balakrishnan, K. Dutta, S. Rajendran, “Insight on recent development in metallic biomaterials: Strategies involving synthesis, types and surface modification for advanced therapeutic and biomedical applications,” *Biochem Eng J*, vol. 187, 2022, doi: 10.1016/j.bej.2022.108522.
- [4] X. H. A. Ekinici, A. Gleadall, A. A. Johnson, L. Li, “Mechanical and hydrolytic properties of thin polylactic acid films by fused filament fabrication,” *J Mech Behav Biomed Mater*, vol. 114, 2021, doi: 10.1016/j.jmbbm.2020.104217.
- [5] M. Chelu and A. M. Musuc, “Advanced Biomedical Applications of Multifunctional Natural and Synthetic Biomaterials,” *Processes*, vol. 11, no. 9, p. 2696, 2023, doi: 10.3390/pr11092696.
- [6] M. Z. and S. G. Mayr, “Ferromagnetic shape memory alloys: Synthesis, characterisation and biocompatibility of Fe-Pd for mechanical coupling to cells,” *Mater. Sci. Technol. (United Kingdom)*, vol. 30, 2014, doi: 10.1179/1743284714Y.0000000592.
- [7] F. V. et Al, “Biomimetic extracellular matrix coatings improve the chronic biocompatibility of microfabricated subdural microelectrode arrays,” *PLoS One*, vol. 13, 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0206137.
- [8] M. A. Butt, “Thin-Film Coating Methods: A Successful Marriage of High-Quality and Cost-Effectiveness—A Brief Exploration,” *Coatings*, vol. 12, no. 8, 2022, doi: 10.3390/coatings12081115.
- [9] C. Thirunavukkarasu, K. K. Saranya, B. Janarthanan, and J. Chandrasekaran, “Design , Fabrication and Working of In-House Spin Coating Unit for Thin Film Deposition,” *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 6, pp. 10017–10023, 2016, doi: 10.15680/IJIRSET.2015.0506068.
- [10] M. Rashid, M. M. Ferdaus, M. M. Rashid, and M. A. Rahman, “Advances in Environmental Biology Corresponding Author: M Design and Fabrication of a Simple Cost Effective Spin Coater for Deposition of Thin Film,” *Adv. Environ. Biol.*, vol. 8, no. 3, pp. 729–733, 2014.
- [11] I. Pratama, J. Y. Mindara, D. W. Maulana, C. Panatarani, and I. M. Joni, “Development of Spin Coater with close loop control system using ATmega8535 microcontroller,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1712, no. February, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1063/1.4941870.
- [12] A. A. Atule, A. N. Amah, I. Ahemen, and F. N. Gesa, “Design and Implementation of a Three-operational Mode Programmable Spin Coater for Deposition of Thin Films on Flat Substrates,” vol. 11, no. May, pp. 536–547, 2020.
- [13] G. Zafer, A. Mürsel, A. Cengiz, and H. M Cüneyt, “Design and Construction of Home-Made Spin Coater for OLED Production,” *Int. J. Electron. Device Phys.*, vol. 5, no. 1, 2021, doi: 10.35840/2631-5041/1711.
- [14] M. B. K. and R. G. Z. Kaddachi, M. Belhi, “Design and development of spin coating system,” *2016 17th Int. Conf. Sci. Tech. Autom. Control Comput. Eng.*, pp. 558–562, 2016, doi: 10.1109/STA.2016.7952005.
- [15] M. Fardousi and S. Rahat, “Cost-Effective Home-Made Spin Coater for Depositing Thin Films,” *J. Mod. Sci. Technol.*, vol. 1, pp. 126–134, 2013.
- [16] Irzaman, H. Syafutra, R. Siskandar, Aminullah, and H. Alatas, “Modified Spin Coating Method for Coating and Fabricating Ferroelectric Thin Films as Sensors and Solar Cells,” *Thin Film Process. - Artifacts Surf. Phenom. Technol. Facet.*, 2017, doi: 10.5772/66815.
- [17] F. H. Ali, “Building a Spin Coater device for thin-film preparation,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 757, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/757/1/012050.
- [18] R. G. Aguilar and J. O. López, “Low cost instrumentation for spin-coating deposition

- of thin films in an undergraduate laboratory.” *Latin-American J. Phys. Educ.*, vol. 5, no. 2, pp. 368–373, 2011, doi: 10.1016/j.aca.2007.12.028.
- [19] A. Haleem, M. Javaid, R. P. Singh, R. Suman, and S. Rab, “Biosensors applications in medical field: A brief review,” *Sensors Int.*, vol. 2, no. April, p. 100100, 2021, doi: 10.1016/j.sintl.2021.100100.
- [20] K. Theyagarajan and Y. J. Kim, “Recent Developments in the Design and Fabrication of Electrochemical Biosensors Using Functional Materials and Molecules,” *Biosensors*, vol. 13, no. 4, 2023, doi: 10.3390/bios13040424.
- [21] B. Miranda, I. Rea, P. Dardano, L. De Stefano, and C. Forestiere, “Recent advances in the fabrication and functionalization of flexible optical biosensors: Toward smart life-sciences applications,” *Biosensors*, vol. 11, no. 4, 2021, doi: 10.3390/bios11040107.
- [22] A. S. Hidayat, M. Rokhmat, M. Si, and A. Qurthobi, “Pengaruh Suhu dan Kecepatan Putar Spin Coating Terhadap Kinerja Sel Surya Organik Berbahan Dasar TiO₂,” vol. 1 no. 1, pp 1–14, 2010.

Analisis petrofisika dan *shale gouge ratio* pada formasi Ngrayong untuk menentukan potensi CCS lapangan Gundih, Jawa Tengah

Muhammad Hilmy Shubhi*, Ginanda Salfira, M. Aditya Makki,
Rahmat C. Wibowo, Karyanto, dan Ilham Dani

Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung
Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145
*email: hilmy.hilmy50@gmail.com

Abstrak - CCS merupakan upaya yang dilakukan industri migas untuk mengurangi emisi karbon atau rumah kaca. Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis perhitungan petrofisika serta perhitungan Shale Gouge Ratio (SGR). Metode Shale Gouge Ratio (SGR) merupakan salah satu metode dalam menentukan Fault Seal Analysis (FSA) untuk menganalisis patahan yang bersifat sealing (tersekat) atau leaking (bocor), sehingga didapatkan potensi Carbon Capture Storage (CCS) daerah tersebut. Dari nilai yang didapatkan dapat dilihat analisis FSA yang bernilai <20% menunjukkan daerah dapat mengalirkan fluida (leaking) sedangkan nilai FSA >20% menunjukkan daerah yang menyekat aliran fluida (sealing). Hasil dari beberapa metode yang dilakukan tersebut kemudian diintegrasikan dan diperoleh hasil perhitungan petrofisika serta nilai dari SGR pada Formasi Ngrayong menunjukkan bahwa terdapat reservoir yang memiliki litologi batupasir dan karbonat serta formasi tersebut memiliki SGR sebesar 24.09% bersifat sealing.

Kata Kunci: carbon capture storage, Formasi Ngrayong, shale gouge ratio

Abstract – CCS is an effort made by the oil and gas industry to reduce carbon or greenhouse emissions. This research was carried out by calculating petrophysical calculations and calculating the Shale Gouge Ratio (SGR). The Shale Gouge Ratio (SGR) method is one method for determining Fault Seal Analysis (FSA) to analyze faults that are sealing or leaking, so as to obtain the potential for Carbon Capture Storage (CCS) in the area. From the values obtained, it can be seen from the FSA analysis that a value of <20% indicates an area that can flow fluid (leaking) while an FSA value >20% indicates an area that blocks fluid flow (sealing). The results of several methods carried out were then integrated and obtained the results of petrophysical calculations as well as the SGR value in the Ngrayong Formation showing that there is a reservoir that has sandstone and carbonate lithology and the formation has an SGR of 24.09% which is sealing.

Key words: carbon capture storage, Ngrayong Formation, shale gouge ratio

PENDAHULUAN

Salah satu negara yang menghasilkan emisi karbon terbesar keempat di dunia adalah Indonesia setelah China, Amerika Serikat, dan Uni Eropa [1]. Saat ini Pemerintah Indonesia sedang berkomitmen untuk mengatasi peningkatan gas karbon dioksida (CO₂) dari penggunaan bahan bakar fosil yang mempengaruhi iklim [2]. Peningkatan tinggi muka laut dan perubahan kenaikan suhu merupakan salah satu dampak perubahan iklim yang terjadi di Indonesia akibat peningkatan emisi karbon [3]. Dibandingkan dengan situasi saat ini, kesepakatan Indonesia mengarah pada Perjanjian Paris tahun 2016, yang akan mengurangi emisi karbon hingga 26% dengan meningkatkan bauran energi, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar batu bara, dan memperkenalkan sumber energi terbarukan pada

tahun 2020 hingga 2050 [4]. Langkah-langkah pemerintah saat ini seperti perbaikan bauran energi, peralihan ke bahan bakar rendah karbon, dan penggunaan sumber daya alam terbarukan masih dipandang perlu. Oleh karena itu, sejalan dengan tujuan pemerintah, penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS) menawarkan peluang besar untuk mengurangi emisi karbon dioksida dari sumber emisi utama seperti pembangkit listrik tenaga batu bara dan pabrik pengolahan minyak dan gas. di Indonesia. [5].

Menurut Syahrial, Pasarai, & Iskandar [5] sumber CO₂ banyak berasal dari industri di Indonesia, seperti pembangkit listrik, pabrik pengolahan minyak dan gas, pabrik baja dan amoniak, serta pabrik semen. Survei menemukan bahwa sebagian besar sumber daya penelitian industri ini berlokasi di Jawa dan Sumatra, dan pada tingkat lebih rendah di

Kalimantan dan Sulawesi. Oleh karena itu, Jawa dan Sumatera kemungkinan besar akan memperkenalkan CCS di Indonesia. Salah satu wilayah potensial penyebaran CCS di Indonesia adalah ladang minyak Gundih di Jawa Tengah, bagian dari Cekungan Jawa Timur. Cekungan Jawa Timur merupakan salah satu cekungan penghasil minyak bumi yang kaya di Indonesia terletak di tepi tenggara Paparan Sunda, dengan koordinat antara 110° dan 118° BT dan antara 4° dan 8° LS. [6]. Terdapat dua formasi yang berada di Lapangan Gundih, yaitu Formasi Kujung (reservoir dalam) yang memiliki litologi klastik dan karbonat serta Formasi Ngrayong (reservoir dangkal) yang memiliki litologi batupasir dan karbonat. Formasi Ngrayong sendiri memiliki struktur geologi yang stabil dan sesuai untuk studi percobaan CCS (Carbon Capture Storage) [7].

Secara umum CCS (Carbon Capture Storage) memiliki urutan aktivitas yang dimulai dari penangkapan CO_2 dari sumber, pengangkutan karbon ke lokasi penyimpanan, dan penyuntikan karbon ke dalam formasi geologi [5]. Aspek terpenting dalam memilih lokasi penyimpanan CCS adalah stabilitas kondisi formasi geologi (reservoir) dalam jangka panjang. Oleh karena itu, analisis geologi dan geofisika secara detail dengan menggunakan analisis petrofisika dan analisis sekat sesar dengan metode Shale Gouge Ratio (SGR) merupakan salah satu metode yang memungkinkan untuk mengetahui potensi CCS.

LANDASAN TEORI

A. Analisis Petrofisika

a. Saturation Water (S_w)

Saturation water merupakan banyaknya fluida air yang memenuhi volume batuan. Analisis saturasi air diterapkan untuk menganalisis fluida pada batuan karena fluida pengisi batuan tidak hanya berisi hidrokarbon [8]. Klasifikasi jenis fluida pengisi pori dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Tabel klasifikasi jenis fluida pengisi pori berdasarkan nilai saturasi air [9].

So Rata-rata	Sw Rata-rata	Perkiraan Jenis Reservoir
> 3 %	< 50 %	Gas
2 - 5 %	< 60 %	Minyak dan Gas
> 5 %	50 - 70 %	Minyak
< 1 %	70 - > 75 %	Air

b. Volume Shale

Volume shale terdapat banyak kandungan shale dari batuan pada sebuah formasi. Banyaknya kandungan shale pada batuan mempengaruhi aliran fluida, karena semakin banyak kandungan shale maka kurang cocok sebagai zona reservoir [10]. Rumus perhitungan volume shale dapat dilihat pada persamaan 1 [11].

$$V_{sh} = \frac{GR_{log} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (1)$$

Dimana,

GR log: GR log pada lapisan zona reservoir

GR max: GR log maksimal pada lapisan log

GR min: GR log minimal pada lapisan log

c. Porositas

Porositas merupakan kemampuan batuan untuk menyimpan fluida. Semakin tinggi porositas maka akan semakin baik untuk menyimpan fluida. Sebaliknya jika porositas pada batuan semakin kecil maka semakin buruk batuan untuk menyimpan fluida.

Tabel 2. Parameter Porositas Batuan Pada Reservoir [12].

Porositas	Kualitas
0-5	Diabaikan
5-10	Buruk
10-15	Cukup
15-20	Baik
20-25	Sangat Baik
>25	Istimewa

B. Shale Gouge Ratio

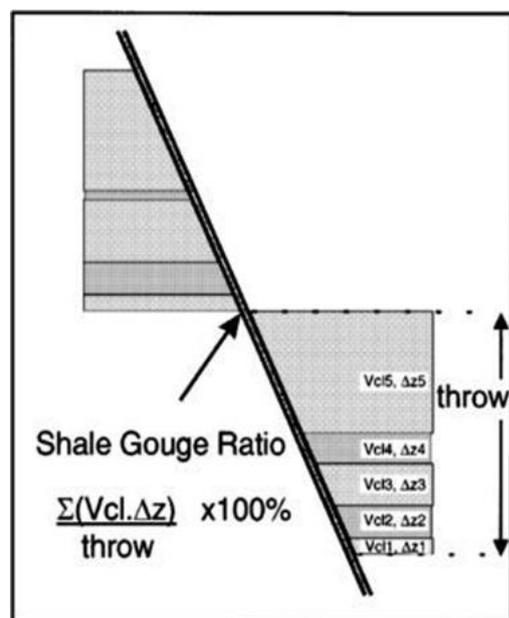
Fault Seal Analysis (FSA) merupakan analisis yang digunakan untuk melihat adanya sekat sesar yang dapat bersifat leaking (mengalirkan) atau sealing (menyekat). Salah satu metode pada penentuan sekat sesar adalah dengan menggunakan metode Shale Gouge Ratio (SGR) yaitu penentuan sekat sesar menggunakan parameter volume shale pada lapisan patahan. Untuk menentukan sealing dan leaking pada Batupasir-Serpilh dan Batugamping-Serpilh dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 3. Penentuan *Sealing* dan *Leaking* pada Batupasir-Serpil dan Batugamping-Serpil pada nilai SGR [13].

Perbandingan	Batupasir - serpil	Batugamping (terumbu) - serpil
Leaking	< 20%	≤ 20%
Sealing	> 20%	≥ 20%

METODE PENELITIAN

Penelitian ini berada pada daerah Lapangan Gundih, Jawa Tengah dengan sampel sumur UNILA-1 menggunakan analisis petrofisika dan perhitungan *Shale Gouge Rasio* (SGR). Kemudian dilakukan analisis petrofisika berupa analisis secara kualitatif dan analisis secara kuantitatif. Analisis kualitatif merupakan analisis yang berguna untuk mengetahui zona reservoir, fluida pada hidrokarbon, dan litologi. Analisis secara kualitatif menggunakan parameter seperti log *gamma ray*, NPHI, RHOB, dan resistivitas. Analisis kuantitatif merupakan analisis yang berguna untuk menentukan target nilai zona reservoir menggunakan perhitungan. Analisis kuantitatif menggunakan parameter seperti saturasi air (S_w), volume *shale*, dan porositas.



Gambar 1. Analisis Sekatan Sesar dengan Metode SGR [13].

Tahap pertama penelitian ini yaitu melakukan studi literatur pada daerah penelitian mengenai literatur pendukung seperti peta geologi, data geologi regional, dan data stratigrafi daerah penelitian. Tahap kedua penelitian berupa pengolahan data sekunder menggunakan *software Interactive Petrophysics V3.5*. Tahap ketiga penelitian merupakan tahap akhir berupa interpretasi hasil pengolahan. Dari analisis petrofisika, kemudian diintegrasikan dengan perhitungan *shale gouge ratio* dimana *shale gouge ratio* dilihat dengan adanya kandungan serpil pada celah patahan sebagai penyekat patahan tersebut. Hasil dari *shale gouge ratio* dapat memberikan informasi berupa sifat dari patahan yang mengunci fluida atau mengalirkan fluida sebagai parameter dari potensi pengijeksian karbon (CCS).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dilakukan *crossplott* pada lima zona target reservoir yang diambil untuk mengetahui litologi penyusunnya. Zona target 1 diidentifikasi sebagai *sandstone* dengan rentang nilai GR 66-90. Zona target 2 diidentifikasi sebagai *sandstone* dengan rentang nilai GR 57-75. Zona target 3 diidentifikasi sebagai *sandstone* perselingan *dolomite* dengan rentang nilai GR 41-49. Zona target 4 diidentifikasi sebagai *sandstone* perselingan *limestone* dengan rentang nilai GR 45-73. Zona target 5 diidentifikasi sebagai *sandstone* perselingan *limestone* dengan rentang nilai GR 26-58.

Analisis Kualitatif

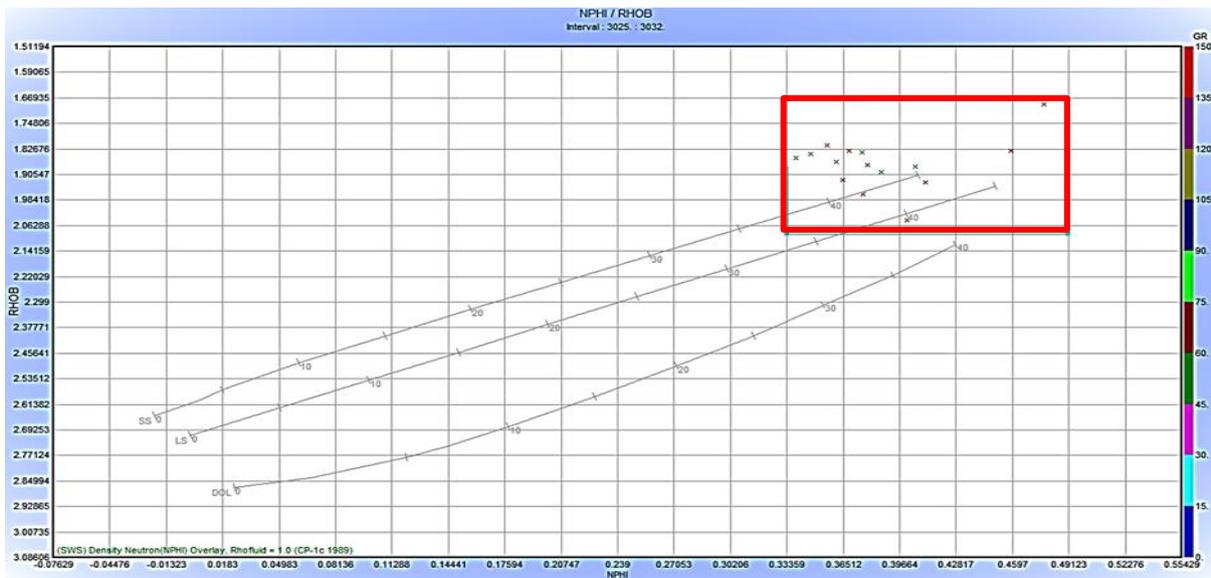
Analisis kualitatif berguna untuk menentukan fluida hidrokarbon, zona prospek reservoir, dan penentuan litologi batuan. Untuk menganalisis secara kualitatif dilakukan identifikasi dengan melihat kurva log untuk membedakan antara zona hidrokarbon yang memiliki sifat *permeable* dan *impermeable*. Identifikasi secara kualitatif dapat dilihat dengan adanya separasi antara NPHI dan RHOB. Terdapat lima zona target reservoir yang diambil ditunjukkan dengan kotak berwarna merah. Zona target 1 berada pada kedalaman 2981.5 ft – 2991 ft dan memiliki nilai resistivitas sebesar 0.995-ohm m. Zona 2 berada pada kedalaman 3025.5–3032 ft dan memiliki nilai resistivitas sebesar 0.787–1.17 ohm m. Zona target 3 berada pada kedalaman 3376 ft–3380 ft dan memiliki nilai resistivitas sebesar 2.32–3.13 ohm m. Zona target 4 berada

pada kedalaman 4898 ft – 4905 ft dan memiliki nilai resistivitas sebesar 3.51 ohm m – 7.85 ohm m. Zona target 5 berada pada kedalaman 5142 ft

– 5156 ft dan memiliki nilai resistivitas sebesar 0.73 ohm m–1.45 ohm m.



Gambar 2. Crossplot zona 1



Gambar 3. Crossplot zona 2



Gambar 4. Crossplot zona 3



Gambar 5. Crossplot zona 4



Gambar 6. Crossplot zona 5

Analisis Kuantitatif

a. Saturation Water (S_w)

Saturation water adalah parameter petrofisika yang mengacu sejauh mana pori-pori batuan dapat diisi oleh air. Semakin tinggi tingkat saturasi air maka semakin sedikit ruang untuk fluida lain. Zona 1 memiliki rata-rata saturasi air 59%. Zona 2 memiliki rata-rata saturasi air 65%. Zona 3 memiliki rata-rata saturasi air 66%. Zona 4 memiliki rata-rata saturasi air 37%. Zona 5 memiliki rata-rata saturasi air 83%.

b. Volume Shale

Perhitungan volume shale dilihat dengan parameter log GR karena dapat mendeteksi sinar radioaktif yang terdapat pada shale. Indikator yang dapat dilihat dari volume shale adalah makin rendah nilai rata-rata volume shale maka formasi dikatakan bersih. Sedangkan makin tinggi nilai rata-rata volume shale maka formasi dikatakan kotor. Zona 1 memiliki rentang nilai GR 63-73 dan rata-rata volume shale 23%. Zona 2 memiliki rentang nilai GR 55- 66 dan rata-rata volume shale 46%. Zona 3 memiliki rentang nilai GR 41-49 dan rata-rata volume shale 49%. Zona 4 memiliki rentang nilai GR 45-73 dan rata-rata volume shale 32%. Zona 5 memiliki rentang nilai GR 25-58 dan rata-rata volume shale 12%.

c. Porositas

Porositas batuan merupakan parameter yang dapat dilihat dari kemampuan batuan memiliki pori- pori yang dapat diisi dengan fluida seperti air, minyak, dan gas. Porositas yang memiliki harga yang tinggi biasanya memiliki kemampuan untuk menyimpan hidrokarbon lebih. Zona 1 memiliki rata-rata porositas 39%. Zona 2 memiliki rata- rata porositas 44%. Zona 3 memiliki rata-rata porositas 23%. Zona 4 memiliki rata-rata porositas 27%. Zona 5 memiliki rata-rata porositas 28%. Dari lima zona reservoir yang sudah dihitung porositasnya, terdapat empat zona yang memiliki kualitas istimewa dan satu zona reservoir yang memiliki kualitas sangat baik berdasarkan Tabel 2 [12].

Shale Gouge Ratio

Fault Seal Analysis (FSA) merupakan analisis sekatan sesar untuk menentukan suatu patahan

yang mempunyai sifat mengunci (*sealing*) atau mengalirkan (*leaking*). Dalam menentukan Fault Seal Analysis terdapat metode yang dapat dilakukan yaitu menggunakan metode Shale Gouge Ratio (SGR). Shale Gouge Ratio (SGR) adalah metode untuk menentukan sekatan sesar dengan parameter shale sebagai penentuan lapisan pada sesar. Pada sumur “UNILA-1” diambil lima zona target reservoir yang dilewati oleh sesar dan memiliki patahan berbentuk vertical dengan kedalaman patahan 50 ft.

Pengambilan zona reservoir memiliki kedalaman yang bervariasi pada tiap lapisan. Zona 1 pada kedalaman 2981.5 ft – 2991 ft, zona 2 pada kedalaman 3025.5 ft – 3032 ft, zona 3 pada kedalaman 3376.5 ft -3380 ft, zona 4 pada kedalaman 4898.5 ft – 4950 ft, dan zona 5 pada kedalaman 5142 ft – 5156.5 ft. Perhitungan SGR dapat dilihat pada Tabel 4. Dan rata-rata hasil perhitungan SGR pada Tabel 5.

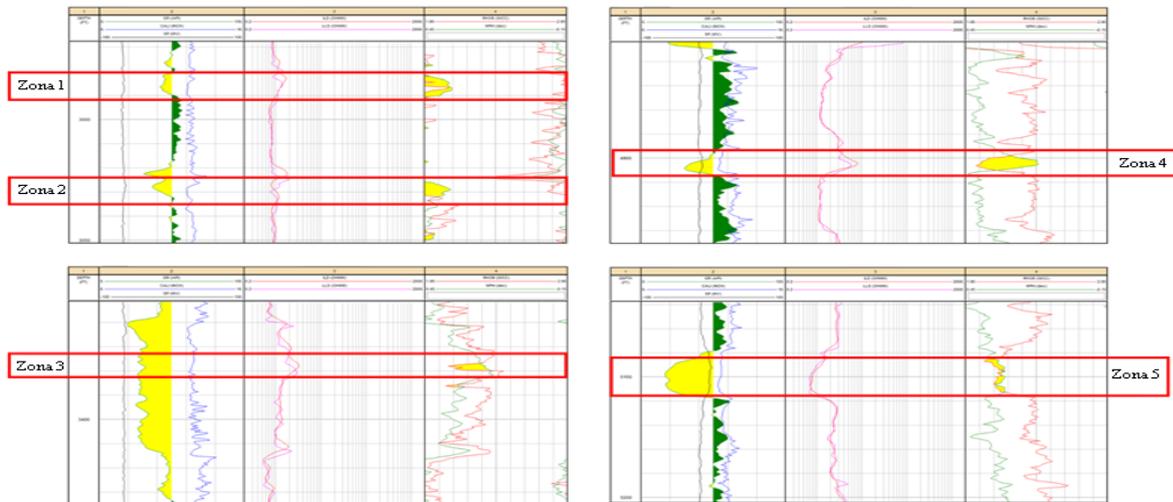
Tabel 4. Perhitungan SGR tiap zona reservoir

No.	Lapisan	Vsh (%)	z (ft)	F (ft)
1	Zona 1	26%	8	50
2	Zona 2	46%	5,5	50
3	Zona 3	49%	3	50
4	Zona 4	32%	6	50
5	Zona 5	12%	14	50

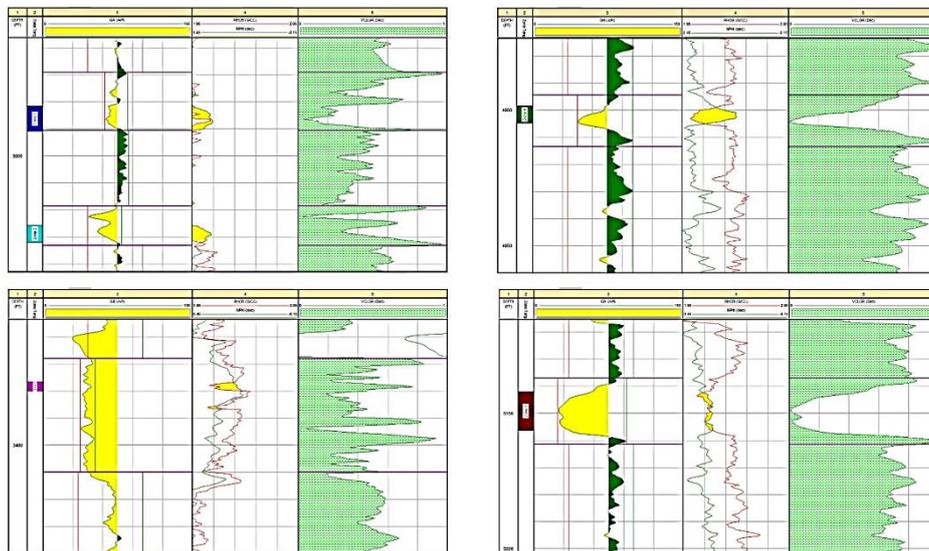
Tabel 5. Rata-rata hasil perhitungan SGR

ΔV_{sh} (%)	Δz (ft)	F (ft)	SGR (%)	Patahan
33%	36,5	50	24,09	Sealing

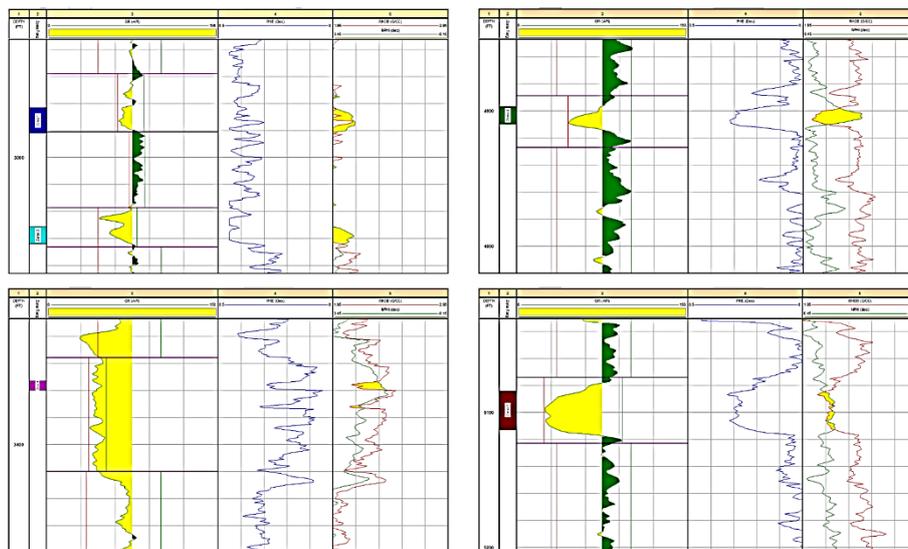
Pada Tabel 4, terdapat lima zona reservoir yang memiliki nilai volume shale yang berbeda-beda yang kemudian akan dirata-ratakan untuk penentuan sifat patahan sesar (*sealing/leaking*). Pada Tabel 5, hasil perhitungan rata-rata dari keseluruhan zona reservoir didapatkan nilai volume shale sebesar 33%. Nilai interval lapisan sebesar 36.5 ft. Nilai *throw fault* sebesar 50 ft. Dari keseluruhan data yang dirata-ratakan, kemudian didapatkan hasil SGR sebesar 24,09% dengan sifat mengunci (*sealing*).



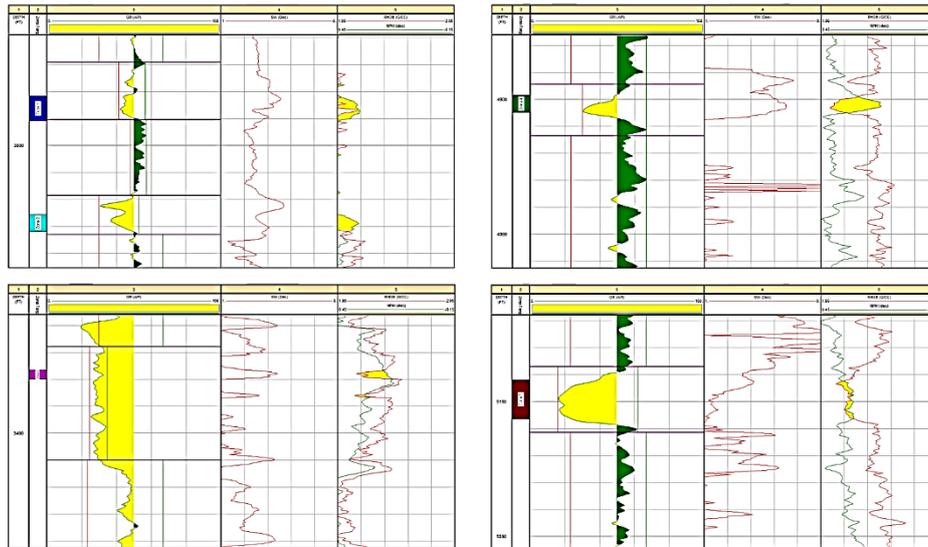
Gambar 7. Analisis kualitatif petrofisika



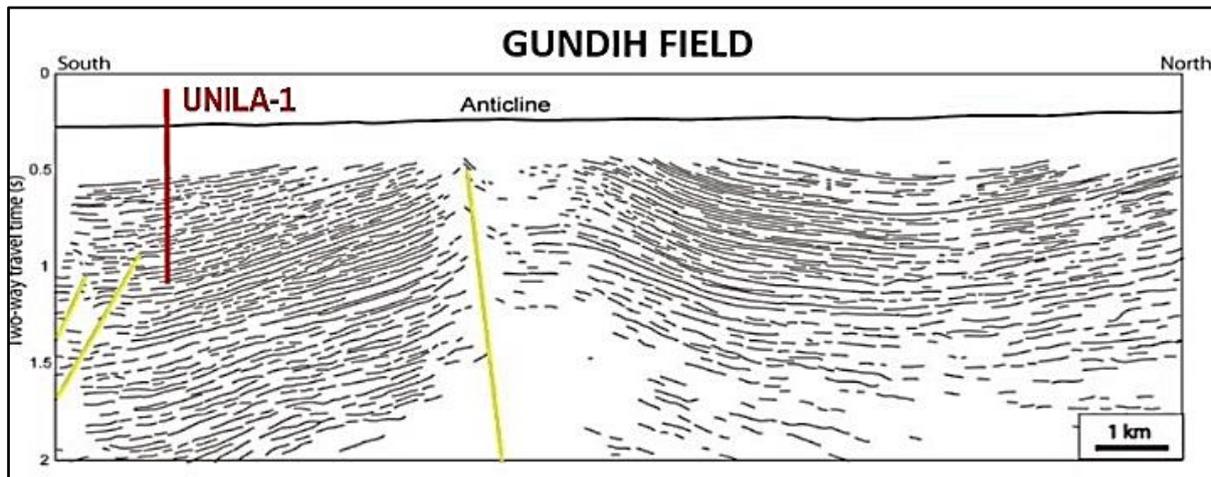
Gambar 8. (V_{sh}) pada lima zona target



Gambar 9. Porositas pada lima zona target



Gambar 10. Saturasi air pada lima zona target



Gambar 11. Penampang seismik 2d pada sumur UNILA-1 sebagai parameter penentuan shale gouge ratio

KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu:

1. Formasi Ngrayong merupakan formasi yang memiliki litologi batupasir dengan selingan batuan *limestone* dan *dolomite* berdasarkan hasil *crossplot* pada lima zona target.
2. Dalam analisis petrofisika pada daerah zona target yang meliputi parameter-parameter petrofisika yaitu, kandungan (V_{sh}), porositas efektif, dan saturasi air. Pada zona target 1 perhitungan kandungan V_{shale} didapatkan sebesar 26%, porositas efektif 39%, saturasi air 59%. Zona target 2 didapatkan kandungan V_{shale} 46%, porositas efektif 44%, saturasi air 65%. Kemudian pada zona target 3 didapatkan kandungan V_{shale} sebesar 49%, porositas efektif 23%, saturasi air 66%. Zona

- target 4 didapatkan kandungan V_{shale} 32%, porositas efektif 27%, saturasi air 37%. Terakhir pada zona target 5 didapatkan kandungan V_{shale} 12%, porositas efektif 28%, saturasi air 83%. Hasil analisis petrofisika yang didapatkan dapat diketahui bahwa zona target reservoir tersebut baik dalam menyimpan fluida.
3. Hasil perhitungan metode *Shale Gouge Ratio* didapatkan nilai sebesar 24,09% pada sekatan sesar yang bersifat mengunci (*sealing*) dan memiliki potensi untuk penginjeksian karbon untuk proyek CCS.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah membantu dalam proses penulisan paper penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Jaggi, & M. Freedman, "Global Warming, Kyoto Protocol, and The Need for Corporate Pollution Disclosure in India: A Case Study", *International Journal of Business, Humanities and Technology*, vol. 60, 2011.
- [2] F. F. Zaemi, R. C. Rohmana, "Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) untuk Pembangunan Berkelanjutan: Potensi dan Tantangan di Industri Migas Indonesia", *Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumihan Ke-III*, 2021.
- [3] Bappenas, "Implementasi Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca", 2013.
https://www.new.menlh.go.id:https://www.new.go.id/Publikasi/Buku/Lain-lain/Emisi_GRK.pdf
- [4] Nasional Sekretaris, *Indonesia-Energy-Outlook-2019*, 2019.
<https://www.esdm.go.id:https://www.esdm.go.id/Assets/Media/Content/Content-Outlook-Energi-Indonesia-2019-Bahasa-Indonesia.pdf>
- [5] E. Syahrial, U. Pasarai, & U. P. Iskandar, "Understanding Carbon Capture And Storage (Ccs) Potential In Indonesia", *Understanding Carbon Capture And Storage*, 129-134, 2010.
- [6] Satyana, Awang, H., & dkk. (2004). *Rembang-Madura-Kangean-Sakala (RMKS) Fault Zone, East Java Basin: The Origin and Nature of Geologic Border*. Jakarta: Badan Pelaksana Migas.
- [7] B. Sapiie, H. Danio, A. Priyono, A. R. Asikin, D. S. Widarto, E. Widiyanto, & T. Tsuji, "Geological characteristic and fault stability of the Gundih CCS pilot project at Central Java, Indonesia", *Proceedings of the 12th SEGJ International Symposium*, 110-113, 2015.
- [8] I. Malureanu, T. Boaca, & D. Naegu, "New Relations of Water Saturation's Calculus from Well Logs", *Acta Geophysica*, 2016. doi: 10.1515/acgeo-2016-0063.
- [9] H. Adim, "Pengetahuan Dasar Mekanika Reservoir, Volume 1", Badan Penelitian dan Pengembangan Energi dan Sumber Daya Mineral Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi, 1991.
- [10] M. Rider, "The Geological Interpretation of Well Logs, Second Editions", Rider-French Consulting Lt., 2002.
- [11] A. Nurhayanto, & B. G. Santosa, "Evaluasi Formasi Menggunakan Data Log dan Data Core pada Lapangan "X" Cekungan Jawa Timur Bagian Utara", *Jurnal Sains dan Seni Pomits*, vol. 3, no. 2, B112-B117, 2014.
- [12] R. P. Koesoemadinata, "Geologi Minyak dan Gas Bumi", Bandung: ITB, 1978.
- [13] G. Yielding, B. Freeman, & D. Needham, "Quantitative fault seal prediction", *AAPG Bulletin*, vol. 81, no. 6, pp. 897-917, 1997.

Pemodelan dapur magma gunungapi Ciremai berdasarkan data anomali gravitasi satelit

Esa Pallewi Hasby, Sehad*, Sugito

Program Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman
Jalan Dr. Suparno No.61 Karangwangkal Purwokerto Jawa Tengah Indonesia
*Email: sehad@unsoed.ac.id

Abstrak – Pemodelan fisis bawah permukaan Gunungapi Ciremai telah dilakukan untuk mengetahui bentuk dan struktur dapur magma gunungapi sebagai bagian dari mitigasi awal. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data anomali medan gravitasi satelit yang didapatkan dari website <http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get.cgi> dengan posisi $-6,6949^{\circ}$ – $-7,0949^{\circ}$ LS dan $108,2083^{\circ}$ – $108,6083^{\circ}$ BT yang telah terkoreksi hingga koreksi udara bebas. Pengolahan data yang dilakukan meliputi koreksi bouguer dan koreksi terrain sehingga diperoleh nilai Anomali Bouguer Lengkap yang berkisar $-117,7$ – $67,5$ mGal. Selanjutnya reduksi ke bidang datar menggunakan pendekatan Deret Taylor dan pemisahan anomali regional – residual menggunakan metode polinomial dilakukan sehingga diperoleh nilai anomali residual dengan rentang $-116,2$ – $27,93$ mGal. Peta kontur anomali residual menunjukkan nilai anomali rendah pada posisi $108,4017^{\circ}$ LS dan $-6,898^{\circ}$ BT yang diperkirakan merupakan lokasi dapur magma Gunungapi Ciremai yang masih aktif. Sedangkan hasil pemodelan menunjukkan bahwa letak dapur magma Gunungapi Ciremai terletak pada posisi $108,3965^{\circ}$ LS dan $-6,8962^{\circ}$ BT. Posisi tersebut tidak berada tepat di bawah kawah vulkanik, melainkan $511,37$ m ke arah timur dari kawah vulkanik dengan volume relatif besar dengan kedalaman berkisar 2 – 8 km. Hasil pemodelan menunjukkan struktur bawah permukaan Gunungapi Ciremai tersusun atas batuan pada fase cair ($1,50$ – $1,88$ g/cm³) yang diperkirakan merupakan dapur magma, batuan sedimen yang terdiri atas batupasir gampingan, batupasir tufan, konglomerat, dan breksi ($1,91$ – $2,65$ g/cm³), serta batuan lava andesit basalan ($2,7$ – $3,0$ g/cm³).

Kata Kunci: Metode Gravitasi, Gunungapi Ciremai, Struktur Geologi, Dapur Magma

Abstract – Physical modeling of the subsurface of Ciremai Volcano has been carried out to determine the shape and structure of the volcano's magma chamber as part of pre-mitigation efforts. The data used in this research is satellite gravity field anomalies data obtained from the website <http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get.cgi> with positions of -6.6949° – -7.0949° S and 108.2083° – 108.6083° E which have been corrected to free air correction. The data processing carried out includes Bouguer and terrain corrections to obtain a Complete Bouguer Anomaly value, ranging from -117.7 – 67.5 mGal. Next, reduction to a horizontal surface using the Taylor Series Approximation and separation of regional – residual anomalies using the Polynomial method are carried out to obtain residual anomalies data with a range of -116.2 – 27.93 mGal. The residual anomaly contour map shows low anomalous values at the position of 108.4017° S and -6.898° E which is estimated to be the location of the Ciremai Volcano magma chamber which is still active. While, the modeling results show that the position of the Ciremai Volcano magma chamber is located at 108.3965° S and -6.8962° E. This position is not directly below the volcanic crater, but 511.37 m to the east of the volcanic crater with a relatively large volume with a depth of around 2 – 8 km. The modeling results show that the subsurface structure of Ciremai Volcano is composed of rocks in the liquid phase (1.50 – 1.88 g/cm³) which are estimated to be magma chambers, sedimentary rocks including calcareous sandstone, tuffaceous sandstone, conglomerate and breccia (1.91 – 2.65 g/cm³), as well as basalt andesite lava rock (2.7 – 3.0 g/cm³).

Key words: Gravity Method, Ciremai Volcano, Geological Structure, Magma Chamber

PENDAHULUAN

Aktifitas tektonik di Kepulauan Indonesia semakin tinggi dengan faktor pendukung berupa posisi negara kepulauan ini yang terletak di kawasan pertemuan antar lempeng besar dunia, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia dan Lempeng Samudera Pasifik. Pertemuan antar lempeng besar tersebut ditandai

dengan gerakan horizontal, vertikal ataupun keduanya. Hal tersebut mengakibatkan kondisi geografis di Indonesia membentuk zona pegunungan yang berlipat, jalur gunungapi dan sesar [1]. Kondisi demikian mengakibatkan Indonesia memiliki potensi besar terhadap bencana geologi seperti letusan gunungapi, gerakan tanah, gempa bumi dan tsunami [2].

Berdasarkan informasi Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), Indonesia memiliki 127 gunungapi aktif atau setara dengan 14% dari seluruh gunungapi di dunia [3]. Salah satu gunungapi aktif tersebut adalah Gunungapi Ciremai [4].

Gunungapi Ciremai (3078 mdpl) merupakan gunungapi tertinggi di Jawa Barat yang terletak pada koordinat $6^{\circ} 53' 30''$ LS– $108^{\circ} 24' 00''$ BT dengan batas administratif di tiga kabupaten, yaitu Kabupaten Cirebon, Kabupaten Majalengka dan Kabupaten Kuningan [4]. Gunungapi Ciremai berbentuk simetris-stratovolcano tipe A dengan kawah ganda dan sisi curam ke arah puncak yang terbentuk di tepi utara Kaldera Gegerhalang seluas $4,5 \times 5 \text{ km}^2$ dan posisi kawah terbelah di bagian barat dengan radius 400 m dan timur dengan radius 600 m. Saat ini kondisi Gunungapi Ciremai sedang dalam masa tidur panjang setelah mengalami letusan freatik pada tahun 1938. Namun, hal tersebut tidak menutup kemungkinan Gunungapi Ciremai dapat meletus sewaktu-waktu [4].

Sebagai langkah awal mitigasi (*pre-mitigation*) terhadap letusan Gunungapi Ciremai, penelitian Geofisika diperlukan untuk mengungkap struktur bawah permukaan gunungapi tersebut. Hal tersebut didukung dengan padatnya penduduk di sekitar kaki Gunungapi Ciremai serta aset-aset nasional berupa cagar budaya, lahan pertanian, perternakan dan sarana pendidikan. Struktur geologi bawah permukaan memegang peranan penting terhadap proses-proses yang terjadi terutama proses vulkanik Gunungapi Ciremai, sehingga penelitian ini sangat diperlukan. Penelitian dengan metode gravitasi citra satelit ini dimaksudkan untuk mengetahui bagaimana bentuk struktur dapur magma Gunungapi Ciremai. Hasil-hasil yang diperoleh dapat dimanfaatkan sebagai dasar instansi terkait seperti Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) untuk memetakan zona bahaya erupsi Gunungapi Ciremai di daerah sekitar. **Gambar 1** menunjukkan Gunungapi Ciremai dari wilayah Kecamatan Linggarjati, Kabupaten Kuningan, Jawa Barat.



Gambar 1. Gunungapi Ciremai Kecamatan Linggarjati, Kabupaten Kuningan, Jawa Barat.

Metode gravitasi citra satelit telah banyak diterapkan untuk eksplorasi berbagai sumberdaya alam seperti bauksit, zinc, batubara, dan bijih logam yang sulit dideteksi menggunakan metode geofisika lainnya akibat kendala alam yang luar biasa atau kondisi yang tidak memungkinkan. Dengan menggunakan data gravitasi citra satelit, survei dapat menjangkau wilayah yang sangat luas dalam durasi waktu yang sangat singkat [5]. Pertimbangan lain pemanfaatan data anomali gravitasi citra satelit adalah biaya yang relatif murah daripada akuisisi data secara langsung, yang dapat menelan biaya puluhan hingga ratusan juta rupiah. Data anomali gravitasi citra satelit juga relatif baik digunakan untuk memodelkan struktur geologi gunungapi, reservoir panasbumi, dan berbagai sumberdaya alam lain [6]. Oleh sebab itu metode gravitasi citra satelit cocok diterapkan untuk tujuan penelitian ini, karena kondisi topografi Gunungapi Ciremai cukup ekstrim dan tidak semua bagian bisa dilalui oleh manusia.

LANDASAN TEORI

A. Metode Gravitasi

Konsep dasar metode gravitasi yang mendasari eksplorasi geofisika adalah hukum Newton tentang gaya tarik-menarik antara dua massa, dimana besar gaya antara dua buah massa m_1 dan m_2 yang terpisah dengan jarak r dan dapat dinyatakan sebagai [7]:

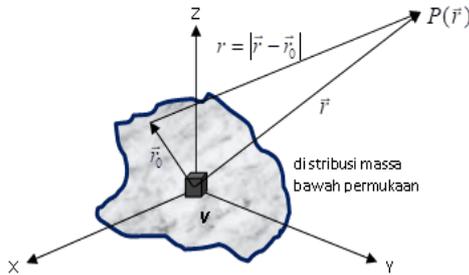
$$\vec{F}(\vec{r}) = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (1)$$

Di mana G adalah konstanta gravitasi universal ($6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$). Telford et.al. [7] telah menjabarkan Persamaan (1) untuk mendapatkan nilai potensial gravitasi pada suatu titik P di luar volume V seperti ditunjukkan pada **Gambar 2** yang dapat dinyatakan sebagai [7]:

$$U_p(\vec{r}) = - \int \frac{G}{|\vec{r} - \vec{r}_0|^2} dm = -G \int \frac{\rho(\vec{r}_0)}{|\vec{r} - \vec{r}_0|^2} d^3 \vec{r}_0 \quad (2)$$

dengan

$$|\vec{r} - \vec{r}_0|^2 = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2r r_0 \cos \gamma}$$



Gambar 2. Potensial gravitasi pada titik P di permukaan bumi akibat distribusi massa yang kontinu di bawah permukaan [7].

Jika integral volume Persamaan (2) diterapkan untuk seluruh volume bumi, maka dapat diperoleh potensial gravitasi pada permukaan bumi. Sedangkan kuat medan gravitasi diperoleh dengan cara mendiferensialkan potensial gravitasi tersebut hingga menjadi [7]:

$$\vec{E}(\vec{r}) = |-\nabla U_p(\vec{r})| \quad (3)$$

Nilai medan gravitasi bumi sering disebut sebagai percepatan gravitasi bumi (g). Berdasarkan Persamaan (2) dan (3), nilai percepatan gravitasi bumi dinyatakan dengan persamaan [7]:

$$g(\vec{r}) = |-\vec{E}(\vec{r})| = |\nabla U_p(\vec{r})| \quad (4)$$

$$g(\vec{r}) = -G \int \frac{\rho(\vec{r}_0)(z_0 - z) d^3 \vec{r}_0}{\left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 \right]^{3/2}} \quad (5)$$

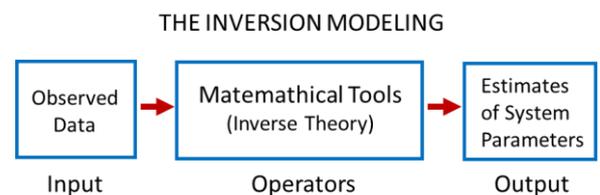
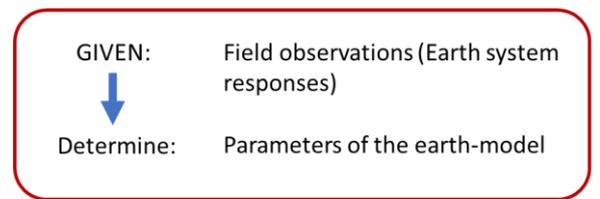
Persamaan (4) ini menunjukkan bahwa nilai medan gravitasi pada permukaan bumi bervariasi. Variasi medan gravitasi bumi dipengaruhi oleh bujur, lintang, elevasi, dan distribusi massa bawah permukaan bumi yang dinyatakan sebagai fungsi rapat massa batuan bawah permukaan [7].

B. Pemodelan Inversi-3D

Secara umum, data geofisika hasil observasi di lapangan diharapkan memberikan informasi sebanyak mungkin, tidak hanya terkait sifat-sifat fisis batuan saja, tetapi juga kondisi geometri batuan bawah permukaan, posisi, dan kedalaman batuan itu. Informasi itu dapat diperoleh apabila

relasi antara sifat-sifat fisis batuan dan data observasinya dapat diketahui. Relasi antara keduanya hampir selalu berbentuk persamaan matematika yang biasanya disebut sebagai model matematis. Berdasarkan model matematis tersebut, parameter-parameter fisis batuan dapat diekstrak dari data observasi [8]. Proses ini disebut pemodelan inversi (*inverse modelling*), seperti dapat dilihat pada **Gambar 3**. Oleh sebab itu pemodelan inversi bisa digunakan untuk membuat model geologi dari pengaruh medan gravitasi daerah penelitian.

Adapun proses kebalikannya, dimana kita ingin mendapat data prediksi hasil observasi berdasarkan parameter fisis yang sudah diketahui disebut sebagai pemodelan maju (*forward modelling*) [8]. Pemodelan maju digunakan untuk melihat respon gravitasi yang ditimbulkan dari model geologi yang dibuat. Dengan demikian pemodelan maju merupakan suatu pemodelan untuk menjabarkan data dari suatu pemodelan dengan menghitung respon teoritis dan distribusi sifat dari sumber anomali. Kedua jenis pemodelan ini memiliki tujuan untuk memperkirakan model bawah permukaan berdasarkan data hasil observasi. Dalam penelitian ini pemodelan sumber anomali yang dilakukan adalah pemodelan inversi.



Gambar 3. Alur pemodelan data anomali gravitasi secara inversi (*inverse modeling*) [8].

C. Geologi Daerah Penelitian

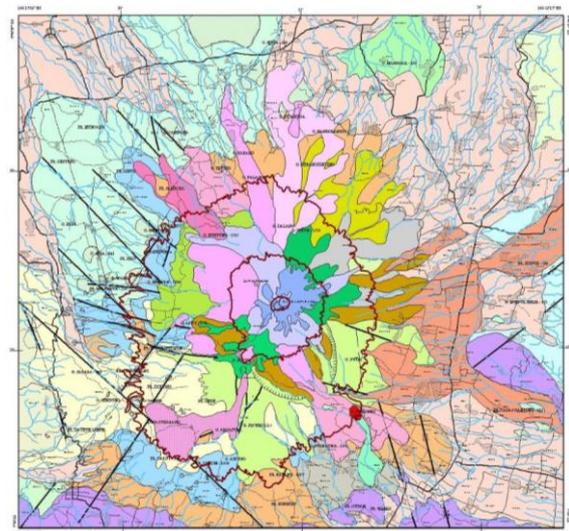
Geologi Gunungapi Ciremai ditandai dengan lipatan dan sesar. Struktur lipatan ini berasal dari pola deformasi batuan Neogen (Miosen Tengah hingga Pliosen) yang membentuk himpunan antiklin dan sinklin dengan tren hampir mengarah barat-timur. Adapun struktur sesar berarah utara-selatan mengalihkan kedudukan lipatan kearah timur (sinistral) dan kanan (dekstral). Selain gerakan arah mendatar,

sesar-sesar tersebut bergerak dalam arah tegak yang dicirikan sebagai *Oblique Faults* [9]. Startografi batuan Gunungapi Ciremai termasuk dalam Zona Bogor. Zona Bogor merupakan zona cekungan laut dalam yang tersusun atas endapan batuan sedimen turbidit [10]. Menurut Djuri dkk. [11], stratigrafi Gunungapi Ciremai dapat diurutkan dari bawah ke atas:

1. Formasi Citalang (Pct) berupa endapan sungai teranyam (*braided stream deposits*) di lingkungan barat. Formasi ini tersusun atas batupasir tufan berwarna coklat muda, lempung tufan, konglomerat dan beberapa lensa batupasir gampingan yang keras. Formasi ini diperkirakan berumur Pliosen Atas [11].
2. Formasi Kalibiuk (Pka) tersusun atas batupasir tufan, konglomerat, batupasir gampingan, dan batulempung. Formasi batuan ini diestimasi berumur Pliosen. Formasi ini ditutupi secara tidak selaras oleh Formasi Gintung yang diestimasi berumur Pliosen Tengah dan menghasilkan Gunungapi Ciremai Muda yang berumur Holosen [12].
3. Formasi Ciherang (Pch) berupa formasi yang berumur Pliosen dengan susunan batuan konglomerat. Formasi ini terbentuk akibat pengendapan yang terjadi di atas Formasi Kaliwangu ketika aktifitas Gunungapi Ciremai kembali aktif [13].
4. Formasi Kaliwangu (Pku) tersusun atas batulempung dengan sisipan batupasir tufan, konglomerat dan beberapa lapisan-lapisan batupasir gampingan dan batugamping [14]. Formasi Kaliwangu diperkirakan berumur Pliosen Akhir dan memiliki kaitan dengan Formasi Subang yaitu mengalami perubahan secara selaras serta terjadi secara perlahan [9].
5. Formasi Halang (Mha) tersusun atas batupasir andesit, konglomerat tufan dan napal yang bersisipan batupasir. Formasi ini diperkirakan berumur Miosen Akhir yang terdiri atas dua bagian, yaitu Anggota Atas dan Anggota Bawah dari Formasi Halang. Anggota Atas terdiri atas batupasir tufan, lempung, dan konglomerat dengan tebal hingga 800 meter [12]. Adapun Anggota Bawah tersusun atas Breksi vulkanik yang bersifat andesit basalt, tufan, lempung dan konglomerat [14].
6. Formasi Cinambo (Omci) tersusun atas perselingan antara batulempung dan batupasir. Formasi ini diduga berumur

Miosen Tengah hingga Akhir. Berdasarkan ketebalannya, formasi ini dibagi menjadi tiga bagian yaitu Bagian Atas, Bagian Tengah, dan Bagian Bawah dengan keseluruhan formasi memiliki ketebalan 1.500 – 1.800 m. Bagian Atas Formasi Cinambo didominasi batulempung gampingan dan batupasir tufan dengan butir berukuran sedang hingga kasar. Bagian Tengah formasi didominasi batupasir tufan tebal, sedangkan Bagian Bawah formasi didominasi oleh batulempung gampingan dan batupasir berukuran halus hingga sedang [9].

7. Intrusi Andesit (A) terdiri atas andesit augit-hipersten dan horeblendita dengan kaca sebagai massa dasar yang berbentuk keras dan retas. Andesit Horeblendita memiliki bentuk retas lempeng dengan ketebalan 20-30 m. Andesit Hipersten tersusun atas Hipersten dan Plagioklas yang berbentuk retas [14].



Gambar 4. Peta geologi daerah Gunungapi Ciremai [12].

METODE PENELITIAN

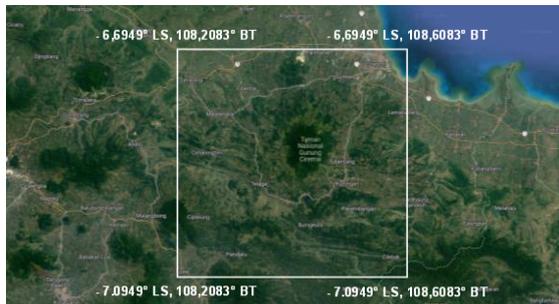
A. Lokasi Penelitian

Penelitian ini telah dilakukan di Laboratorium Elektronika, Instrumentasi dan Geofisika, Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data anomali gravitasi citra satelit dari TOPEX [15] untuk kawasan Gunungapi Ciremai dengan luas wilayah sekitar 5.186 km² dengan posisi -6,6949° - 7,0949° LS dan 108,2083° - 108,6083° BT seperti ditunjukkan pada **Gambar 5**. Secara

administrasi, daerah penelitian meliputi Kabupaten Cirebon, Kabupaten Majalengka, dan Kabupaten Kuningan.

B. Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian meliputi laptop dengan aplikasi Microsoft Excel 2019, Fortran 77, MatLab 6.1 untuk pengolahan data, Surfer 11 untuk pembuatan peta kontur serta Grablox 1.7 dan Bloxer 1.6e untuk pemodelan data anomali gravitasi secara inversi. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data anomali gravitasi citra satelit dari TOPEX yang telah diakses secara gratis melalui website <http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get.cgi>. Hasil akses data yang diperoleh berupa data posisi bujur, lintang, elevasi dan nilai anomali gravitasi yang telah terkoreksi hingga koreksi udara bebas (*free air anomaly*, FAA) [16].



Gambar 5. Peta Lokasi Penelitian

C. Pelaksanaan Penelitian

Data Anomali Bouguer Lengkap (ABL) diperoleh setelah koreksi bougeur dan koreksi terrain diterapkan terhadap data anomali gravitasi terkoreksi udara bebas (FAA). Data FAA yang diperoleh masih terdistribusi pada permukaan topografi atau dituliskan $\Delta g(\lambda, \vartheta, h)$. Untuk pengolahan menuju tahap berikutnya, data ini harus direduksi ke bidang datar. Metode yang digunakan untuk mereduksi data FAA dari topografi ke bidang datar adalah melalui pendekatan deret Taylor dengan persamaan [17]:

$$\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)^{i+1} = \Delta g(\lambda, \vartheta, h) - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(h-h_0)^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial h^n} \Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)^{[i]} \tag{7}$$

Berdasarkan persamaan (5), nilai $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ yang tersebar pada bidang datar dapat diestimasi melalui pendekatan, yaitu nilai $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ yang diperoleh dari proses iterasi ke-*i* dapat digunakan untuk mendapatkan nilai $\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0)$ pada iterasi ke (*i*+1). Proses iterasi ini dilakukan

secukupnya, sedemikian hingga nilai yang diperoleh menunjukkan konvergen [17].

Data ABL yang diperoleh dari persamaan (5) belum bersih dari efek anomali regional. Oleh karena itu data ABL tersebut harus dibersihkan dari efek regional. Data anomali regional dapat diperoleh melalui proses pengangkatan data (*upward continuation*) hingga ketinggian tertentu, sehingga perubahan data menunjukkan pola *closure* yang sangat halus. Persamaan *upward continuation* dapat dituliskan [17]:

$$\Delta g(\lambda, \vartheta, h_0 - \Delta h) = \frac{\Delta h}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta g(\lambda', \vartheta', h_0)}{\sqrt{[(\lambda - \lambda')^2 + (\vartheta - \vartheta')^2 + \Delta h^2]^3}} d\lambda' d\vartheta' \tag{8}$$

Data yang diperoleh, selanjutnya dikoreksikan terhadap data ABL yang dihasilkan persamaan (5), sehingga diperoleh data anomali magnetik lokal dengan persamaan [18]:

$$\Delta g_{res}(\lambda, \vartheta, h_0) = \Delta g(\lambda, \vartheta, h_0) - \Delta g(\lambda, \vartheta, h_0 - \Delta h) \tag{9}$$

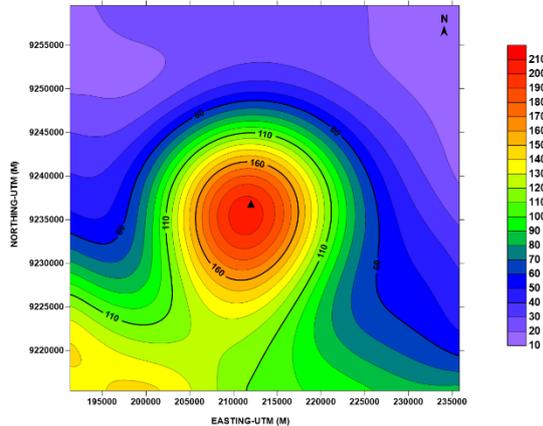
Data anomali gravitasi residual merupakan data anomali medan gravitasi lokal yang telah bersih dari berbagai efek sumber anomali lain yang tidak menjadi target penelitian dan diasumsikan hanya berasosiasi dengan sumber anomali lokal yang menjadi target pada penelitian. Data anomali gravitasi residual yang diperoleh dapat langsung dimodelkan. Namun apabila masih terdapat pengaruh dari sumber-sumber densitas lokal yang kuat yang bersumber dari permukaan topografi, maka dilakukan proses pemfilteran lagi untuk menghilangkan noise-noise tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

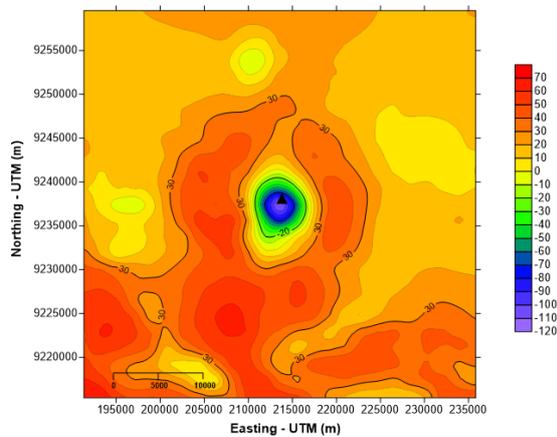
A. Hasil Pengolahan Data

Data anomali gravitasi satelit yang diakses melalui website topex terdiri dari 625 titik berupa data posisi bujur, lintang, elevasi dan nilai anomali gravitasi yang telah terkoreksi udara bebas (FAA). Nilai anomali gravitasi terkoreksi udara bebas berkisar antara 10,4 – 206,1 mGal dan nilai topografi berkisar antara -9 – 2801 m. **Gambar 6** menunjukkan peta kontur data anomali gravitasi terkoreksi udara bebas kawasan Gunungapi Ciremai. Selanjutnya pengolahan data FAA dimulai dengan koreksi bougeur dan koreksi medan untuk mendapatkan nilai anomali bougeur lengkap (ABL). Koreksi bougeur bertujuan untuk mereduksi efek tarikan dari masa batuan yang ada pada bidang *datum* dengan asumsi memiliki jari-jari tak tertingga dengan ketebalan *h* (meter) dan densitas ρ (gr/cc). Koreksi medan bertujuan untuk

mengurangi efek massa topografi di permukaan yang relatif kasar akibat perbedaan elevasi yang besar, misalnya antara bukit dan lembah [19]. Nilai ABL yang dihasilkan berkisar -117,7 – 67,5 mGal, dengan peta kontur ditunjukkan pada **Gambar 7**.



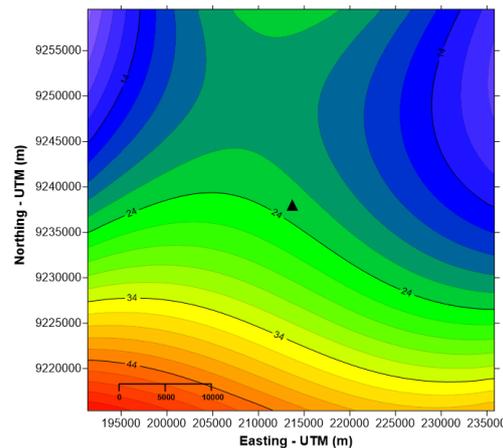
Gambar 6. Peta kontur anomali gravitasi terkoreksi udara bebas (FAA) kawasan Gunungapi Ciremai.



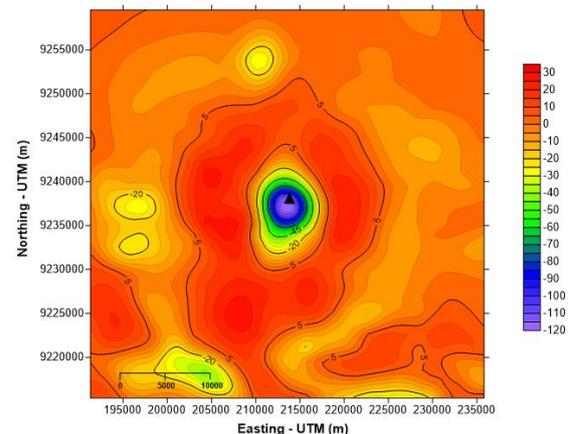
Gambar 7. Peta kontur anomali bouguer lengkap (ABL) kawasan Gunungapi Ciremai.

Data ABL yang dihasilkan mengikuti posisi titik amat pada topografi. Untuk memudahkan proses pemodelan, maka perlu dilakukan reduksi ke bidang datar menggunakan pendekatan Deret Taylor. Data ABL direduksi atau ditransformasikan ke suatu bidang datar pada ketinggian rata-rata topografi daerah penelitian, yaitu 441,23 m sesuai saran Blakely [17]. Nilai ABL yang telah direduksi pada bidang datar berkisar -92,7 – 67,3 mGal. Data ABL tersebut merupakan superposisi antara data anomali regional dan anomali residual. Kedua anomali tersebut memiliki sifat yang berbeda dimana anomali regional bersifat halus dan bersumber atas batuan-batuan yang sangat dalam, adapun

anomali residual bersifat kasar dan bersumber dari batuan-batuan yang dangkal. Pemisahan kedua data perlu dilakukan agar mendapatkan hasil yang optimal. Pemisahan anomali regional-residual dilakukan menggunakan metode polinomial, dimana proses pemisahan data anomali berada pada orde-3. Setelah proses pemisahan data anomali regional-residual selesai, maka diperoleh nilai anomali regional yang berkisar 5,3 – 53,9 mGal. Sedangkan nilai anomali residual berkisar antara -116,23 – 27,93 mGal. Peta kontur anomali regional dan anomali residual yang dihasilkan ditunjukkan pada **Gambar 8** dan **Gambar 9**.



Gambar 8. Peta kontur ABL regional kawasan Gunungapi Ciremai.

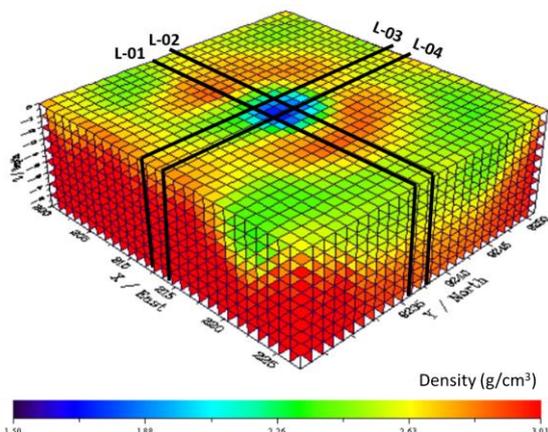


Gambar 9. Peta kontur ABL residual kawasan Gunungapi Ciremai.

B. Hasil Pemodelan dan Interpretasi Data

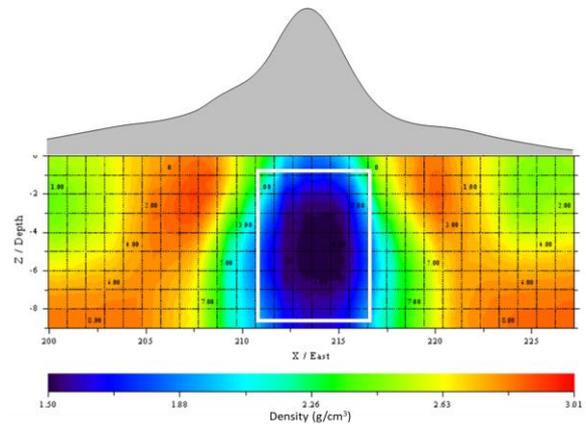
Pemodelan struktur geologi bawah permukaan Gunungapi Ciremai telah dilakukan menggunakan metode pemodelan inversi dengan bentuk blok mayor dengan susunan 28 × 26 × 9 blok. Luas wilayah pemodelan berkisar 27,258

km × 25,654 km dengan kedalaman 9000 m. Pemodelan bertujuan untuk mendapatkan gambaran struktur geologi bawah permukaan Gunungapi Ciremai dan model dapur magmanya. Pemodelan dilakukan dengan cara membagi sumbu-x menjadi 28 blok, sumbu-y menjadi 26 blok, dan sumbu-z menjadi 9 blok. Oleh sebab itu, jumlah blok penyusun model adalah 6.552 blok. Dimensi sebuah blok minor adalah 1 km × 1 km × 1 km. Data anomali residual yang dimodelkan, selanjutnya diinversikan terhadap model awal. Inversi ini dilakukan melalui beberapa tahapan optimasi, seperti: optimasi dasar (*base*) dan optimasi densitas (*density*). Proses inversi telah menghasilkan model 3D seperti ditunjukkan pada **Gambar 10**, dengan nilai densitas berkisar 1,50 – 3,01 g/cm³.

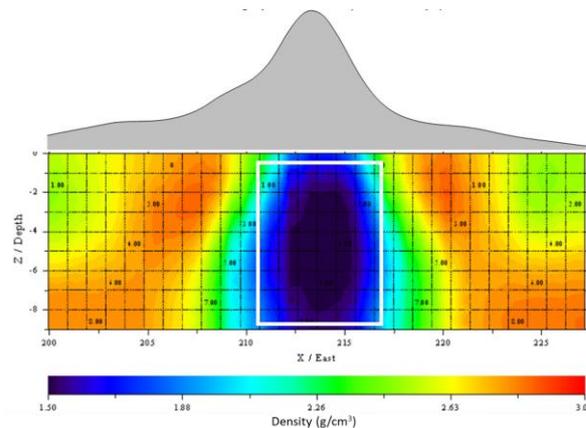


Gambar 10. Model distribusi densitas batuan bawah permukaan di kawasan Gunungapi Ciremai.

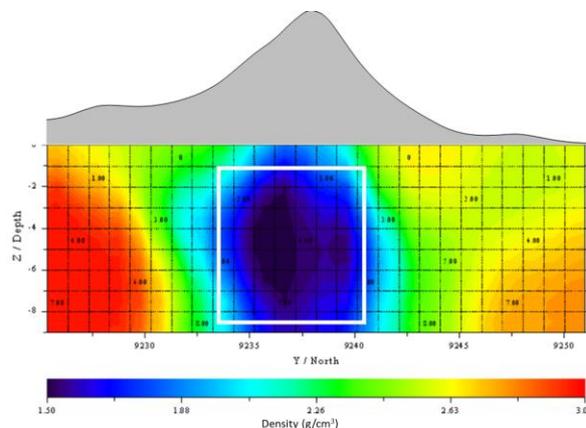
Untuk memperjelas model 3D struktur bawah permukaan, maka dilakukan pengirisan model hingga membentuk sayatan sesuai dengan lintasan-lintasan pada **Gambar 9**, yaitu L-01, L-02, L-03 dan L-04. Lintasan L-01 dan L-02 merupakan sayatan dari arah barat ke timur, sedangkan lintasan L-03 dan L-04 merupakan sayatan dari arah utara ke selatan. Seluruh lintasan melewati pusat *closure* anomali yang diperkirakan sebagai dapur magma Gunungapi Ciremai seperti terlihat pada **Gambar 10** hingga **Gambar 13**. Blok batuan dengan nilai densitas paling rendah (warna biru tua) diinterpretasi sebagai dapur magma Gunungapi Ciremai yang masih aktif.



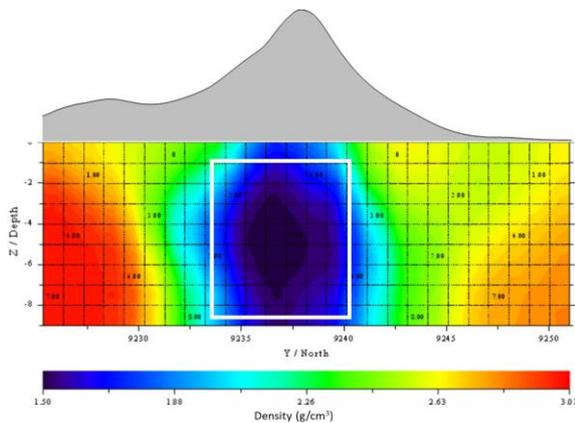
Gambar 11. Model sayatan densitas batuan bawah permukaan kawasan Gunungapi Ciremai di sepanjang lintasan L-01 pada garis bujur 9.236,69 km UTM



Gambar 12. Model sayatan densitas batuan bawah permukaan kawasan Gunungapi Ciremai di sepanjang lintasan L-02 pada garis bujur 9.238,17 km UTM



Gambar 13. Model sayatan densitas batuan bawah permukaan kawasan Gunungapi Ciremai di sepanjang lintasan L-03 pada garis lintang 212,11 km UTM



Gambar 14. Model sayatan densitas batuan bawah permukaan kawasan Gunungapi Ciremai di sepanjang lintasan L-03 pada garis lintang 213,09 km UTM

Hasil pemodelan terhadap data ABL residual menunjukkan bahwa batuan bawah permukaan daerah Gunungapi Ciremai terbagi atas tiga bagian. Area berwarna biru tua hingga biru muda dengan nilai densitas $1,50 - 1,88 \text{ g/cm}^3$ diinterpretasi sebagai dapur magma; area berwarna hijau hingga kuning dengan nilai densitas $1,91 - 2,65 \text{ g/cm}^3$ diinterpretasi sebagai batupasir, batulempung, konglomerat, dan breksi; serta area berwarna orange hingga merah dengan nilai densitas $2,70 - 3,00 \text{ g/cm}^3$ diinterpretasi sebagai lava andesit basalan. Hasil pemodelan ini juga menunjukkan bahwa model dapur magma Gunungapi Ciremai paling jelas teramati pada posisi 213,574 km-UTM dan 9.238,167 km UTM atau $108.4082^\circ \text{ BT}$ dan 6.8851° LS dengan kedalaman berkisar 2 – 8 km di bawah ketinggian topografi rata-rata. Posisi dapur magma tersebut tidak vertikal sempurna di bawah kawah vulkanik gunungapi, namun agak bergeser. Hal tersebut dibuktikan bahwa puncak Gunungapi Ciremai terletak pada posisi 213,583 km-UTM dan 9.237,456 km UTM atau $108.4083^\circ \text{ BT}$ dan 6.8916° LS . Apabila hasil pemodelan pada L-01 dan L-02 dikorelasikan, dapur magma Gunungapi Slamet memiliki diameter lebih dari 2,45 km dengan arah barat-timur. Sedangkan jika hasil pemodelan pada L-03 dan L-04 dikorelasikan, diameter dapur magma lebih dari 2,60 km dengan arah utara-selatan.

C. Pembahasan

Berdasarkan peta kontur ABL residual, lokasi Gunungapi Ciremai tua diperkirakan terletak di bagian barat laut menuju selatan. Hal tersebut ditunjukkan dengan nilai anomali tinggi yang

menginterpretasikan struktur batuan lava andesit padat bertekstur porfiritik di bagian sisi timur, selatan, dan barat daya Gunungapi Ciremai akibat erupsi Gunung Putri [20]. Sebagian struktur batuan Gunungapi Ciremai tua tertutup oleh struktur batuan lava yang ditunjukkan oleh nilai anomali sedang hingga rendah di bagian sisi selatan, barat, barat daya, dan barat laut Gunungapi Ciremai Muda. Gunungapi muda ini tersusun oleh endapan aliran piroklastik dan lava andesit profir dari Gunung Gegerhalang yang erupsi. Struktur batuan yang mendominasi adalah batupung, pasir vulkanik, andesit basalan dari lava Gunungapi Ciremai akibat erupsi samping (*flank eruption*) [20].

Hasil pemodelan data ABL seperti terlihat pada **Gambar 11** hingga **Gambar 14** menunjukkan kondisi aliran magma Gunungapi Ciremai dari kerak bumi menuju ke permukaan. Pada umumnya, aliran magma Gunungapi Ciremai mengikuti pola rekahan yang terdapat di bagian puncak. Sebaran aliran magma pun relatif tidak jauh dari kawah berkisar 5 – 8 km dari pusat erupsi dan berangsur melambat sehingga ancaman bahaya yang dihasilkan lebih kecil daripada ancaman bahaya letusan gunungapi lainnya [20]. Berdasarkan data dari Badan Geologi Republik Indonesia, karakteristik letusan Gunungapi Ciremai berupa erupsi yang sangat kuat akibat naiknya kolom magma akibat intrusi diapirik sehingga menghasilkan depresi berbentuk lingkaran dengan kaldera di rendah [20]. Secara umum, tipe erupsi tersebut menunjukkan bahwa posisi dapur magma Gunungapi Ciremai tergolong dalam.

KESIMPULAN

Pemodelan struktur geologi bawah permukaan Gunungapi Ciremai telah dilakukan berdasarkan data satelit gravimetri dari Topex dengan hasil sebagai berikut:

1. Batuan bawah permukaan kawasan Gunungapi Ciremai terbagi atas tiga bagian, yaitu batuan dengan nilai densitas berkisar $1,50-1,88 \text{ g/cm}^3$ diinterpretasi sebagai dapur magma; batuan dengan nilai densitas berkisar $1,91-2,65 \text{ g/cm}^3$ diinterpretasi sebagai batulempung, konglomerat, batupasir, dan breksi; serta batuan dengan nilai densitas berkisar $2,70-3,00 \text{ g/cm}^3$ diinterpretasi sebagai batuan lava andesit basalan.

2. Hasil-hasil pemodelan inversi terhadap data ABL residual menunjukkan bahwa dapur magma Gunungapi Ciremai berada pada posisi 108.4082° BT dan 6.8851° LS. Posisi dapur magma tersebut tidak berada tepat di bawah kawah vulkanik, tetapi 511,37 m relatif ke timur dengan volume relatif besar dan kedalaman berkisar 2–8 km.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Kepala Laboratorium Elektronika, Instrumentasi, dan Geofisika Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman atas fasilitas ruangan untuk kegiatan penelitian. Terimakasih juga disampaikan kepada Saudari Aina Zahra Ikhwana, S.Si. yang berkenan membantu memberikan tutorial pemodelan inversi 3D

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R.S. Atmadja, R.C. Mauri, H. Bellon, H. Pringgoprawiro, M. Polve, B. Priade, "Tertiary Magmatic Belts in Java", *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, vol. 09, no. 1-2, pp. 13-27, 1994.
- [2] B. Sucipto, Y. Mulyati, "Manajemen Resiko Bencana Geologi", *Kajian & Riset Manajemen Profesional*, vol. 11, no. 02, pp. 14-26, 2020.
- [3] --, "Magma Indonesia, Tipe Gunungapi di Indonesia (A, B, dan C)", *Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral RI*, 2021.
<https://magma.esdm.go.id/v1/edukasi/tipe-gunung-api-di-indonesia-a-b-dan-c>
[diakses: 1 Januari 2024].
- [4] P. Indro, "Kegiatan Gunungapi Ciremai Jawa Barat dan Pengaruhnya Terhadap Lingkungan di Sekitarnya", *Jurnal Biologi Indonesia*, vol. 04, no. 05, pp. 261-278, 2008.
- [5] Sehad, U.N. Prabowo, S.A. Raharjo, L. Ariska, "Utilization of Gravimetric Satellite Data for Delineating of Subsurface Model of the Purwokerto-Purbalingga Ground-water Basin", *Indonesian Journal of Geography*, vol. 54, no. 3, pp. 428-436, 2022.
- [6] D.I. Oktavia, A. Azwar, Z. Zufian, "Anomali Gravitasi Daerah Manifestasi Panas Bumi Bitung Berdasarkan Data Satelit GeoSat dan ERS-1", *Prisma Fisika*, vol. 07, no. 02, pp. 51-54, 2019.
- [7] W.M. Telford, L.P. Gedaart & R.E. Sheriff, "Applied Geophysics", New York: Cambridge University Press, 1990.
- [8] Supriyanto, "Analisis Data Geofisika: Memahami Teori Inversi", Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia, 2007.
- [9] H. Samodra, "Geologi Batuan Dasar Gunung Ciremai Jawa Barat", *Jurnal Biologi Indonesia*, vol. 02, no. 05, pp. 279-287, 2008.
- [10] R. P. Koesoemadinata, dan S. Martodjojo, "Penelitian Turbidit di Pulau Jawa", Laporan Penelitian No. 1295/74. Bandung: Badan Penelitian Institut Teknologi Bandung, 1974.
- [11] Djuri, "eta Geologi Lembar Arjawinangun, Jawa Barat", Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, 1995.
- [12] S. Hidayat, H. Mulyana, H. Moechtar, S. Subiyanto, "Sedimentologi dan Stratigrafi Aluvium Bawah Permukaan di Pesisir Cirebon dan Sekitarnya", *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, vol. 19, no. 04, pp. 251-260, 2009.
- [13] D. Purnama, B. Yoseph, R.M.G. Gani, I. Haryanto, "Geologi Daerah Jembarwangi dan Sekitarnya, Kecamatan Tomo, Kabupaten Sumedang, Jawa Barat", *Padjajaran Geoscience Journal*, vol. 04, no. 01, pp. 25-34, 2020.
- [14] R. F. Fauzan, "Sesar di Indonesia, Resume", Bandung: Universitas Pendidikan Indonesia, 2019.
- [15] D.T. Sandwell dan H.F. Smith, "Global Marine Gravity from Retracked GEOSAT and ERS-1 Altimetry: Ridge Segmentation versus Spreading Rate", *Journal of Geophysical Research*, vol. 114, no. B1, pp. 1-18, 2009.
- [16] R.D. Indriana, "Estimation of Sediment Thickness and Depth of Mohorovicic Discontinuity in East Java with Power Spectrum Analysis of Gravity Anomaly

- Data”, *Berkala Fisika*, vol. 11, no. 02, pp. 67-74, 2008.
- [17] R.J. Blakely, “Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications”, Cambridge University Press. New York, USA, 1995.
- [18] Sehad, U. N, Prabowo, S. A. Raharjo, R. Kurniati, “Utilization of Satellite Gravity Anomaly Data for Two-Dimensional Modeling of Subsurface Structure of Slamet Volcano, Central Java, Indonesia”, *Malaysian Journal of Geosciences (MJG)*, vol. 07, no. 01, pp. 01-07, 2023.
- [19] A.D. Maulana, and D.A. Prasetyo, “Mathematical Analysis on Bouguer Correction and Field Correction on Topex Satellite Gravity Data and Application in Geohazard; A Case Study of the Palu Koro Fault, Central Sulawesi”, *Jurnal Geosaintek*, vol. 05, no. 03, pp. 91-100, 2019.
- [20] I. Pratomo, “Kegiatan Gunungapi Ciremai Jawa Barat dan Pengaruhnya Terhadap Lingkungan di Sekitarnya”, *Jurnal Biologi Indonesia*, vol. 04, no. 05, pp. 261-278, 2008.

Analisis kolerasi dan determinasi antara *fault fracture density* (FFD) dengan bencana tanah longsor kabupaten Simalungun, Sumatera Utara

Hana Rosyida^{1*}, Nugroho Budi Wibowo^{1,2}, Icha Khaerunnisa¹, Indar Mery S. A.¹, Dea Mutiara Jannah¹, Fathunajah Elsha C.¹, Salma Khoirunnisa¹

¹Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga
Jl.Laksda Adisucipto Sleman, Gedung Student Center Lt. III No. 3.70

²BMKG, Stasiun Geofisika Sleman, Jl Wates km 8 Jitengan Balecatuur Sleman
*email: 21106020027@student.uin-suka.ac.id

Abstrak – Kabupaten Simalungun, merupakan salah satu kabupaten di provinsi Sumatera Utara. Berbatasan dengan Kabupaten Toba Samosir dan Danau Toba di sebelah Selatan, daerah ini cukup rawan terhadap bencana tanah longsor. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui korelasi dan determinasi Fault Fracture Density dengan membandingkan jumlah kejadian tanah longsor pada kawasan penelitian. Titik pertama (Bukit Dolok Simarbalatuk) dengan elevasi sebesar 1683 mdpl serta nilai densitas sebesar 1,50 km/km² memiliki aktivitas tanah longsor kurang lebih sebanyak 8 kali. Titik kedua (Jalan Josep Sinaga) dengan elevasi sebesar 948 mdpl serta nilai densitas sebesar 0,1 km/km² memiliki aktivitas tanah longsor sebanyak 1 kali. Hasil interpretasi kolerasi antara Fault Fracture Density dengan jumlah kejadian tanah longsor didapatkan hubungan positif yang sangat rendah dengan nilai sebesar 0,1656 serta determinasi menunjukkan nilai sebesar 2,7%..

Kata Kunci: Simalungun, longsor, fault fracture density, korelasi, curah hujan

Abstract – *Simalungun Regency is one of the districts in North Sumatra province. Bordering Toba Samosir Regency and Lake Toba to the south, this area is quite prone to landslides. This research aims to determine the correlation and determination of Fault Fracture Density by comparing the number of landslide events in the research area. The first point (Bukit Dolok Simarbalatuk) with an elevation of 1683 meters above sea level and a density value of 1.50 km/km² had landslide activity approximately 8 times. The second point (Jalan Josep Sinaga) with an elevation of 948 meters above sea level and a density value of 0.1 km/km² had 1 landslide activity. The results of the interpretation of the correlation between Fault Fracture Density and the number of landslide events showed a very low positive relationship with a value of 0.1656 and the determination showed a value of 2.7%.*

Key words: *Simalungun, Landslides, Fault Fracture Density, Correlation, Rainfall*

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara yang sering mengalami bencana hidrometeorologi, yaitu bencana gerakan tanah yang disebabkan karena perubahan iklim dan cuaca, salah satunya adalah bencana gerakan tanah [1].

Menurut (Direktorat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi 2005), tanah longsor bisa juga disebut dengan gerakan tanah. Didefinisikan sebagai massa tanah atau material campuran lempung, kerikil, pasir, dan kerakal serta bongkah dan lumpur, yang bergerak sepanjang lereng atau keluar lereng, karena faktor gravitasi bumi. Gerakan tanah (tanah longsor) adalah suatu produk dari proses gangguan keseimbangan lereng yang menyebabkan bergeraknya massa tanah dan batuan ke tempat yang lebih rendah [2].

Kabupaten Simalungun, merupakan salah satu kabupaten di provinsi Sumatera Utara. Secara geografis terletak pada 2° 36'–3° 18' Lintang Utara dan 98° 32'–99° 35' Bujur Timur. Berbatasan dengan Kabupaten Toba Samosir dan Danau Toba di sebelah Selatan, daerah ini cukup rawan terhadap bencana tanah longsor.

Berdasarkan surat kabar online lokal diantaranya hetanews.com [3], viva.co.id [4], dan binamarga.pu.co.id [5] mencatat kejadian bencana tanah longsor di Jembatan Sidua-dua akibat dari longsor Bukit Dolok Simarbalatuk terjadi pada pertengahan bulan Desember 2018 sampai pertengahan bulan Januari 2019. Tercatat kurang lebih sebanyak 8 kali terjadi bencana tanah longsor yang berasal dari Bukit Dolok Simarbalatuk, bahkan dalam sekali longsor sempat terdapat longsor susulan.

Longsor pada daerah ini berupa lumpur dan beberapa potongan kayu.

Adapun di sisi selatan Kabupaten Simalungun, terjadi tanah longsor di bahu jalan Josep Sinaga. Berdasarkan surat kabar online lokal yaitu hetanews.com [6] mengabarkan pada tanggal 23 September 2022 terjadi bencana tanah longsor di bahu Jalan Josep Sinaga, kurang lebih setengah ruas jalan longsor ke jurang dengan ketinggian kurang lebih 7 meter.

Metode *Fault Fracture Density* merupakan pengembangan dari analisa geospasial yang digunakan untuk mengetahui kondisi struktur makro disuatu daerah. Metode ini menerapkan perhitungan pola kerapatan garis lineasi pada citra satelit, sehingga dapat diketahui zona-zona lemah [7]. Adanya penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kolerasi metode *Fault Fracture Density* dengan bencana tanah longsor pada kawasan penelitian.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis peta *Fault Fracture Density*, analisis kolerasi dan determinasi antara *Fault Fracture Density* dengan jumlah kejadian tanah longsor, analisis curah hujan, serta analisis formasi batuan pada kawasan penelitian.

Data yang digunakan dalam analisis *Fault Fracture Density* adalah DEMNAS. Data tersebut di ekstrak menjadi peta *hillshade* dengan menerapkan sudut penyinaran matahari. Hasil kelurusan adalah *diagram roset* dan parameter *Fault Fracture Density*. Peta kontur *Fault Fracture Density* dibuat dengan membagi total panjang kelurusan dengan yang berada dalam grid dengan luas grid tersebut. Nilai tersebut diposisikan di tengah grid [8].

Analisis koefisien korelasi digunakan untuk mengetahui arah dan kuatnya hubungan antar dua variabel atau lebih. Arah dinyatakan dalam bentuk hubungan positif dan negatif, sedangkan kuat atau lemahnya hubungan dinyatakan dalam besarnya koefisien korelasi [9].

Koefisien korelasi (r) menunjukkan derajat korelasi antara variabel independen dan variabel dependen. Nilai koefisien korelasi harus terdapat dalam batas-batas -1 hingga $+1$ ($-1 < r \leq +1$) yang menghasilkan beberapa kemungkinan, antara lain sebagai berikut :

- a. Tanda positif menunjukkan adanya korelasi positif dalam variabel-variabel yang diuji, yang berarti setiap kenaikan dan penurunan nilai-nilai X akan diakui dengan kenaikan

dan penurunan Y. Jika $r = +1$ atau mendekati 1 maka menunjukkan adanya pengaruh positif antara variabel-variabel yang diuji sangat kuat.

- b. Tanda negatif menunjukkan adanya korelasi negatif antara variabel-variabel yang diuji, berarti setiap kenaikan nilai-nilai X akan diikuti dengan penurunan nilai Y dan sebaliknya. Jika $r = -1$ atau mendekati -1 maka menunjukkan adanya pengaruh negatif dan korelasi variabel-variabel yang diuji lemah.
- c. Jika $r = 0$ atau mendekati 0 maka menunjukkan korelasi yang lemah atau tidak ada korelasi sama sekali antara variabel-variabel yang diteliti dan diuji.

Tabel 1 Koefisien Korelasi (Sumber: Sugiyono, 2018)

Interval Koefisien	Koefisien Korelasi
0.00 - 0.199	Sangat Rendah
0.20 - 0.399	Rendah
0.40 - 0.599	Sedang
0.60 - 0.799	Tinggi
0.80 - 1.000	Sangat Tinggi

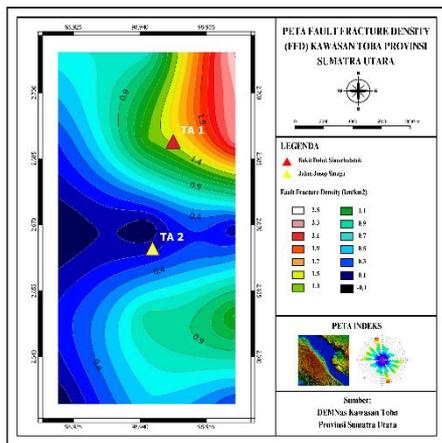
Analisis determinasi (R^2) adalah mengukur seberapa jauh kemampuan model dalam menerangkan variasi variabel dependen. Nilai koefisien determinasi adalah 0 dan 1. Nilai R^2 yang kecil berarti kemampuan variabel-variabel dependen sangat terbatas. Nilai yang mendekati 1 berarti variabel-variabel independen memberikan hampir semua informasi yang dibutuhkan untuk memprediksi variasi variabel dependen [10]. Dalam penelitian ini, analisis determinasi digunakan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan nilai *Fault Fracture Density* menerangkan jumlah kejadian tanah longsor kawasan penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan data bencana longsor selama 6 tahun terakhir, terdapat 2 titik longsor yang terjadi pada kawasan penelitian, yaitu pada titik pertama (Bukit Dolok Simarbalatuk) dengan jumlah kejadian kurang lebih 8 kali yang memiliki nilai elevasi sebesar 1683 mdpl. Titik kedua (Jalan Josep Sinaga) dengan jumlah kejadian kurang lebih 1 kali yang memiliki nilai elevasi sebesar 948 mdpl.

Kedua titik longsor tersebut bila ditinjau dengan nilai *Fault Fracture Density* (Gambar

1), maka pada titik pertama berada pada nilai densitas yang sedang dengan nilai sebesar 1,50 km/km², sedangkan pada titik kedua berada pada nilai densitas yang rendah dengan nilai sebesar 0,1 km/km². Perbedaan nilai densitas ini dipengaruhi oleh elevasi pada masing-masing titik longsor. Pada titik pertama menunjukkan nilai densitas yang lebih besar dibandingkan dengan titik kedua, dimana elevasi yang dimiliki pada titik pertama juga lebih besar dibandingkan dengan titik kedua.



Gambar 1 Peta FFD Kawasan Penelitian

Jika dilihat pada Peta *Fault Fracture Density* (Gambar 1), pola struktur dapat terdeteksi pada permukaan yang telah dipengaruhi oleh aktivitas struktur. Nilai *Fault Fracture Density* yang tinggi berasal dari permukaan yang dipengaruhi oleh aktivitas struktur, sedangkan nilai *Fault Fracture Density* yang rendah berasal dari permukaan yang tidak dipengaruhi oleh aktivitas struktur [11].

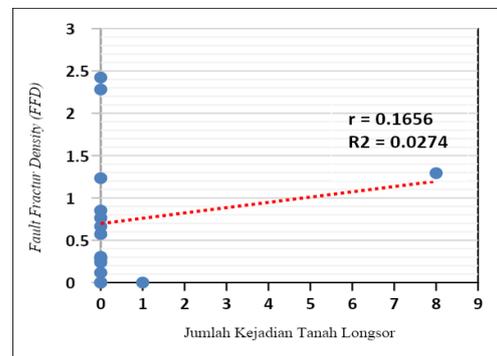
Tingginya nilai *Fault Fracture Density* yang diikuti oleh banyak jumlah kejadian longsor, dan rendahnya nilai *Fault Fracture Density* yang diikuti oleh sedikit jumlah kejadian longsor ini dapat dianalisis menggunakan korelasi dan determinasi untuk melihat sejauh mana keterkaitan diantara keduanya.

Hasil korelasi dan determinasi antara jumlah kejadian dengan nilai *Fault Fracture Density* (Gambar 2) pada kedua titik tanah longsor menunjukkan nilai korelasi (*r*) sebesar 0,1656 dan nilai determinasi (*R*²) sebesar 0,0274 atau 2,7%.

Nilai korelasi antara jumlah kejadian dan nilai *Fault Fracture Density* menunjukkan hubungan positif yang sangat rendah, dilihat dari nilai korelasi yang hampir mendekati nilai 0. Semakin tinggi jumlah kejadian semakin

tinggi juga nilai *Fault Fracture Density* dikarenakan arah hubungan menunjukkan arah positif.

Nilai determinasi antara jumlah kejadian dan nilai *Fault Fracture Density* menunjukkan bagaimana nilai *Fault Fracture Density* dapat menjadi faktor banyaknya jumlah kejadian tanah longsor sebesar 2,7%. Sementara untuk sisa persen lainnya disebabkan oleh faktor lain.



Gambar 2 Grafik Korelasi dan Determinasi antara Jumlah Kejadian Tanah Longsor dengan FFD Kawasan Penelitian

Faktor curah hujan dapat menjadi salah satu faktor terjadinya tanah longsor pada daerah kawasan penelitian. Terutama pada titik pertama yang memiliki jumlah kejadian kurang lebih sebanyak 8 kali, dimana kejadian longornya terjadi pada akhir tahun 2018 sampai awal tahun 2019. Adapun data curah hujan bulanan daerah kawasan penelitian yang dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2 Data Curah Hujan Bulanan Kabupaten Simalungun (Sumber: <https://simalungunkab.bps.go.id>) [12]

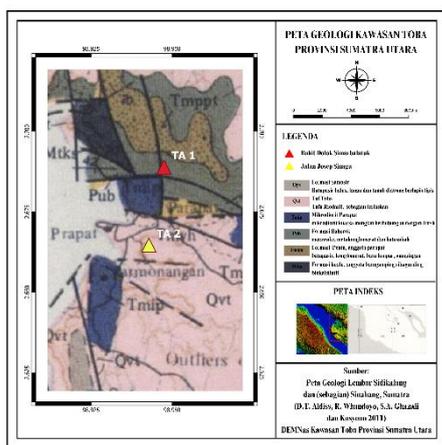
Bulan	Curah Hujan (mm)	
	2018	2019
Januari	289,00	222,00
Februari	208,00	258,00
Maret	83,00	380,00
April	53,00	345,00
Mei	241,00	364,00
Juni	223,00	172,00
Juli	115,00	191,00
Agustus	106,00	199,00
September	428,00	73,00
Oktober	537,00	395,00
November	357,00	171,00
Desember	312,00	180,00

BMKG membagi curah hujan bulanan menjadi empat kategori yaitu rendah (0–100 mm bulan⁻¹), sedang (100–300 mm bulan⁻¹), tinggi (300–500 mm bulan⁻¹), dan sangat tinggi (> 500 mm bulan⁻¹) [13]. Pada titik pertama terjadi longsor pertama pada bulan Desember 2018 dengan curah hujan bulanan yang tinggi dan longsor berakhir pada bulan Januari 2019 dengan curah hujan bulanan yang sedang.

Pada 3 bulan terakhir sebelum terjadi bencana tanah longsor pada bulan Desember, terlihat intensitas curah hujan dominan menunjukkan intensitas yang tinggi terutama pada bulan Oktober yang masuk dalam kategori intensitas yang sangat tinggi. Hal ini dapat menjadi faktor terjadinya tanah longsor secara berulang-ulang yang tercatat kurang lebih sebanyak 8 kali terjadi pada titik pertama.

Faktor curah hujan tinggi yang dapat menyebabkan terjadinya tanah longsor ditinjau dari struktur batuan di bawahnya. Pada kedua titik longsor dominan memiliki formasi dari batuan sedimen yang akan lebih lemah saat bertemu dengan curah hujan yang tinggi, dapat dilihat pada Peta Geologi pada kawasan penelitian (Gambar 3).

Intensitas curah hujan yang tinggi juga dapat meningkatkan kejenuhan air tanah dan menurunkan kekuatan ikatan antar partikel tanah yang akan dapat memicu terjadinya gerakan tanah [14].



Gambar 3 Peta Geologi Kawasan Penelitian

Kenampakan bencana tanah longsor titik pertama yang menutupi Jembatan Kembar Sidua-dua (Gambar 4 dan 5) serta kenampakan bencana tanah longsor titik pertama (Gambar 6).



Gambar 4 Kenampakan Tanah Longsor di Jembatan Kembar Sidua-dua Bulan Desember 2018 (Sumber: hetanews.com)



Gambar 5 Kenampakan Tanah Longsor di Jembatan Kembar Sidua-dua Bulan Januari 2019 (Sumber: hetanews.com)



Gambar 6 Kenampakan Tanah Longsor di Bahu Jalan Josep Sinaga (Sumber: hetanews.com)

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis hasil dan pembahasan yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Nilai *Fault Fracture Density* yang cukup tinggi menunjukkan adanya potensi kejadian tanah longsor dengan jumlah yang banyak pada daerah tersebut, sedangkan untuk nilai *Fault Fracture Density* yang rendah menunjukkan adanya potensi kejadian tanah longsor dengan jumlah yang sedikit.
2. Korelasi antara jumlah kejadian dengan nilai *Fault Fracture Density* menunjukkan hubungan positif yang sangat rendah.

3. Determinasi antara jumlah kejadian dengan nilai Fault Fracture Density memiliki nilai yang sangat rendah sebesar 2,7%.
4. Curah hujan yang tinggi menjadi faktor penyebab tanah longsor yang cukup tinggi di Kabupaten Simalungun.
5. Formasi batuan yang dominan berstruktur batuan sedimen akan lebih lemah saat bertemu dengan intensitas curah hujan yang tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Muzani. "Bencana Tanah Longsor: Penyebab dan Potensi Longsor". Yogyakarta: Deepublish, 2021.
- [2] Afriani. "Kerawanan Longsor pada Lereng Tanah Lunak dan Penangannya". Lakeisha, 2020.
- [3] Hetanews.com, "Longsor di Jembatan Kembar Parapat, Simalungun" 2018, 18 Desember.
<https://www.hetanews.com/article/145983/longsor-di-jembatan-kembar-parapat-simalungun> [Diakses: November 2023].
- [4] Viva.co.id, "Jembatan Kembar di Sumut Longsor Lagi untuk Kelima Kalinya" 2019, 11 Januari.
<https://www.viva.co.id/berita/nasional/1111077-jalur-jembatan-kembar-di-sumut-longsor-lagi-untuk-kelima-kalinya>[Diakses: November 2023].
- [5] Binamarga.pu.go.id, "Longsor Jembatan Sidua-Dua Kabupaten Simalungun Akan Segera Teratasi." 2019, 18 Februari. Tersedia:<https://binamarga.pu.go.id/index.php/berita/longsor-jembatan-sidua-dua-kabupaten-simalungun-akan-segera-teratasi>[Diakses: November 2023].
- [6] Hetanews.com, "Masyarakat Minta Pemerintah Simalungun Segera Perbaiki Jalan Longsor di Jalan Josep Sinaga Parapat" 2022, 26 September. Tersedia: <https://www.hetanews.com/article/250838/masyarakat-minta-pemerintah-simalungun-segera-perbaiki-jalan-longsor-di-jalan-josep-sinaga-parapat> [Diakses: November 2023].
- [7] Saputra & Novrinda. "Metode Fault Fracture Density untuk Potensi Gerakan Tanah di Kota Kendari Provinsi Sulawesi Tenggara". Yogyakarta: Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Yogyakarta, 2016.
- [8] Sunan, H. L., dkk, "Interpretasi Struktur Geologi Berdasarkan Fault Fracture Density (FFD) dan Implikasinya Terhadap Potensi Likuefaksi di Daerah Kalibening, Kabupaten Banjarnegara, Jawa Tengah". *Eksplorium*, vol. 42, no. 1, 2021.
- [9] Sugiyono. "Metode Penelitian Kuantitatif". Bandung: Alfabeta, 2018.
- [10] Ghozali. "Aplikasi Analisis Multivariate Dengan Program SPSS 25". Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro, 2018.
- [11] Widiatmoko, F. R., Putri, R. H. K., & Sunan, H. L. "The Relation of Fault Fracture Density with the Residual Gravity; case study in Muria". *Journal of Earth and Marine Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 105-110, 2021.
- [12] Simalungunkab.bps.go.id, "Curah Hujan (mm), 2016-2019". Tersedia: <https://simalungunkab.bps.go.id/indicator/151/43/1/curah-hujan.html> [Diakses: 5 Desember 2023].
- [13] Supriyati., Tjahjono, B., & Effendy, S. "Analisis Pola Hujan Untuk Mitigasi Aliran Lahar Hujan Gunungapi Sinabung". *J. Il. Tan. Lingk.*, vol. 20. no. 2, 2018.
- [14] Setiono, W. "Kajian Analisis Rawan Longsor Di Area Tambang". *Prosiding TPT XXX Dan Kongres XI Perhapi*, 2021

