



TEKTONIK GEOMORFOLOGI SESAR-SESAR YANG DIDUGA AKTIF DI DAERAH HILIR SUNGAI BONE, GORONTALO

F. Masulili^{1*}, A. E. P. Djaya², J. L. Walukow², R. Y. Bolung², N. A. Gafur³

¹Departemen Teknik Geologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Prisma, Manado, Sulawesi Utara.

²Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Prisma, Manado, Sulawesi Utara.

³Pusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Tangerang Selatan, Indonesia.

Corresponding author: e-mail: febryant.geo@hotmail.com

ABSTRACT

The lower reaches of the Bone River serve as the focal point for governmental, economic, and residential activities within the Gorontalo Province. Situated within the tectonically and seismically dynamic North Arm of Sulawesi, this area is notably impacted by both the Sangihe Thrust to the east and the Sulawesi Thrust to the north. Despite this geological influence, there remains a dearth of information regarding active faults crucial for effective disaster mitigation strategies. Our study marks the inaugural effort to delineate active faults encircling the lower reaches of the Bone River, utilizing interpretations derived from Morphometric Protection Index Red Relief Image Maps (MPI-RRIM). This assessment reveals the presence of the Pancuran and Bondawuna normal faults on the southern periphery, exhibiting discernible indications of Quaternary activity, in contrast to the Lombongo normal fault on the northern side. Considering the empirical correlation between moment magnitude and surface rupture length, these faults demonstrate the potential to trigger an earthquake measuring 6.3 ~ 6.7 Mw. Furthermore, our investigation indicates that the recurring inundations in this vicinity are not solely a consequence of climatic factors and urban expansion but are intricately linked to tectonic processes. Understanding the existence and behavior of active faults assumes paramount importance, not only for enhancing public awareness concerning hazards but also as fundamental data for formulating regional development strategies.

Keywords: Tectonic Geomorphology, Active Faults, Potential Earthquake, Bone River Inundation

ABSTRAK

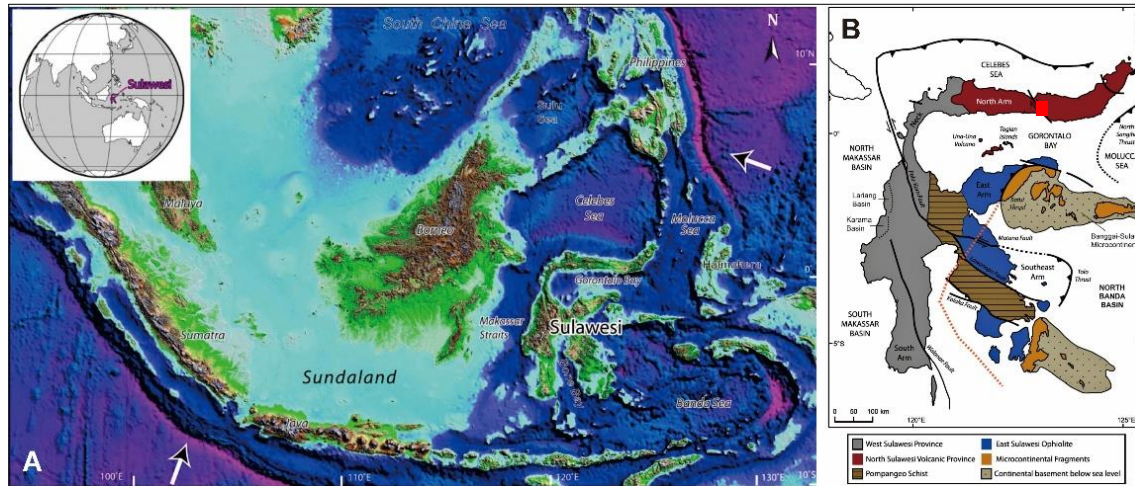
Daerah hilir Sungai Bone merupakan pusat pemerintahan, perekonomian, dan juga pemukiman di Provinsi Gorontalo. Daerah ini terletak di Lengan Utara Sulawesi yang aktif secara tektonik maupun seismik dan dipengaruhi langsung oleh Tunjaman Sangihe di bagian timur dan Tunjaman Sulawesi di bagian utara. Namun, informasi terkait sesar aktif dalam upaya mitigasi bencana masih sangat minim. Untuk pertama kalinya, kami telah memetakan sesar-sesar aktif yang ada di sekitar hilir Sungai Bone berdasarkan interpretasi *morphometric protection index red relief image map* (MPI-RRIM). Sesar normal Pancuran dan sesar normal Bondawuna di sisi selatan menunjukkan bukti aktifitas kuarter, dibandingkan dengan sesar normal Lombongo yang ada di sisi utara. Berdasarkan hubungan empiris antara momen magnitudo dan panjang retakan permukaan, sesar-sesar ini berpotensi menghasilkan gempabumi sebesar 6.3 ~ 6.7 Mw. Selain itu, penelitian kami menemukan bahwa bencana banjir yang sering menimpa daerah ini tidak hanya dipengaruhi oleh iklim dan urbanisasi, tetapi juga dikontrol oleh aktifitas tektonik. Pemahaman tentang sesar aktif sangat penting dalam meningkatkan edukasi masyarakat terkait kebencanaan, dan juga sebagai informasi dasar dalam perencanaan pembangunan wilayah.

Kata kunci: Tektonik Geomorfologi, Sesar Aktif, Potensi Gempa, Banjir Sungai Bone

PENDAHULUAN

Sulawesi (Gambar 1a) terletak di bagian timur Indonesia dalam tatanan tektonik lempeng yang sangat kompleks dan dinamis yang terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik

utama - lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia, dan lempeng samudera Pasifik. Sebagai hasil dari interaksi lempeng, pulau ini membentuk sistem yang kompleks dari subduksi, backarc-thrusting, ekstensional, dan zona transformasi ^[1].



Gambar 1. (A) Peta lokasi Pulau Sulawesi; arah Gerakan lempeng-lempeng utama relatif terhadap Sundaland^[2]. (B) Satuan geologi dan sesar-sesar utama di Pulau Sulawesi^[3]. Box merah menandakan lokasi penelitian.

Daerah hilir Sungai Bone merupakan pusat pemerintahan, perekonomian, dan juga pemukiman di Provinsi Gorontalo. Daerah ini terletak di Lengan Utara Sulawesi (Gambar 1b) yang aktif secara tektonik maupun seismik dan dipengaruhi langsung oleh Tunjaman Sangihe di bagian timur dan Tunjaman Sulawesi di bagian utara^{[4][6]}. Watkinson dan Hall^[7] telah memetakan sesar Kuartar di Lengan Utara Sulawesi dengan menginterpretasikan data SRTM dan ASTER, dan Pusat Penelitian Gempa Nasional juga telah mempublikasikan peta sumber dan bahaya gempa di Indonesia^[8]. Namun, kedua studi tersebut tidak menunjukkan secara rinci jejak sesar aktif dan tidak membahas bukti morfologi tektonik. Langkah awal dalam upaya mitigasi bencana seismik di hilir Sungai Bone, memerlukan peta sesar-sesar aktif yang detail.

Penelitian ini bertujuan untuk memetakan sesar aktif dan mempelajari potensi bencana seismik daerah hilir Sungai Bone berdasarkan interpretasi penginderaan jarak jauh. Penelitian ini menjelaskan secara singkat terkait tektonik geomorfologi, geometri, posisi, dan panjang dari sesar-sesar yang terpetakan, dan menjadi data dasar dari analisis dan estimasi bencana seismik dan bencana lainnya di daerah penelitian.

METODE

Dalam penelitian ini kami melakukan analisis tektonik geomorfologi berdasarkan interpretasi MPI-RRIM^[9] yang diturunkan dari data DEMNAS yang memiliki resolusi spasial ~8.3 meter. MPI-RRIM adalah sebuah peta yang merepresentasikan parameter topografi seperti elevasi, kemiringan lereng, dan konveksitas secara simultan sehingga sangat efektif dalam mengenali fitur-fitur morfologi tektonik yang berukuran kecil. Peta ini dibuat dengan menggunakan software QGIS v.3.32.2 dan Kalkulator MPI-RRIM^[9].

Sesar-sesar dibedakan berdasarkan kriteria yang digunakan dalam sistem pemetaan sesar aktif di Jepang^[10]. Dua kategori sesar yang digunakan adalah: sesar aktif dan sesar yang diduga aktif. Dikatakan aktif jika sesar tersebut memotong endapan batuan atau morfologi yang berumur Kuartar, sedangkan sesar yang diduga aktif tidak menunjukkan bukti yang jelas terkait deformasi Kuartar.

Sesar aktif dapat diidentifikasi berdasarkan fitur-fitur morfologi tektonik seperti: gawir sesar, kipas aluvial, faset segitiga/segiempat, longsor, sadel sesar, kelurusan punggung bukit, kelurusan lembah, dan pembelokan sungai^[11]. Geometri sesar (strike/dip) dapat diinterpretasi dari posisi faset segitiga/segiempat dan gawir sesar^{[12][13]}. Kami juga menghitung potensi gempa bumi maksimum yang dapat dihasilkan oleh setiap sesar aktif dengan menggunakan hubungan empiris antara magnitudo dan panjang retakan permukaan yang diusulkan oleh Wells & Coppersmith^[14].

Untuk mengetahui efek dari sesar aktif terhadap Sungai Bone, kami memanfaatkan foto udara tahun 2002 dan 2006 yang diarsipkan dalam *Google Earth* untuk mengidentifikasi aliran purba dan menentukan arah migrasi aliran Sungai Bone.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan interpretasi MPI-RRIM kami telah memetakan tiga sesar utama yang teramati di daerah penelitian, yaitu: Sesar Pancuran, Sesar Bondawuna, dan Sesar Lombongo (Gambar 2a-d).

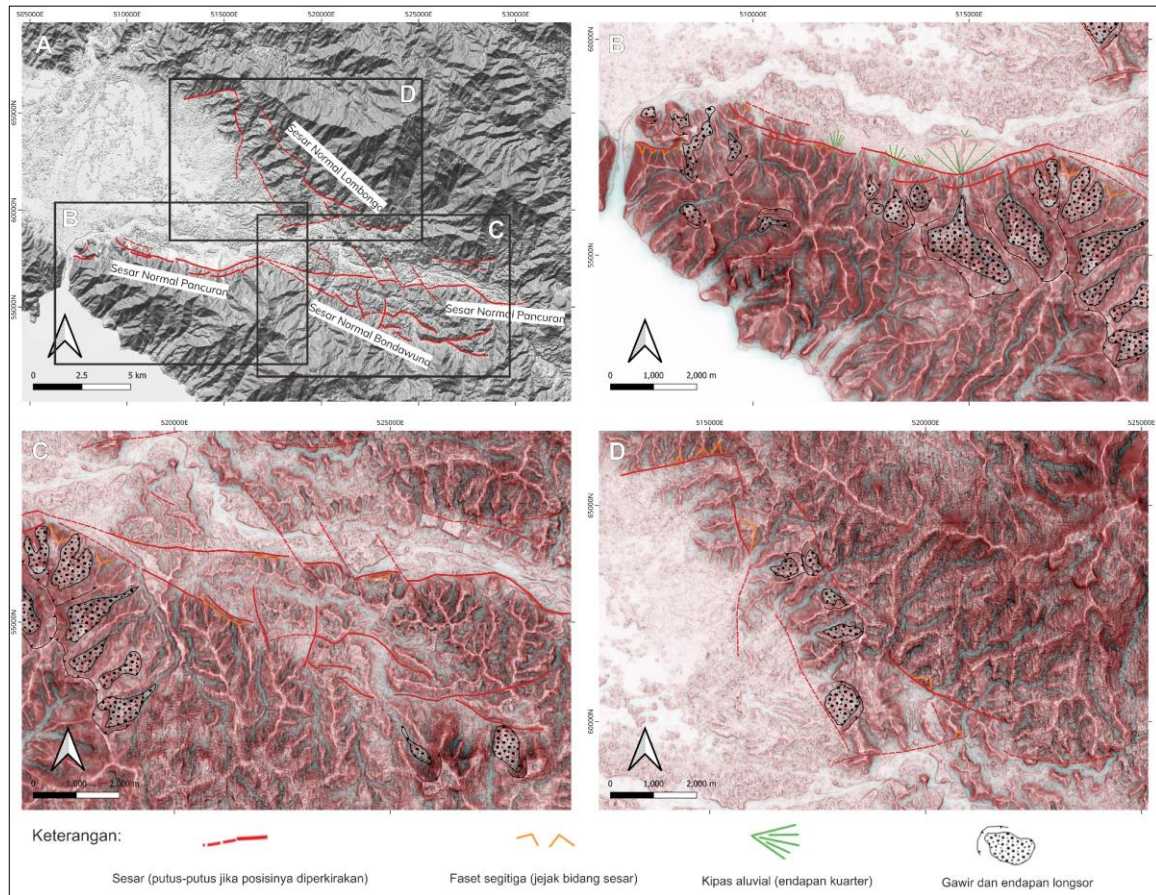
Sesar Pancuran (Gambar 2b) membentang timur – barat daerah penelitian dari Desa Tulabolo sampai dengan Kelurahan Talumolo, dengan panjang ~24.2 km. Strike sesar ini berkisar antara N248°E sampai N290°E. Sesar ini ditandai dengan gawir

lurus dan melengkung yang memotong endapan kuarter (seperti kipas alluvial dan teras sungai) hingga batuan yang lebih tua. Fitur-fitur seperti lembah yang memanjang, sadel sesar, longsor, dan faset segitiga menjadi petunjuk umum sesar ini. Faset segitiga memiliki sudut antara 30° sampai 35° dan menghadap relatif ke arah utara. Besar sudut dan arah dari faset segitiga dapat diinterpretasikan sebagai dip. Di bagian barat, daerah sekitar Kantor Gubernur, sesar ini tertutup oleh longsor, dan di bagian tengah sesar ini berasosiasi dengan mata air panas pancuran.

Sesar Bondawuna (Gambar 2c) dengan strike berkisar antara $N254^\circ E$ sampai $N298^\circ E$ teramati di bagian selatan daerah penelitian. Sesar ini memiliki panjang ~ 12.8 km, mulai

dari Desa Pancuran sampai di perbukitan bagian selatan Desa Tulabolo Timur. Secara umum sesar ini menunjukkan bentuk melengkung, dan ditandai dengan faset segitiga/segimpit, lembah yang memanjang, dan pembelokan sungai. Beberapa lokasi longsor teramati berasosiasi dengan sesar ini.

Di bagian utara daerah penelitian, Sesar Lombongo (Gambar 2d) terpetakan membentang barat laut – tenggara (~ 17 km), mulai dari sekitar Bukit Peyapata di Desa Tunggulo melintasi mata air panas Lombongo dan berakhir di sekitar kaki pegunungan Desa Poduoma. Sesar ini sulit ditelusur kemenerusannya dan kurang menunjukkan bukti aktifitasnya. Fitur morfologi tektonik yang berasosiasi dengan sesar ini adalah tanah longsor, kelurusan lembah, dan mata air panas.



Gambar 2. (A) Peta sebaran sesar aktif dan asosiasi fitur tektonik geomorfologi. (B) Sesar Pancuran di bagian barat daerah penelitian, (C) Sesar Pancuran dan Sesar Bondawuna di bagian timur daerah penelitian, dan (D) Sesar Lombongo di bagian utara daerah penelitian.

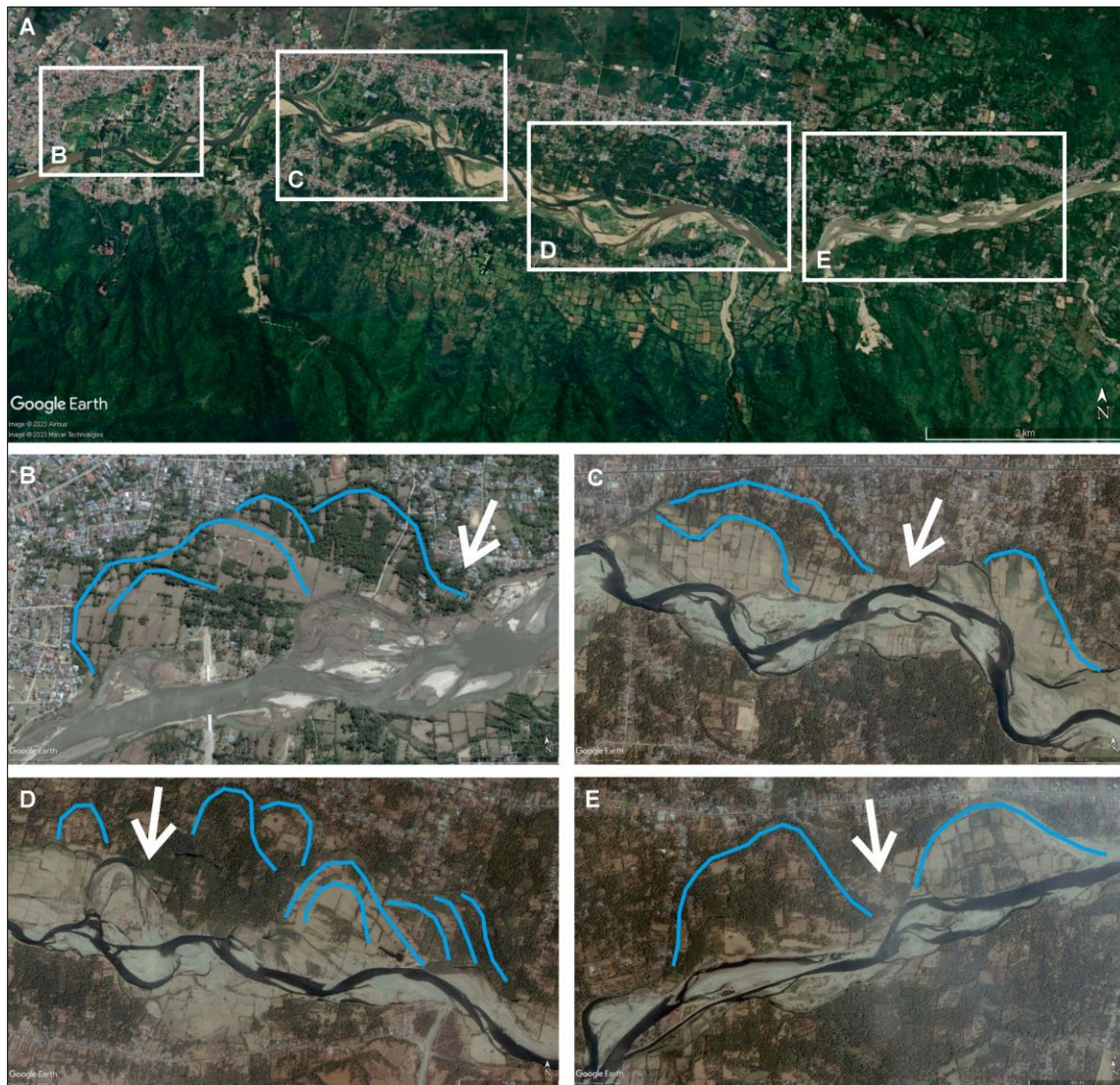
Di daerah penelitian, Sungai Bone mengalir relatif dari timur ke barat mengikuti strike dan berada di hanging-wall dari Sesar Pancuran. Dari hasil pengamatan foto udara tahun 2002 dan 2006 dalam *Google Earth*, kami mendeteksi banyak aliran purba di sisi utara dari Sungai Bone saat ini (Gambar 3a-e).

Posisi aliran purba ini mengindikasikan migrasi Sungai Bone relatif ke arah selatan.

Berdasarkan pola penyebaran dan geometri dari sesar-sesar di daerah penelitian, dapat diinterpretasikan bahwa sistem tektonik ekstensional telah berkembang di daerah hilir Sungai

Bone, membentuk topografi positif dan negatif yang dikenal sebagai “*horst and graben*”. Pegunungan di bagian selatan dan utara merepresentasikan daerah yang mengalami pengangkatan, sedangkan lembah yang membatasi kedua pegunungan ini merepresentasikan daerah yang mengalami penurunan (Gambar 4). Sistem ekstensional ini diduga dipengaruhi oleh subduction rollback lempeng laut Sulawesi sejak akhir Miosen sampai sekarang [15][16]. Proses geologi seperti ini terjadi akibat mundumnya lempeng laut Sulawesi menjauh dari zona subduksi, gaya ini menyebabkan Lengan Utara Sulawesi mengalami peregangan ditandai dengan pembentukan sesar-sesar normal.

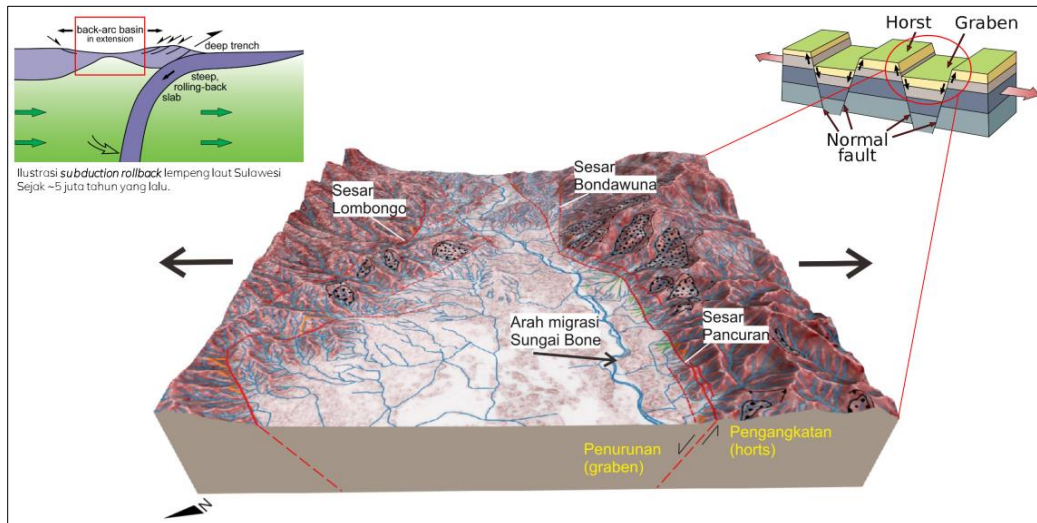
Momen magnitudo (M_w) dari gempa bumi dangkal memiliki hubungan empiris dengan panjang retakan permukaan (SRL) [14], dengan rumus sebagai berikut: $M_w = 4.86 + 1.32 \times \log_{10} (SRL)$. Sesar Pancuran, Sesar Bondawuna, dan Sesar Lombongo masing-masing memiliki panjang 24.2 km, 12.8 km, dan 17 km. Berdasarkan hubungan empiris antara momen magnitudo dan panjang retakan permukaan, Sesar Pancuran berpotensi menghasilkan gempa bumi sebesar 6.7 M_w , Sesar Bondawuna sebesar 6.3 M_w , dan Sesar Lombongo sebesar 6.5 M_w .



Gambar 3. (A-E) Indikasi migrasi aliran Sungai Bone relatif ke arah selatan (arah panah putih) berdasarkan posisi aliran purba (garis biru) terhadap aliran Sungai Bone saat ini.

Gempa bumi sering kali berasosiasi dengan jenis bencana alam lainnya, seperti: likuifaksi, tanah longsor, dan banjir. Daerah penelitian terdiri dari lembah Sungai Bone yang tersusun dari endapan danau dengan ketebalan mencapai 94 meter^[17]. Pemanfaat lembah ini sebagai daerah persawahan di sekitar Kecamatan Kabila, mengindikasikan bahwa material

penyusun jenuh terhadap air. Material granular dan jenuh air dapat kehilangan daya geseknya dan memicu likuifaksi jika diguncang gempa bumi sebesar 4.5 ~ 5 Mw^[18]. Berdasarkan potensi gempa bumi yang mampu dihasilkan oleh sesar-sesar yang ada di daerah penelitian, lembah di sekitar Sungai Bone sangat rentan terhadap likuifaksi.



Gambar 4. Model tiga dimensi sistem ekstensional daerah hilir Sungai Bone. Perhatikan daerah yang mengalami penurunan disepanjang Sesar Pancuran.

Tanah longsor sering terjadi di daerah pegunungan dengan topografi yang curam. Beberapa zona longsor telah terpetakan di daerah pegunungan utara dan selatan (Gambar 2b-d) dapat diaktifkan kembali akibat curah hujan yang tinggi dan guncangan gempa bumi. Hal ini akan mengancam pemukiman yang ada di kaki gunung, terutama Kantor Gubernur yang dibangun di atas zona longsor.

Setiap tahunnya banjir menyebabkan kerusakan dan kerugian yang signifikan. Selama dekade terakhir, sekitar 100.000 orang kehilangan nyawa, dan lebih dari 1,4 miliar orang terkena dampaknya^[19]. Tidak terkecuali dengan Provinsi Gorontalo, khususnya daerah sekitar hilir Sungai Bone. Penyebab utama banjir sering kali dikaitkan dengan perubahan iklim dan urbanisasi tanpa mengaitkan peran tektonik yang berkembang wilayah penelitian^{[20][21]}.

Sesar dapat menyebabkan permukaan bumi mengalami penurunan dan juga mengalami pengangkatan. Penurunan permukaan membuat suatu wilayah menjadi lebih rentan terhadap banjir, seperti yang disebabkan oleh Sesar Pancuran di daerah penelitian. Air akan selalu mencari daerah yang paling rendah. Migrasi Sungai Bone yang relatif ke arah selatan adalah indikasi aktifitas Sesar Pancuran yang menarik lembah Sungai Bone secara vertikal (Gambar 4). Sungai-sungai yang ada di daerah yang mengalami pengangkatan berarus deras mengikis

permukaan batuan yang dilewatinya dan membentuk ngarai-ngarai yang terjal, sedangkan aliran sungai di daerah yang mengalami penurunan cenderung mengalir lambat dan menjadi tempat terendapkannya sedimen. Sedimen dapat menyebabkan pendangkalan dan meningkatkan potensi terjadinya banjir jika debit air Sungai Bone tiba-tiba naik di musim penghujan^[22]. Dengan demikian, sesar aktif menjadi faktor utama dan yang paling krusial dalam menciptakan kondisi topografi yang ideal untuk peristiwa banjir di daerah hilir Sungai Bone, sedangkan perubahan iklim dan urbanisasi hanyalah faktor yang memperburuk dampaknya.

KESIMPULAN

Penelitian ini untuk pertama kalinya mendeskripsikan sesar-sesar yang diduga aktif di daerah hilir Sungai Bone, Provinsi Gorontalo. Kami telah memetakan tiga sesar utama, yaitu: Sesar Pancuran, Sesar Bondawuna, dan Sesar Lombongo. Ketiga sesar ini membentuk sistem ekstensional yang mungkin disebabkan oleh *subduction rollback* lempeng samudera Sulawesi. Panjang dari sesar-sesar ini mengimplikasikan potensi gempa bumi sebesar 6.3 ~ 6.7 Mw. Selain itu, Sesar Normal Pancuran berperan menciptakan topografi yang ideal untuk peristiwa banjir di hilir Sungai Bone. Kami berharap penelitian ini menjadi data dasar untuk pengajar, dan pemerintah

dalam meningkatkan pengetahuan masyarakat terkait bahaya gempa bumi, dan petunjuk dalam arah pengembangan wilayah.

Terkait penelitian lanjutan sesar aktif di wilayah ini, kami menyarankan untuk dilakukan verifikasi posisi sesar aktif di bawah permukaan menggunakan instrument geofisika seperti *Ground Penetrating Radar* (GPR). Setelah terverifikasi, penelitian paleoseismik dapat dilakukan dengan membuat galian parit yang memotong jalur sesar yang sudah terpetakan. Penggalan ini memudahkan peneliti dalam melakukan observasi deformasi, sejarah gempa besar di masa lampau, laju pergerakan sesar, dan interval pengulangan kejadian gempa bumi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Hall, "Reconstructing Cenozoic SE Asia," *Geol Soc Spec Publ*, vol. 106, 1996, doi: 10.1144/GSL.SP.1996.106.01.11.
- [2] J. Hennig, R. Hall, M. A. Forster, B. P. Kohn, and G. S. Lister, "Rapid cooling and exhumation as a consequence of extension and crustal thinning: Inferences from the Late Miocene to Pliocene Palu Metamorphic Complex, Sulawesi, Indonesia," *Tectonophysics*, vol. 712–713, 2017, doi: 10.1016/j.tecto.2017.06.025.
- [3] L. T. White, R. Hall, and R. A. Armstrong, "The age of undeformed dacite intrusions within the Kolaka Fault zone, SE Sulawesi, Indonesia," *J Asian Earth Sci*, vol. 94, 2014, doi: 10.1016/j.jseas.2014.08.014.
- [4] I. Kavalieris, T. M. van Leeuwen, and M. Wilson, "Geological setting and styles of mineralization, north arm of Sulawesi, Indonesia," *J Southeast Asian Earth Sci*, vol. 7, no. 2–3, pp. 113–129, 1992, doi: 10.1016/0743-9547(92)90046-E.
- [5] J. Surmont, C. Laj, C. Kissel, C. Rangin, H. Bellon, and B. Priadi, "New paleomagnetic constraints on the Cenozoic tectonic evolution of the North Arm of Sulawesi, Indonesia," *Earth Planet Sci Lett*, vol. 121, no. 3–4, pp. 629–638, 1994, doi: 10.1016/0012-821X(94)90096-5.
- [6] T. M. van Leeuwen and Muhandjo, "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," *J Asian Earth Sci*, vol. 25, no. 3, pp. 481–511, 2005, doi: 10.1016/j.jseas.2004.05.004.
- [7] I. M. Watkinson and R. Hall, "Fault systems of the eastern Indonesian triple junction: Evaluation of Quaternary activity and implications for seismic hazards," in *Geological Society Special Publication*, vol. 441, no. 1, 2017, doi: 10.1144/SP441.8.
- [8] Pusgen, *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia*. 2017.
- [9] H. Kaneda and T. Chiba, "Stereopaired morphometric projection index red relief image maps (Stereo MPI-RRIMs): Effective visualization of high-resolution digital elevation models for interpreting and mapping small tectonic geomorphic features," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 109, no. 1, 2019, doi: 10.1785/0120180166.
- [10] The Research Group for Active Faults of Japan, *Maps of active faults in Japan with an explanatory text*. Tokyo: University of Tokyo Press, 1992.
- [11] D. W. Burbank and R. S. Anderson, *Tectonic Geomorphology: Second Edition*. 2011. doi: 10.1002/9781444345063.
- [12] T. Nakata, "Active faults of the Himalaya of India and Nepal," *Special Paper of the Geological Society of America*, vol. 232, 1989, doi: 10.1130/SPE232-p243.
- [13] P. Tapponnier and P. Molnar, "Active faulting and tectonics in China," *J Geophys Res*, vol. 82, no. 20, 1977, doi: 10.1029/jb082i020p02905.
- [14] D. L. Wells and K. J. Coppersmith, "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement," *Bulletin - Seismological Society of America*, vol. 84, no. 4, 1994.
- [15] A. M. S. Nugraha and R. Hall, "Neogene sediment provenance and paleogeography of SE Sulawesi, Indonesia," *Basin Research*, vol. 34, no. 5, 2022, doi: 10.1111/bre.12682.
- [16] T. Song, T. Hao, J. Zhang, L. Cao, and M. Dong, "Numerical modeling of North Sulawesi subduction zone: Implications for the east–west differential evolution," *Tectonophysics*, vol. 822, 2022, doi: 10.1016/j.tecto.2021.229172.
- [17] T. Apandi and S. Bachri, *Geological Map of the Kotamobagu Sheet, Sulawesi*. Bandung: Indonesian Geological Research and Development Centre, 1997.
- [18] R. A. Green and J. J. Bommer, "What is the smallest earthquake magnitude that needs to be considered in assessing liquefaction hazard," *Earthquake Spectra*, vol. 35, no. 3, 2019, doi: 10.1193/032218EQS064M.
- [19] S. N. Jonkman, "Global perspectives on loss of human life caused by floods," *Natural Hazards*, vol. 34, no. 2, 2005, doi: 10.1007/s11069-004-8891-3.
- [20] Djefriyanto Nusi et al., "Implementation Of Flood Disaster Mitigation Policy In Gorontalo Regency (Case Study In Tibawa And Limboto Districts)," *Russian Law Journal*, vol. 11, no. 2s, 2023, doi: 10.52783/rlj.v11i2s.648.
- [21] S. Maryati, S. Eraku, and M. Kasim, "Perceptions and adaptation strategies of the community against flood risk at the estuary riverbank of Bone River, Gorontalo Province," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/235/1/012052.
- [22] S. S. S. Napu et al., "Sediment material potential of Bone River as a prevention of silting and flood of Bone River estuary, Gorontalo," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/589/1/012003.