

Struktur Geologi Daerah Dulamayo Selatan dan sekitarnya, Kabupaten Gorontalo, Provinsi Gorontalo

Rayhandi Yahya Usman¹, Aang Panji Permana¹, Ahmad Zainuri¹

¹ Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Negeri Gorontalo

*e-mail: usmanyaya01@gmail.com

Abstract

This study aims to map surface geological conditions, analyze the geometry and kinematics of joint structures, and reconstruct the orientation of principal stresses (σ_1 , σ_2 , σ_3) to identify local tectonic control mechanisms in the Dulamayo area and its surroundings, Gorontalo Province. Data collection was conducted through field geological mapping, joint orientation measurements, and lineament extraction from DEMNAS satellite imagery. The data analysis technique integrates rose diagrams for morphotectonic lineament orientation and lower-hemisphere equal-area stereographic projections (Schmidt net) for stress kinematic analysis on conjugate shear joints. Results indicate a landform dominated by Structural Hills composed of the Volcanic Andesite Unit and the Granodiorite Unit. Dominant macro-structural lineaments are oriented Northwest–Southeast (NW–SE, 311°) and North Northwest–South Southeast (NNW–SSE, 348°). Stereographic analysis of shear joints reconstructs a vertical to sub-vertical maximum principal compressive stress ($\sigma_1 = 85^\circ - 87^\circ$), sub-horizontal intermediate stress ($\sigma_2 = 3^\circ - 5^\circ$, NW–SE), and purely horizontal minimum tensile stress ($\sigma_3 = 0^\circ$, NE–SW). The vertical σ_1 orientation indicates that the study area underwent deformation controlled by a Local Extensional Stress Regime (normal faulting environment) with horizontal extension oriented NE–SW (N 36° E - N 71° E). This local deformation character demonstrates compatibility with the regional tectonic framework of North Sulawesi during the Neogene to Pleistocene epochs associated with crustal extension dynamics.

Keywords: Dulamayo, Lineament, Shear Joint, Stereographic Projection, Normal Fault, Local Tectonics

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk memetakan kondisi geologi permukaan, menganalisis geometri dan kinematika struktur kekar, serta merekonstruksi orientasi tegasan utama (σ_1 , σ_2 , σ_3) guna mengidentifikasi mekanisme kontrol tektonik lokal di Daerah Dulamayo dan sekitarnya, Provinsi Gorontalo. Pengumpulan data dilakukan melalui pemetaan geologi lapangan, pengukuran orientasi kekar, serta ekstraksi kelurusan (lineament) dari citra DEMNAS. Teknik analisis data mengintegrasikan diagram roset untuk orientasi kelurusan morfotektonik dan proyeksi stereografis equal area (jaring Schmidt) untuk analisis kinematika tegasan pada kekar gerus berpasangan (conjugate shear joints). Hasil penelitian menunjukkan bentang alam berupa Perbukitan Struktural yang tersusun atas Satuan Batuan Vulkanik Andesit dan Satuan Granodiorit. Kelurusan struktur makro dominan berarah Barat Laut – Tenggara (NW–SE, 311°) dan Utara Barat Laut – Selatan Tenggara (NNW–SSE, 348°). Analisis stereografi pada kekar gerus merekonstruksi kedudukan tegasan utama penekan maksimum (σ_1) berposisi vertikal murni hingga sub-vertikal ($85^\circ - 87^\circ$), tegasan menengah (σ_2) sub-horizontal ($3^\circ - 5^\circ$, NW–SE), dan tegasan tarikan minimum (σ_3) horizontal murni (0° , NE–SW). Kedudukan σ_1 vertikal mengindikasikan bahwa daerah penelitian terdeformasi di bawah kendali Rezim Tektonik Ekstensional Lokal (normal faulting environment) dengan gaya tarikan horizontal berarah NE–SW (N 36° E - N 71° E). Karakteristik deformasi lokal ini menunjukkan keselarasan (compatibility) dengan kerangka tektonik regional Lengan Utara Sulawesi pada era Neogen hingga Pleistosen yang dipengaruhi oleh aktivitas peregangan kerak (crustal extension).

Kata kunci: Dulamayo, Kelurusan, Kekar Gerus, Proyeksi Stereografis, Sesar Normal, Tektonik Lokal

1. PENDAHULUAN

Pulau Sulawesi, khususnya pada bagian Lengan Utara, merupakan kawasan dengan tatanan tektonik yang sangat kompleks akibat interaksi konvergensi lempeng tektonik utama dunia, yakni Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik/Filipina, dan Lempeng Eurasia. Dinamika konvergensi dan subduksi di kawasan ini memicu aktivitas magmatisme serta deformasi tektonik yang intensif sejak Zaman Tersier hingga Kuarter. Salah satu produk deformasi regional yang memegang peranan penting dalam mengontrol kerangka geologi di wilayah Provinsi Gorontalo adalah Sistem Sesar Gorontalo. Aktivitas tektonik dari sistem sesar ini secara berkesinambungan mengontrol morfologi bentang alam

dan menciptakan zona-zona deformasi pada massa batuan di wilayah sekitarnya, termasuk di daerah Dulamayo Selatan dan sekitarnya, Kabupaten Gorontalo.

Secara litologi, daerah Dulamayo Selatan didominasi oleh batuan beku masif yang kompeten, seperti intrusi granodiorit dan batuan vulkanik andesit. Batuan-batuan ini rentan mengalami deformasi getas (brittle deformation) apabila tegasan (stress) tektonik melampaui batas elastisitasnya, sehingga bertindak sebagai media yang ideal dalam merekam jejak sejarah deformasi lokal. Namun, penelitian geologi struktur di kawasan beriklim tropis memiliki tantangan tersendiri. Tingginya tingkat pelapukan batuan serta tutupan vegetasi yang lebat di daerah penelitian mengakibatkan ketersediaan data struktur primer seperti bidang sesar orde pertama dan gores-garis (slickenlines) menjadi sangat terbatas dan sulit dijumpai dalam kondisi ideal.

Keterbatasan data struktur primer tersebut melatarbelakangi penggunaan pendekatan analisis kinematika melalui pengamatan struktur sekunder berskala mesoskopik di lapangan. Mengacu pada prinsip mekanika batuan dan klasifikasi kegagalan batuan (Anderson, 1951; Fossen, 2010), struktur rekahan atau kekar (joint) merupakan indikator geologi yang paling melimpah dan sangat sensitif terhadap perubahan medan tegasan lokal. Pengukuran kedudukan geometri kekar tarik (extension joints) dan kekar gerus berpasangan (conjugate shear joints) dapat diolah lebih lanjut menggunakan analisis proyeksi stereografis (equal area projection) untuk menentukan orientasi vektor tegasan utama lokal penekan maksimum (σ_1), tegasan menengah (σ_2), dan tegasan minimum (σ_3) secara kuantitatif.

Berdasarkan rasionalisasi kondisi lapangan dan landasan teoretis tersebut, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk memetakan kondisi geologi permukaan, menganalisis geometri kelurusan morfotektonik (lineament) dari citra penginderaan jauh, serta merekonstruksi kinematika struktur rekahan batuan. Integrasi antara data makroskopis dan mesoskopis ini ditujukan untuk mengidentifikasi tatanan struktur geologi lokal secara komprehensif, sekaligus mengevaluasi keselarasan deformasi lokal di daerah Dulamayo Selatan terhadap kerangka tektonik ekstensional regional yang berkembang di Lengan Utara Sulawesi.

2. METODE

Penelitian ini menerapkan pendekatan terintegrasi yang menggabungkan analisis penginderaan jauh berskala makroskopis dan pemetaan geologi struktur berskala mesoskopis di lapangan. Secara hierarkis, tahapan pengumpulan dan analisis data dibagi menjadi tiga prosedur utama:

Analisis Skala Makro Penginderaan Jauh: Pengolahan citra satelit Digital Elevation Model Nasional (DEMNAS) dilakukan untuk mengekstraksi kelurusan morfotektonik (lineament) yang diekspresikan oleh bentang alam berupa punggung dan lembahan sungai yang tegas. Data kelurusan yang telah diekstraksi kemudian diproyeksikan dan dianalisis menggunakan diagram roset (rose diagram) guna menentukan orientasi tren struktur utama dan zona lemah regional di daerah penelitian.

Observasi Lapangan Pengumpulan data primer dilakukan secara sistematis melalui pengamatan langsung pada singkapan batuan beku kompeten yang representatif di stasiun pengamatan. Mengingat tingginya tingkat pelapukan batuan dan ketiadaan struktur gores-garis (slickenlines) yang ideal, pengukuran dititikberatkan pada kedudukan bidang rekahan (strike/dip) struktur sekunder. Berdasarkan genesa dan karakteristik fisik rekahannya, data kekar di lapangan diklasifikasikan menjadi himpunan kekar tarik (tension joints) dan kekar gerus berpasangan (conjugate shear joints).

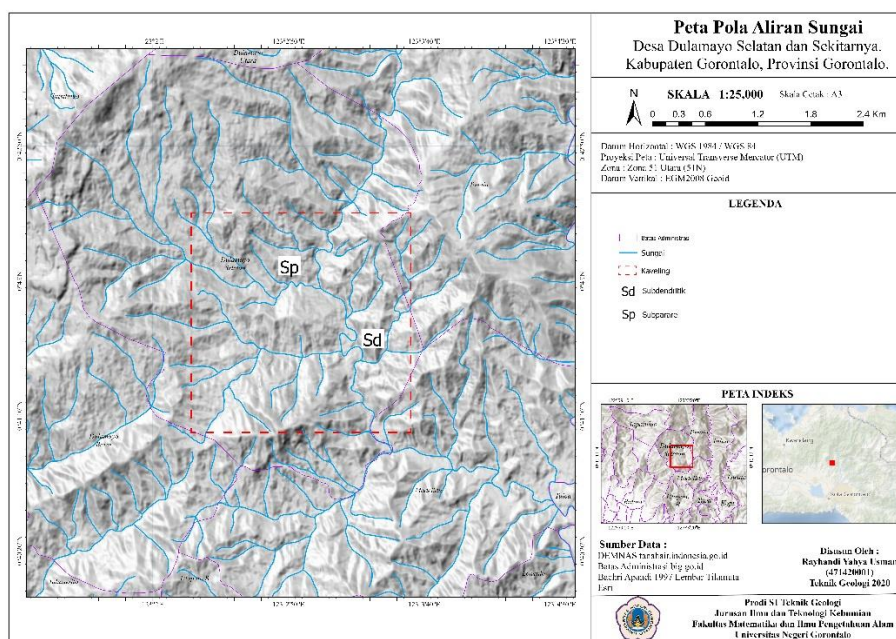
Analisis Kinematika Stereografis: Pengolahan data kedudukan kekar dilakukan secara kuantitatif menggunakan proyeksi stereografis equal-area belahan bola bawah (Schmidt Net) melalui bantuan perangkat lunak DIPS. Data kedudukan bidang diubah menjadi plot kutub (pole plot) untuk menghasilkan diagram kontur (contour plot) yang merepresentasikan kedudukan rata-rata rekahan dominan. Rekonstruksi vektor tegasan utama lokal—meliputi tegasan penekan maksimum (σ_1), tegasan menengah (σ_2), dan tegasan tarikan minimum (σ_3)—ditentukan berdasarkan kriteria kegagalan batuan Coulomb-Mohr dan klasifikasi sesar Anderson (1951). Orientasi σ_1 pada kekar gerus ditarik melalui garis bagi sudut lancip (acute bisector) dari perpotongan dua bidang, sementara orientasi bidang kekar tarik dianalisis sebagai manifestasi bukaan yang tegak lurus terhadap σ_3 . Integrasi metode ini ditujukan

untuk mendapatkan pemahaman kinematika deformasi tanpa memerlukan inversi paleostress yang bergantung pada keberadaan cermin sesar.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Pola Aliran Sungai dan Geomorfologi

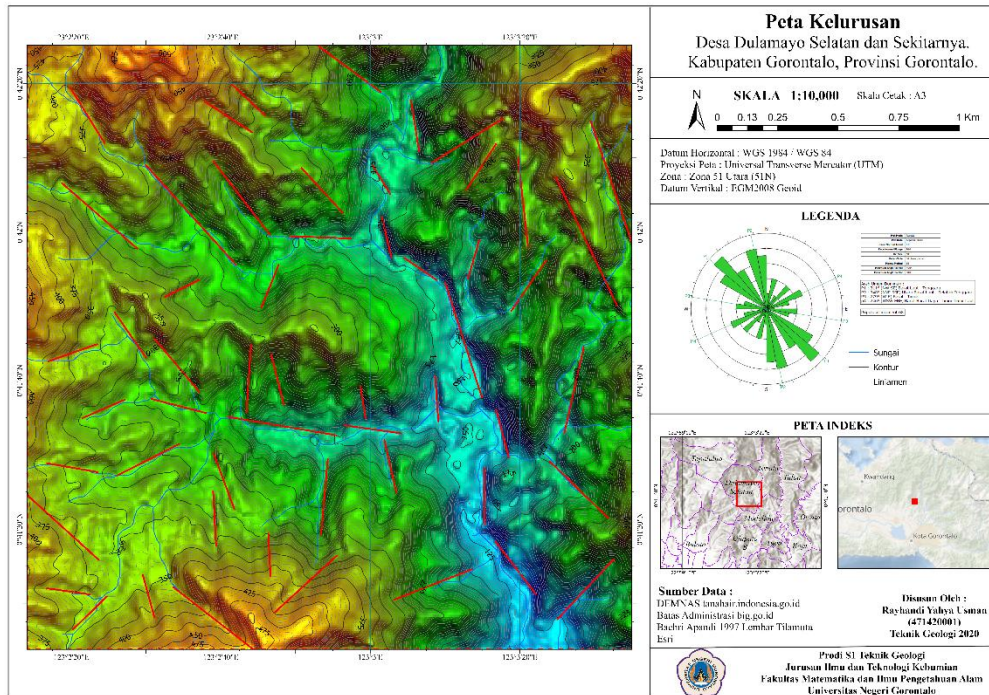
Berdasarkan klasifikasi Van Zuidam (1985), bentang alam Perbukitan Struktural di daerah penelitian didominasi oleh perkembangan dua pola aliran sungai utama, yakni pola subdendritik dan subparalel. Pola subdendritik berkembang pada litologi yang relatif homogen, yaitu Satuan Batuan Vulkanik Andesit dan Satuan Granodiorit, di mana percabangan sungai mulai dipengaruhi oleh kontrol struktur atau kemiringan topografi lokal. Di sisi lain, pola subparalel berkembang pada area berkelerengan terjal yang dikontrol kuat oleh keberadaan zona lemah, yakni kelurusan struktur makro berarah relatif Barat Laut – Tenggara (NW–SE) dan Utara Barat Laut – Selatan Tenggara (NNW–SSE).



Gambar 1 Pola Aliran sungai daerah penelitian

3.2 Analisis Kelurusan Morfotektonik (Skala Makro)

Hasil ekstraksi kelurusan morfotektonik (punggung bukit dan lembahan sungai) dari citra satelit DEMNAS memperlihatkan dominasi tren struktur makro yang berarah Barat Laut – Tenggara (NW–SE, 311°), dengan tren sekunder berarah Utara Barat Laut – Selatan Tenggara (NNW–SSE, 348°). Pola kelurusan makroskopis ini memotong secara masif tubuh batuan beku kompeten penyusun daerah Dulamayo Selatan dan bertindak sebagai zona lemah (weakness zone) permukaan yang memfasilitasi proses deformasi lebih lanjut.

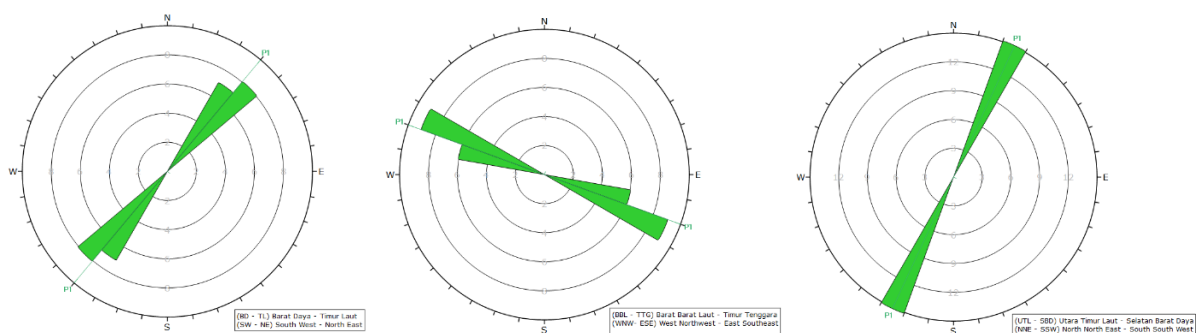


Gambar 2 Pola Kelurusan Daerah Penelitian

3.3 Analisis Kinematika Struktur Kekar (Skala Meso)

Pengukuran data rekahan pada singkapan batuan beku di lapangan menghasilkan dua kelompok struktur minor berdasarkan genetika mekanikanya:

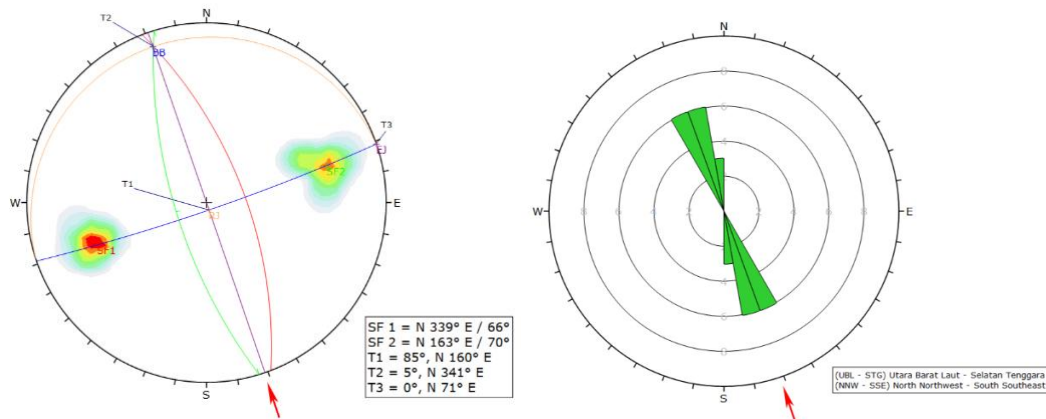
Kekar Tarik / Extension Joints : Struktur ini ditandai oleh bukaan rekahan bersudut curam tanpa pergeseran. Kedudukan rata-rata kekar tarik dominan terukur pada N 220° E / 79° (ST2), N 110° E / 50° (ST3), dan N 205° E / 78° (ST4). Secara kinematika, himpunan kekar tarik ini bertindak sebagai relieving joints yang terbentuk sejajar dengan tegasan penekan utama (σ_1) dan tegak lurus terhadap gaya tarikan minimum (σ_3), yang mencerminkan respons batuan terhadap gaya regangan persisten horizontal.



Gambar 3 Streografi Kekar Tarik di 3 Singkapan (ST2, ST3 dan ST4)

Kekar Gerus Berpasangan / Conjugate Shear Joints: Pada beberapa singkapan dijumpai set kekar gerus yang memotong massa batuan Granodiorit secara sistematis (contohnya bidang SF1: N 339° E / 66° dan SF2: N 163° E / 70°). Hasil rekonstruksi proyeksi stereografis belahan bola bawah pada singkapan-singkapan di ST5 menghasilkan orientasi tensor tegasan eksak sebagai berikut:

- Tegasan Penekan Maksimum (σ_1): Berposisi sub-vertikal murni hingga mendekati tegak lurus ($85^\circ - 87^\circ$, N 160° E / N 305° E).
- Tegasan Menengah (σ_2): Berposisi sub-horizontal ($3^\circ - 5^\circ$) dengan arah Barat Laut – Tenggara (NW–SE).
- Tegasan Tarikan Minimum (σ_3): Berposisi horizontal murni (0°) dengan arah Timur Laut – Barat Daya (NE–SW, rentang N 36° E - N 71° E).



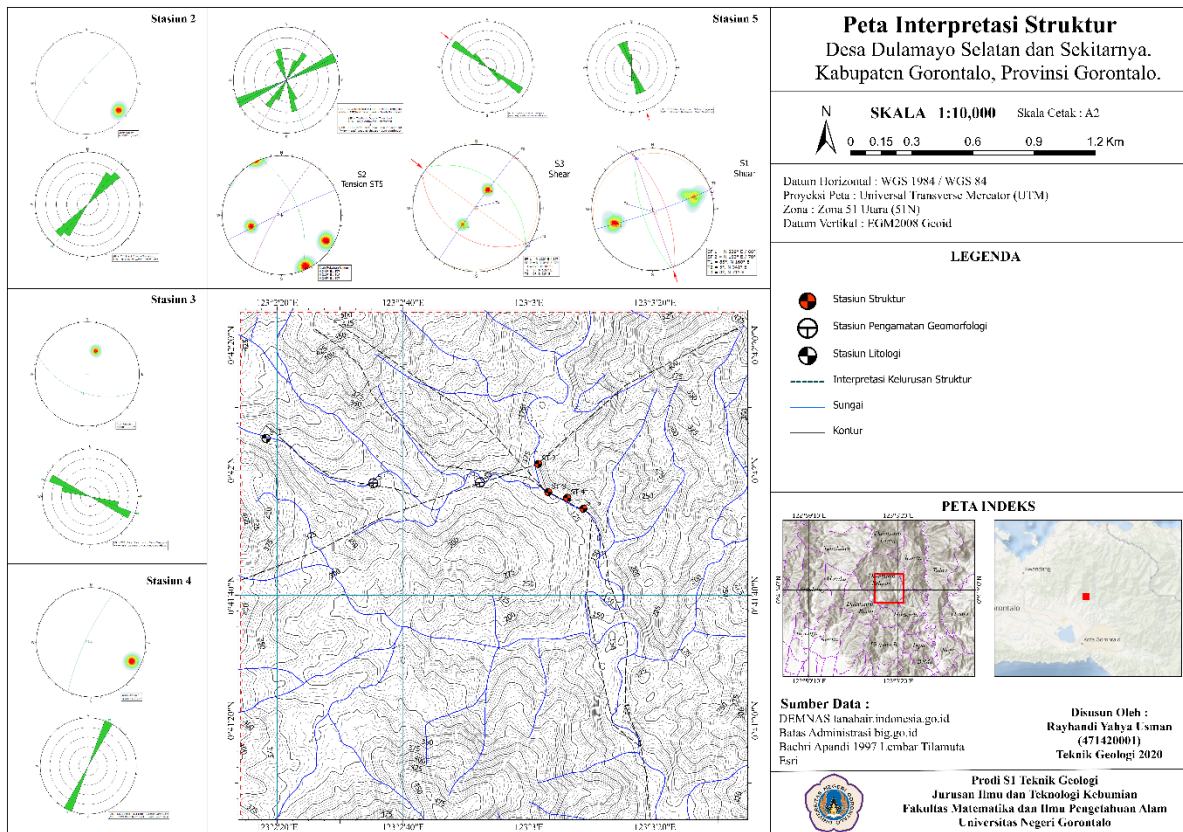
Gambar 4 Streografi Kekar Gerus

3.4 Kontrol Tektonik dan Tatanan Struktur Daerah Penelitian

Mekanisme deformasi struktur geologi di daerah Dulamayo Selatan berkembang di bawah kendali kuat aktivitas tektonik regional. Berdasarkan kriteria kegagalan batuan Coulomb-Mohr dan klasifikasi sesar Anderson (1951), kedudukan σ_1 yang berposisi vertikal murni ($85^\circ - 87^\circ$) dengan gaya tarikan σ_3 horizontal murni (0°) merupakan bukti kuantitatif absolut bahwa deformasi di daerah penelitian dikendalikan oleh Rezim Tektonik Ekstensional (normal faulting environment).

Integrasi antara data kinematika meso lapangan dan kelurusan makro DEMNAS menunjukkan korelasi geometris yang sangat presisi. Orientasi tegasan menengah (σ_2) hasil analisis stereografi (NW–SE) berimpit dan sejajar sempurna dengan tren puncak kelurusan lanskap (311° dan 348°). Secara mekanika batuan pada rezim ekstensional, bidang sesar turun maupun zona rekahan makro akan selalu terbentuk paralel terhadap σ_2 dan tegak lurus terhadap σ_3 . Keselarasan geometri ini secara meyakinkan membuktikan bahwa kelurusan lanskap di Dulamayo bukanlah sekadar hasil erosi eksogenik, melainkan manifestasi struktural permukaan dari keberadaan sesar normal dan zona rekahan akibat peregangan kerak (crustal stretching).

Secara tatanan tektonik regional Lengan Utara Sulawesi, indikasi kuatnya rezim ekstensional lokal dengan arah regangan (σ_3) NE–SW ini menunjukkan keselarasan (compatibility) dengan fenomena tektonik ekstensional yang bekerja secara regional pada era Neogen hingga Pleistosen. Deformasi getas (brittle deformation) di daerah Dulamayo diinterpretasikan sebagai manifestasi langsung dari aktivitas peregangan kerak yang berasosiasi erat dengan fase pembukaan Cekungan Gorontalo (Gorontalo Basin Opening) di bagian selatan, serta dinamika penyesuaian gaya akibat penunjaman subduksi (trench rollback) di perairan Sulawesi Utara.



Gambar 5 Peta Struktur Pada Daerah Penelitian

4. KESIMPULAN

Berdasarkan integrasi analisis makroskopis dan mesoskopis di daerah Dulamayo Selatan dan sekitarnya, dapat disimpulkan bahwa morfologi kawasan ini dikontrol secara kuat oleh struktur geologi berupa kelurusan morfotektonik dominan berarah Barat Laut – Tenggara (NW–SE, 311°) dan Utara Barat Laut – Selatan Tenggara (NNW–SSE, 348°). Hasil rekonstruksi kinematika stereografis pada struktur kekar gerus berpasangan (conjugate shear joints) menghasilkan orientasi vektor tegasan penekanan maksimum (σ_1) berkedudukan vertikal murni hingga sub-vertikal (85° – 87°), tegasan menengah (σ_2) sub-horizontal berarah NW–SE, dan tegasan tarikan minimum (σ_3) horizontal murni berarah Timur Laut – Barat Daya (NE–SW).

Geometri tegasan dengan σ_1 vertikal tersebut mengonfirmasi secara kuantitatif bahwa massa batuan di daerah penelitian mengalami deformasi getas (brittle deformation) di bawah kendali Rezim Tektonik Ekstensional Lokal (normal faulting environment). Karakteristik deformasi lokal yang menghasilkan sesar normal dan himpunan rekahan ekstensi ini menunjukkan keselarasan dengan kerangka tektonik regional Lengan Utara Sulawesi pada era Neogen hingga Pleistosen, yang dipengaruhi oleh aktivitas peregangan kerak (crustal extension).

Kekurangan dan Limitasi Penelitian Pelaksanaan studi geologi struktur di daerah penelitian dihadapkan pada sejumlah tantangan dan keterbatasan data yang dipengaruhi oleh kondisi iklim tropis. Tingginya tingkat pelapukan batuan (weathering grade) serta tutupan vegetasi yang sangat lebat menyebabkan ketersediaan singkapan batuan segar di lapangan menjadi sangat minimum. Hal ini berdampak langsung pada sangat terbatasnya penemuan indikator struktur primer (orde pertama), seperti bidang sesar utama dan jejak pergeseran berupa gores-garis (slickenlines atau striations) yang ideal untuk analisis tegasan. Sebagai akibat dari minimnya data gores-garis sesar tersebut, penelitian ini tidak dapat mengaplikasikan kalkulasi inversi paleostress secara absolut. Interpretasi rezim tektonik sepenuhnya bersandar pada pendekatan pragmatis melalui pengukuran struktur sekunder berskala

mesoskopik, yang didominasi oleh kekar tarik (extension joints) dan beberapa pasang kekar gerus, yang kemudian diintegrasikan dengan data kelurusan dari citra penginderaan jauh (DEMNAS).

DAFTAR PUSTAKA

- Angelier, J. (1994). Fault slip analysis and paleostress reconstruction. Dalam P. L. Hancock (Ed.), *Continental Deformation* (hlm. 53–100). Pergamon Press
- Advokaat, E. L., Hall, R., White, L. T., et al. (2017). Miocene to Recent extension in NW Sulawesi, Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*.
- Anderson, E. M. (1951). *The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain* (2nd ed.). Oliver and Boyd.
- Angelier, J. (1994). Fault slip analysis and paleostress reconstruction. Dalam P. L. Hancock (Ed.), *Continental Deformation* (hlm. 53–100). Pergamon Press.
- Bachri, S., Sukido, & Ratman, N. (1993). *Geologi Lembar Tilamuta, Sulawesi Skala 1:250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung.
- Bachri, S. (2006). Stratigrafi Lajur Volkano-Plutonik Daerah Gorontalo, Sulawesi. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*.
- Bachri, S. (2011). Structural Pattern And Stress System Evolution During Neogene - Pleistocene Times In The Central Part Of The North Arm of Sulawesi. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*.
- Billings, M. P. (1972). *Structural geology* (3rd ed.). Prentice-Hall.
- Brahmantyo, B., & Bandono. (2006). Klasifikasi bentuk muka bumi untuk pemetaan Geomorfologi pada skala 1:25.000 dan aplikasinya untuk penataan ruang. *Geoaplika*.
- Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Petit, C., Levi, K., Miroshnichenko, A., Ruzhitch, V., & San'kov, V. (1997). Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part II. Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282(1–4), 1–38.
- Delvaux, D., & Sperner, B. (2003). New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. Dalam D. Nieuwland (Ed.), *New Insights into Structural Interpretation and Modelling* (Geological Society, London, Special Publications Vol. 212, hlm. 75–100). Geological Society of London.
- Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. Cambridge University Press.
- Hall, R., & Wilson, M. E. J. (2000). Neogene Sutures in Eastern Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*.
- Handyarso, A., Permana, H., Hanafi, M., et al. (2023). Extensional Tectonic Investigation Based on Gravity and Magnetic Data Analysis in the Gulf of Tomini, Indonesia. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*.
- Pholbud, P., Hall, R., & Advokaat, E. (2012). A New Interpretation of Gorontalo Bay, Sulawesi. *Proceeding, Indonesian Petroleum Association 36th Annual Convention & Exhibition*.
- Pollard, D. D., & Aydin, A. (1988). Progress in understanding jointing over the past century. *Geological Society of America Bulletin*.
- Rickard, M. J. (1972). Fault classification: Discussion. *Geological Society of America Bulletin*, 83(8), 2545–2546.
- Twiss, R. J., & Moores, E. M. (2007). *Structural geology* (2nd ed.). W. H. Freeman and Company.
- van Bemmelen, R. W. (1949). *The Geology Of Indonesia*. Government Printing Office, The Hague.
- van Leeuwen, T. M., & Muhardjo. (2005). Stratigraphy and tectonic setting of the Cretaceous and Paleogene volcanic-sedimentary successions in northwest Sulawesi, Indonesia: Implications for the Cenozoic evolution of Western and Northern Sulawesi. *Journal of Asian Earth Sciences*.