



Geologi dan Rezim Tektonik terhadap Evolusi Lengan Utara Sulawesi: Studi Kasus Sungai Alo, Gorontalo

Naafi' Syahna Firdhaus Biya^a, Aang Panji Permana^{b*}, Muhammad Kasim^c

^{abc}program Studi Teknik Geologi, Universitas Negeri Gorontalo, Gorontalo, Indonesia

*email: aang@ung.ac.id

ARTICLE INFO

Sejarah artikel:

Diterima :25 Juli 2025

Direvisi : 23 Oktober 2025

Dipublish : 31 Desember 2025

Keywords: Struktur Geologi, Tektonik, Transtension, Lengan Utara Sulawesi

How to cite this article: Biya, N. S. F., Permana, A. P., Kasim, M. (2025). Geologi dan Rezim Tektonik terhadap Evolusi Lengan Utara Sulawesi: Studi Kasus Sungai Alo, Gorontalo. *Journal of Applied Geoscience and Engineering*, 4(2), 108-116. <https://doi.org/10.34312/jage.v4i2.v4i2.31881>

ABSTRACT

This study investigates the tectonic control on the development of geological structures along the Alo River in Tibawa District, Gorontalo Regency, Gorontalo Province. The research was conducted through geological mapping, structural analysis, and petrographic examination of basalt rock samples. The area is characterized by two major geomorphological units: structural hills and floodplains. Stratigraphically, it comprises basalt units—correlated with the Bilungala Volcanic Formation—and alluvial deposits. Structural analysis reveals two orders of joint structures with dominant orientations of NW–SE and N–S, interpreted as the result of multiple tectonic episodes. Petrographic analysis shows porphyritic and intergranular textures with plagioclase, pyroxene, and minor olivine as dominant minerals. Tectonic stress analysis using Win_Tensor software indicates transtensional regimes characterized by normal faulting and strike-slip faults with extensional components. These structures are associated with tectonic evolution in the North Arm of Sulawesi, transitioning from compressional to oblique-extensional settings during the Late Miocene–Pliocene due to changes in subduction geometry and microblock interactions. This ongoing tectonic activity has implications for regional geological mapping and natural resource management in Gorontalo.

1. PENGANTAR

Gorontalo merupakan salah satu provinsi di Indonesia yang memiliki kekayaan geologi yang signifikan. Struktur geologi di Gorontalo dipengaruhi oleh aktifitas tektonik kompleks yang melibatkan interaksi antara Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik. Aktifitas ini menghasilkan berbagai formasi geologi yang beragam, termasuk pegunungan, sesar, lembah serta potensi sumber daya mineral yang berharga (Hall, 2002; Silver et al., 1983; Katili, 1970).

Studi mengenai struktur geologi di Gorontalo sangat penting untuk memahami sejarah geologis kawasan ini dan untuk memetakan potensi sumber daya alamnya. Selain itu, pengetahuan tentang struktur geologi dapat membantu dalam mitigasi bencana alam seperti gempa bumi dan tanah longsor yang sering terjadi di daerah ini. Pemahaman yang mendalam tentang struktur geologi Gorontalo juga dapat memberikan wawasan untuk pengelolaan lingkungan dan perencanaan pembangunan yang berkelanjutan (Hamilton, 1979; Bellier & Sébrier, 1995; McCaffrey, 2009).

Studi mengenai struktur geologi di Gorontalo sangat penting untuk memahami sejarah geologis kawasan ini dan untuk memetakan potensi sumber daya alamnya. Gorontalo memiliki sejarah tektonik yang kompleks, dengan bukti-bukti geologis yang mencerminkan aktivitas tektonik yang intens. Salah satu daerah yang menarik untuk dikaji dalam konteks ini adalah Sungai Alo, yang

berpotensi menjadi studi kasus yang menarik untuk memahami bagaimana evolusi tektonik telah membentuk struktur geologi di wilayah ini.

Sungai Alo terletak di Kabupaten Gorontalo dan merupakan salah satu sungai utama di provinsi Gorontalo. Sungai ini memiliki panjang aliran yang cukup signifikan dan melintasi berbagai jenis formasi geologi. Melalui studi kasus Sungai Alo, kita dapat mengidentifikasi berbagai karakteristik geologi yang terbentuk akibat proses tektonik, termasuk lipatan, sesar, dan struktur geologi lainnya. Dengan demikian, pemahaman yang mendalam tentang struktur geologi di sepanjang Sungai Alo dapat memberikan kontribusi yang berharga bagi pemetaan geologi regional dan pengelolaan sumber daya alam di wilayah Gorontalo.

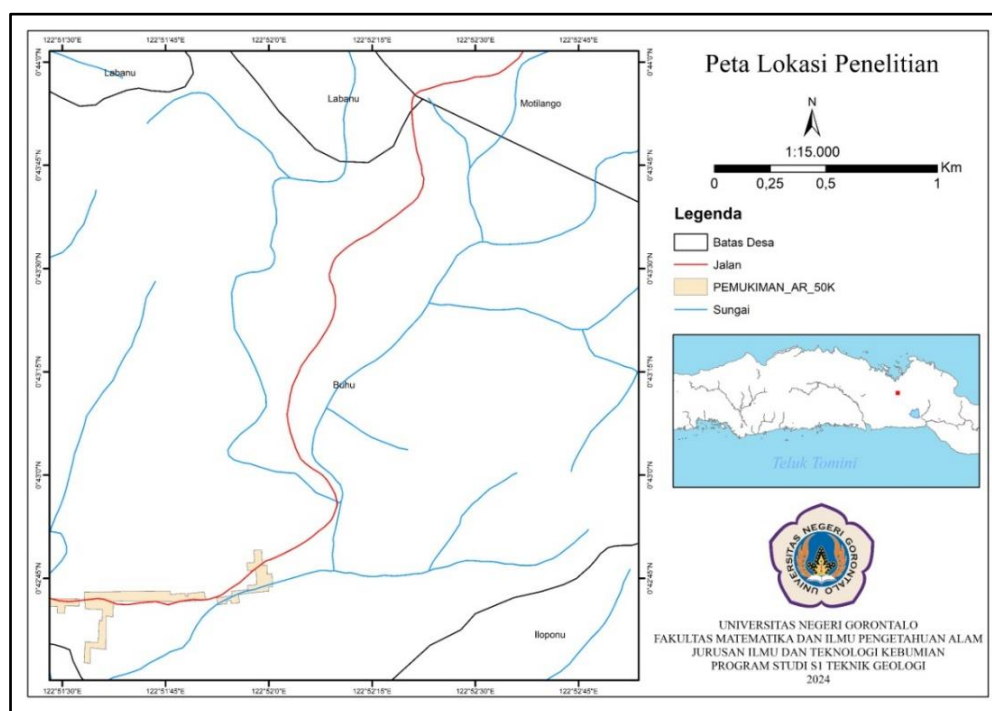
2. METODE

Fokus pada penelitian ini adalah pemetaan struktur geologi yang terdapat di Sungai Alo, Desa Buhu, Kecamatan Tibawa, Kabupaten Gorontalo, provinsi Gorontalo (Gambar 1). Secara keseluruhan penelitian, diambil 2 stasiun untuk dilakukan pengamatan dan pengukuran struktur geologi dan 2 sampel batuan yang ditemukan pada lokasi penelitian akan digunakan untuk dilakukan pengamatan petrografi.

Pemetaan geologi dilakukan dengan melakukan pengamatan geomorfologi, yang dilakukan dengan mengamati kenampakan lapangan meliputi bentuk bukit, lembah serta stadia sungai. Pada tahapan pemetaan juga dilengkapi dengan data ketinggian serta kemiringan lereng yang diambil dari citra SRTM, didapatkan dengan mengunduh DEMNAS melalui situs Ina-Geoportal yang dapat diakses melalui tanahair.indonesia.go.id.

Analisis petrografi dilakukan terhadap 2 sampel batuan yang kemudian dipreparasi menjadi sayatan tipis batuan. Tahapan ini dilakukan dengan untuk mengamati komposisi mineral pada batuan untuk menentukan nama petrografis batuan menurut klasifikasi Travis (1955). Tahapan ini dilakukan di Laboratorium Petrografi John Ario Katili Program Studi Teknik Geologi, Universitas Negeri Gorontalo.

Analisis struktur geologi dilakukan terhadap data struktur geologi berupa kekar yang ditrmukan pada lokasi penelitian. Pengukuran struktur geologi dilakukan pada stasiun ST1 dan ST4 di lokasi penelitian. Hasil pengukuran struktur geologi tersebut kemudian diolah menggunakan perangkat lunak Win_Tensor v5.9.2 yang dikembangkan oleh Damien Delvaux, seorang ahli geologi pada bidang geodinamik, tektonik, sismotektonik dan sistem minyak bumi di Central Museum for Central Africa, Belgia.

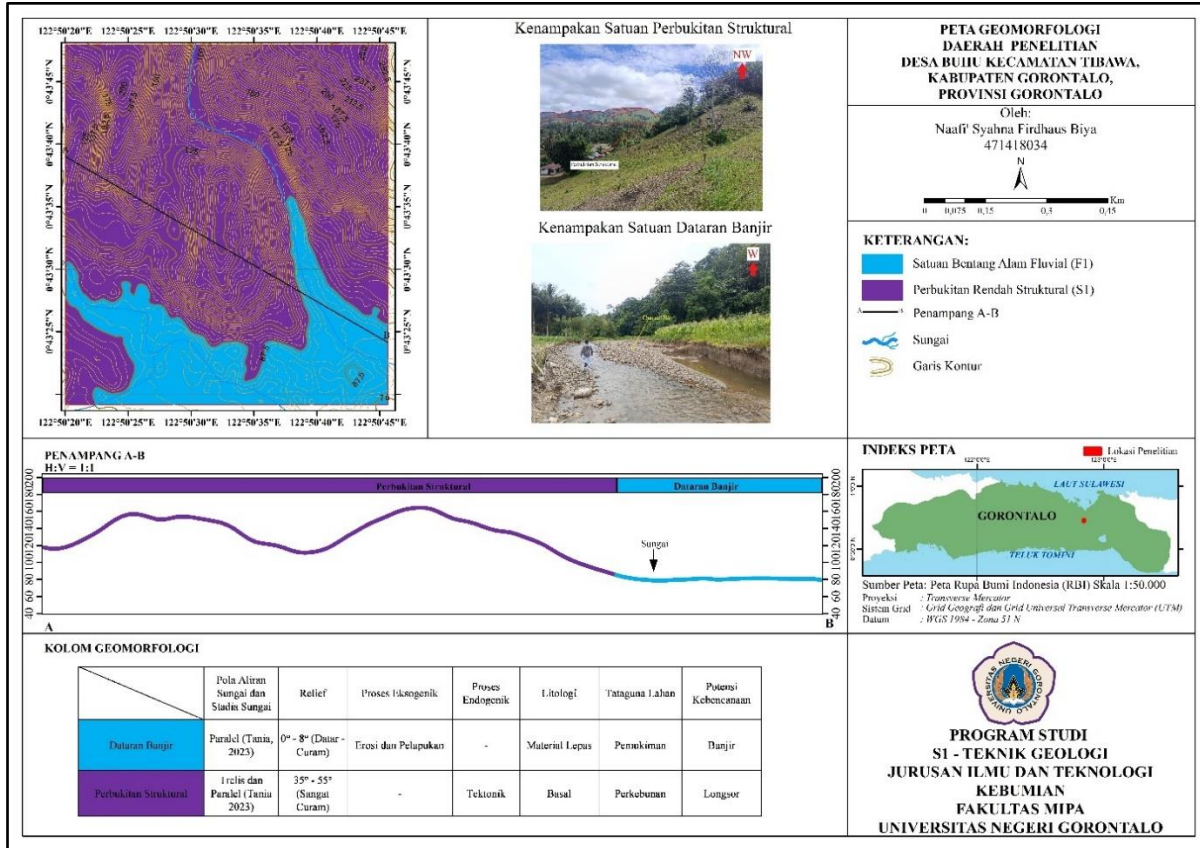


Gambar 1. Peta lokasi penelitian

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Geomorfologi

Penentuan satuan geomorfologi dilakukan menggunakan klasifikasi Bentuk Muka Bumi (Brahmantyo dan Bandonu, 2006) yang mengacu pada morfografi, morfometri, dan morfogenesis sehingga pada daerah penelitian ditemukan satuan perbukitan struktural dan satuan dataran banjir (Gambar 2).



Gambar 2. Peta Geomorfologi Daerah Penelitian



Gambar 3. Singkapan basalt pada ST1

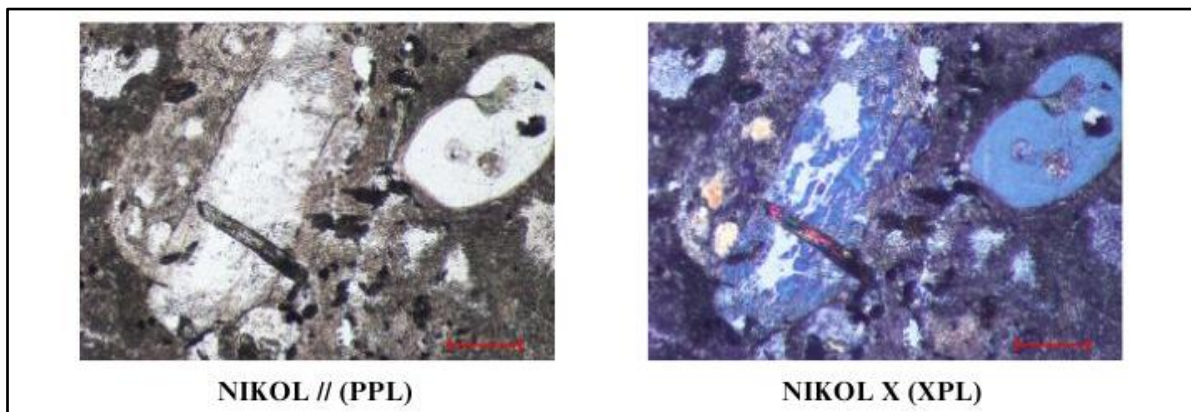
3.2. Geologi Daerah Penelitian

Hasil pengamatan terhadap sampel batuan basalt, ditemukan bahwa satuan basalt pada daerah penelitian memiliki ciri megaskopis berwarna abu-abu dengan tekstur afanitik dan struktur rekahan (Gambar 3). Secara petrografis, Pada sampel batuan yang ditemukan pada stasiun ST1, batuan menunjukkan adanya tekstur porifiritik dengan fenokris berupa plagioklas dan piroksen yang ditemukan pada massa dasar mikrokristalin pada pengamatan nikol sejajar (PPL). Sementara pada hasil pengamatan nikol silang (XPL) mineral plagioklas menunjukkan kembaran Karlsbad-Albit, sementara piroksen menunjukkan habit prisma dengan tepi yang mengalami alterasi (Gambar 4).

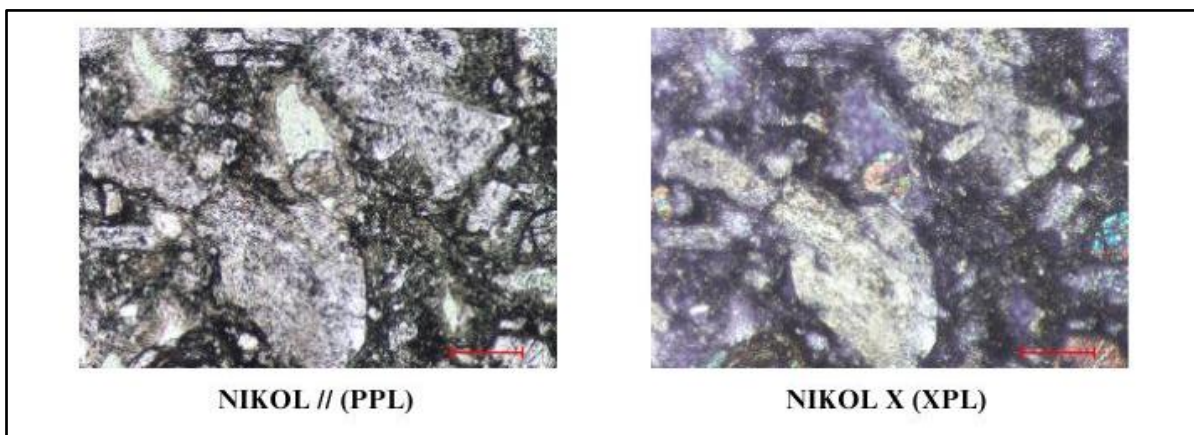
Pada sampel batuan basalt yang ditemukan pada stasiun ST3, batuan menunjukkan tekstur intragranular dengan mineral teramati berupa plagioklas, piroksen, dan sedikit olivin. Pada pengamatan nikol silang (XPL) ditemukan bahwa mineral plagioklas memiliki habit tabular dengan struktur kembaran, sedangkan piroksen menunjukkan warna interferensi warna yang tinggi (Gambar 5).

Satuan ini disetarakan dengan formasi Batuan Gunungapi Bilungala yang berumur Miosen Tengah – Miosen (Bachri dkk, 1994). Diperkirakan satuan ini terbentuk pada 11,6 – 5,5 juta tahun yang lalu (Trail dkk, 1974).

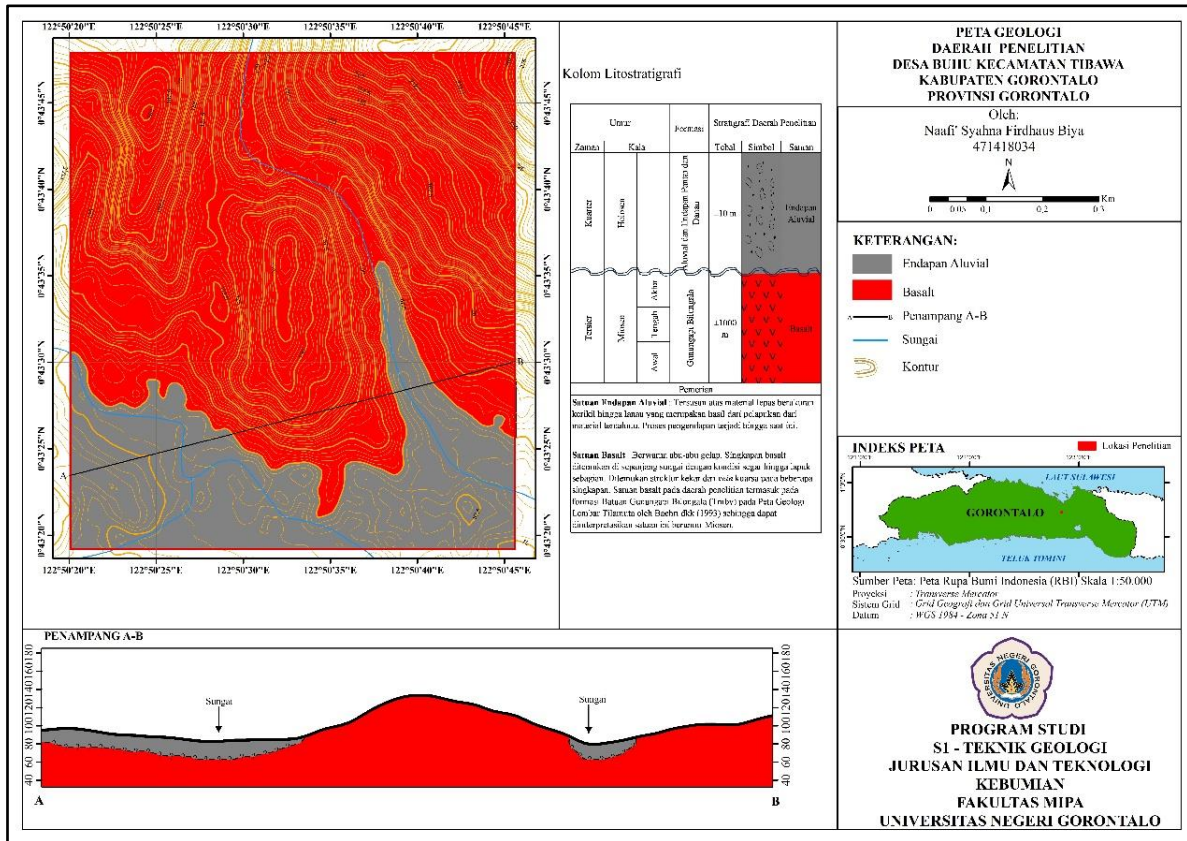
Pada daerah penelitian ditemukan satuan basalt dan satuan aluvial. Satuan aluvial terdiri atas material lepas berukuran bongkah hingga pasir hasil erosi dari batuan asal yang mengalami sedimentasi di channel bar, point bar dan dasar sungai (Gambar 6).



Gambar 4. Sayatan tipis batuan basalt pada ST1



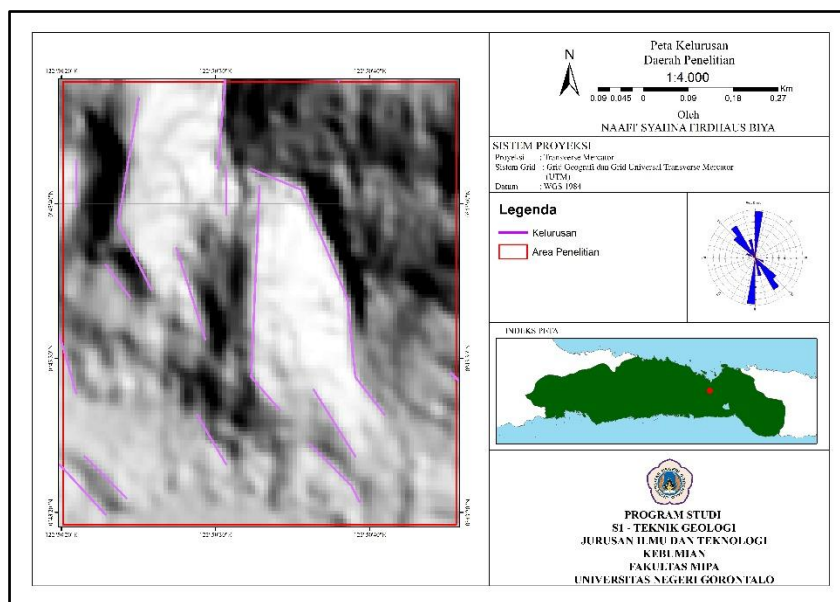
Gambar 5. Sayatan tipis batuan basalt pada ST3



Gambar 6. Peta geologi daerah penelitian

3.3. Struktur Geologi

Struktur geologi yang ditemukan pada daerah penelitian memiliki arah utama Utara – Selatan dan Barat Laut – Tenggara (Gambar 7). Berdasarkan pengamatan lapangan, terdapat 2 orde struktur yang terbentuk pada masa yang berbeda. Kedua struktur ini memiliki arah umum dan tegasan yang berbeda pula. Berikut adalah penjelasan mengenai pengukuran struktur yang ditemukan pada ST1, dimana penjelasan mengenai *stress regime* dan *stress ratio* akan dibahas pada sub bab berikutnya.



Gambar 7. Peta kelurusan daerah penelitian

Kekar yang ditemukan pada ST1 memiliki sudut antar kekar yang lebih besar dari 45°, sehingga diinterpretasikan bahwa kedua struktur yang ditemukan terbentuk pada masa yang berbeda pula. Terlihat juga pada beberapa tempat bahwa struktur orde pertama yang lebih tua dipotong oleh struktur yang lebih muda hingga mengalami pergeseran, sehingga jika merujuk pada hukum cross-cutting relationship, struktur tersebut terbentuk pada masa yang berbeda, sehingga pengolahan data struktur geologi pada ST1 akan diolah secara terpisah antara orde 1 dan orde 2.

3.4. Rezim Tektonik

Stress ratio (R) merupakan jarak relatif dari σ_2 terhadap σ_1 atau σ_3 yang diekspresikan dalam persamaan $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$, dimana σ_1 merupakan tegasan utama maksimum, σ_2 merupakan tegasan utama menengah, dan σ_3 merupakan tegasan utama minimum (Angelier, 1990). Delvaux (2003) menjelaskan bahwa stress index (R') menggabungkan orientasi sumbu tegasan vertikal dan nilai stress ratio (R) menjadi suatu skala numerik dengan nilai 0 – 3 (Gambar 8). Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai R':

Jika σ_1 vertikal (Sesar Normal/Ekstensional), maka $R' = R$ (1)

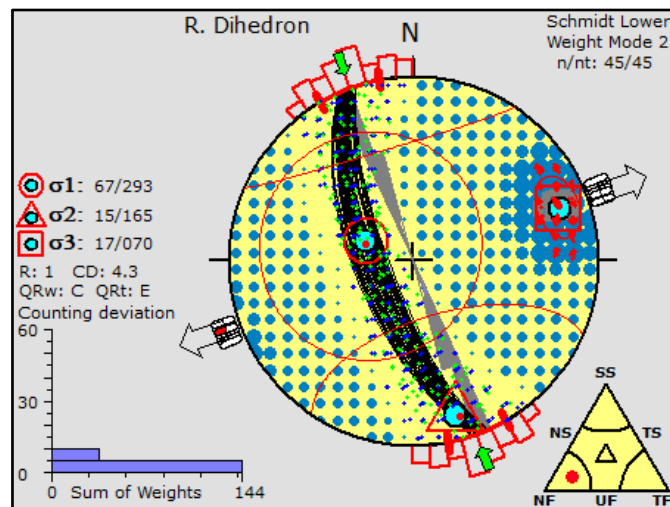
Jika σ_2 vertikal (Sesar Geser/Strike-slip), maka $R' = 2 - R$ (2)

Jika σ_3 vertikal (Sesar Naik/Kompresional), maka $R' = 2 + R$ (3)

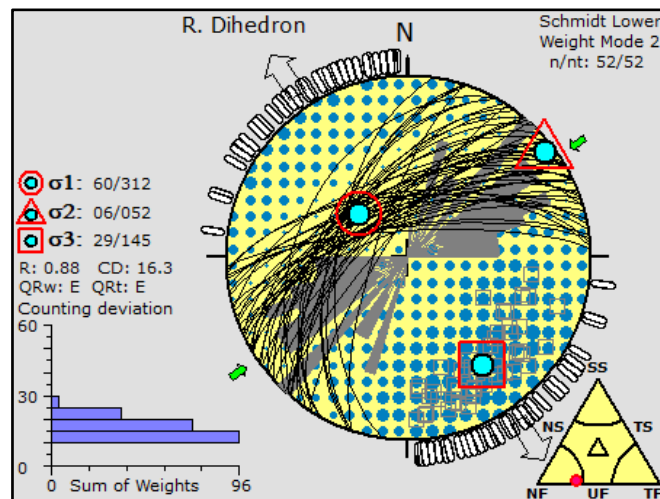
Gambar 8 menunjukkan hasil analisis R. Dihedron dari struktur geologi yang ditemukan pada ST4 dan ST1 orde 1, secara berurutan. Pada kedua gambar tersebut dapat dilihat bahwa σ_1 vertikal terhadap σ_2 dan σ_3 , sehingga dapat disimpulkan struktur yang terdapat pada kedua stasiun merupakan hasil dari sesar normal/gaya ekstensional. Jika diklasifikasikan dalam analisis stress ratio oleh Delvaux, kedua struktur termasuk pada stress regime Transtensive (Gambar 9 & 10).

Stress tensor type	EXTENSIVE				STRIKE-SLIP				COMPRESSIVE				
Stress symbols													
Stress ratio R	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	0.75	0.5	0.25	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
Stress regime	Radial EXTENSIVE		Pure EXTENSIVE		TRANS-TENSIVE		Pure STRIKE-SLIP		TRANS-PRESSIVE		Pure COMPRESSIVE		Radial COMPRESSIVE
Stress index R'	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00
Determination of R'	R' = R				R' = 2 - R				R' = 2 + R				

Gambar 8. Hubungan antara stress ratio (R) dan stress index (R') (Delvaux, 2003)



Gambar 9. Hasil analisis R. Dihedron dari struktur geologi orde 1 pada ST1



Gambar 10. Hasil analisis *R. Dihedron* dari struktur geologi orde 2 pada ST1

Hal ini terjadi akibat transisi tektonik yang bekerja di Lengan Utara Sulawesi pada Miosen Akhir – Pliosen. Pada saat itu, terjadi perubahan rezim tektonik yang awalnya berupa kompresional menuju rezim yang lebih oblique-ekstensif. Proses ini diawali dengan pergeseran geometri subduksi di sekitar Palung Sulawesi Utara yang dipicu oleh interaksi antara Busur Sangihe dan Halmahera di Laut Maluku (Hall, 2002; Hall dan Wilson, 2000). Pada fase ini, zona sesar berarah barat-timur hingga baratlaut-tenggara mulai teraktifkan sebagai sesar transtensional yang pada beberapa tempat menghasilkan pull-apart basin (Hall, 2002). Pada masa ini, wilayah lengan Utara Sulawesi mengalami rotasi mikroblok secara lokal dan regional yang memunculkan domain-domain kecil yang bergerak relatif satu sama lain (Walpersdorf dkk, 1998) yang menyebabkan sesar-sesar normal miring terbentuk secara oblique, atau sesar kompresional lama beralih fungsi menjadi sesar geser oblique (Bellier dkk, 2001). Tekanan oblique dan pemanjangan kerak turut berperan dalam pembentukan cekungansedimentasi baru di beberapa lokasi, sejalan dengan penyesuaian morfologi pada Lengan Utara Sulawesi, terutama terbentuknya pola kelurusan yang menunjukkan sistem sesar normal miring berasosiasi dengan sesar mendatar oblique (Hall, 2002).

Sejak masa Pliosen, konvergensi oblique di sepanjang Palung Sulawesi Utara berlangsung semakin intensif. Komponen Strike-slip yang besar memicu perkembangan sesar-sesar mendatar utama di Sulawesi, dimana beberapa diantaranya mengalami ekstensional di step-over (Hall, 2002; Hall dan Wilson, 2000). Struktur strike-slip aktif dapat mengalami transtensional apabila jalurnya mengalami bending atau memiliki overstep. Di area yang mengalami bending ini terjadi pemekaran sehingga terbentuk pull-apart basin atau graben lokal. Rezim tegasan yang diperlihatkan pada Gambar 7 (σ_2 vertikal, $R \approx 1$) sejalan dengan kondisi strike-slip yang disertai komponen ekstensional yang menjadi ciri khas dari zona transtensional (Delvaux dan Sperner, 2003). Lengan Utara Sulawesi tersusun atas blok-blok tektonik yang dapat berotasi akibat pergerakan mendatar. Rotasi ini kerap disertai dengan rekahan/retakan normal yang berarah miring terhadap sesar utama (Hall dan Wilson, 2000). Data GPS menunjukkan bahwa beberapa sesar mendatar di Sulawesi masih Aktif (Hall, 2002; Bellier et al, 2001). Aktivitas tektonik ini terus membentuk dan memperbarui struktur-struktur oblique di Lengan Utara Sulawesi, yang tampak pada Gambar 8 yang menunjukkan rezim strike-slip dengan komponen ekstensional. Khusus di Lengan Utara Sulawesi, transtensional strike-slip menjadi dominan karena aktifitas penunjaman miring (oblique subduction) dan interaksi antar mikroblok (Hall, 2002).

4. KESIMPULAN

Daerah penelitian terdiri atas dua satuan geomorfologi utama, yaitu satuan perbukitan struktural dan satuan dataran banjir. Satuan perbukitan struktural memiliki lereng yang curam hingga sangat curam, sedangkan satuan dataran banjir memiliki morfologi yang lebih datar.

Stratigrafi daerah penelitian terdiri atas dua satuan, yaitu satuan basalt dan satuan endapan aluvial. Satuan basalt menempati sekitar 75% wilayah penelitian dengan ketebalan yang diinterpretasikan sedalam ± 1000 meter. Satuan basalt disetarakan dengan formasi Gunungapi Bilungala pada Peta Geologi lembar Tilamuta. Satuan endapan aluvial merupakan sedimentasi hasil pelapukan dari batuan asal. Satuan ini terdiri atas material lepas yang berukuran pasir hingga bongkah. Satuan ini menempati sekitar 25% wilayah penelitian.

Struktur geologi yang berkembang di daerah penelitian meliputi tensional joint dan extensional joint yang menunjukkan adanya pengaruh dari gaya ekstensional. Analisis menggunakan stereonet menunjukkan pola tegasan utama memiliki arah umum Barat Laut – Tenggara dan Utara – Selatan. Struktur yang terbentuk pada Miosen - Pliosen menunjukkan rezim tektonik transtensional akibat perubahan gaya tektonik dari kompresional menuju oblique-ekstensif di Lengan Utara Sulawesi. Sejak Pliosen hingga saat ini, aktivitas tektonik masih berlangsung dengan dominasi sesar mendatar berkomponen ekstensional akibat interaksi mikroblok dan penunjaman miring di Palung Sulawesi Utara.

5. REFERENSI

- Angelier, J. 1990. Inversion of Field Data in Fault Tectonics to Obtain The Regional Stress – III. A New Rapid Direct Inversion Method by Analytical Means. *Geophysical Journal International*. 100(2), 363-376.
- Bachri, S., Sukindo, dan Ratman N. 1993. Peta Geologi Lembar Tilamuta, Sulawesi skala 1:250.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung.
- Bellier, O., et al. (2001). High slip rate for a low seismicity along the Palu-Koro active fault in central Sulawesi (Indonesia). *Terra Nova*, 13(6), 463–470.
- Bellier, O., & Sébrier, M. (1995). Relationship Between Tectonism and Volcanism Along the Great Sumatran Fault Zone Deduced by SPOT Image Analyses. *Tectonophysics*, 241(3-4), 331-350.
- Brahmantyo, B, dan Bandono. 2006. Klasifikasi Bentuk Muka Bumi (Landform) untuk Pemetaan Geomorfologi pada Skala 1:25.000 dan Aplikasinya Untuk Penataan Ruang. *Jurnal Geoaplika*. 1, 71-78.
- Delvaux, D. & Sperner, B. (2003). New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. In D. Nieuwland (Ed.), *New insights into structural interpretation and modelling* (Geological Society, London, Special Publications 212, pp. 75–100).
- Hall, R. dan Wilson, M.E. J. 2000. Neogene Sutures in Eastern Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*. 18 (6): 781-800.
- Hall, R. (2002). Cenozoic Geological and Plate Tectonic Evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-Based Reconstructions, Model and Animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(4), 353-434.
- Hamilton, W. (1979). Tectonics of the Indonesian Region. U.S. Geological Survey Professional Paper 1078.

-
- Katili, J.A. (1970). Large-Scale Geological Features of Indonesia and Their Relationships to Plate Tectonics. *Journal of Geophysical Research*, 75(32), 5725-5741.
- McCaffrey, R. (2009). The Tectonic Framework of the Sumatran Subduction Zone. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37, 345-366.
- Russel, T. B. (1955). Classification Of Rocks. *Colorado School Of Mines. United State Of America*.
- Silver, E.A., Reed, D.L., & McCaffrey, R. (1983). Back Arc Thrusting in the Eastern Sunda Arc, Indonesia: A Consequence of Arc-Continent Collision. *Journal of Geophysical Research*, 88(B9), 7429-7448.
- Trail, D, S., John, T, U., Bird, M, C., Obial, R, C., Pertzal, B, A., Abiog, D, B., Partowo, S. 1974. The General Geological Survey fo Block 2 , Sulawesi Utara, Indonesia. Endeavour Oil City (Unpublished).
- Walpersdorf, A., et al. (1998). GPS compared to long-term geologic motion of the north arm of Sulawesi. *Earth and Planetary Science Letters*, 159(1–2), 47–55.