

Pemantauan dinamik tektonik dan analisis pergerakan sesar aktif di Ranau, Sabah, Malaysia

(Monitoring of tectonic dynamics and analysis of active fault movement in Ranau, Sabah, Malaysia)

BAILON GOLUTIN¹, ISMAIL ABD RAHIM²

¹Jabatan Mineral dan Geosains Malaysia, Beg Berkunci 2042, 88999 Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia

²Fakulti Sains dan Sumber Alam, Universiti Malaysia Sabah, 88400 Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia

*Alamat emel perhubungan: bailongolutin@gmail.com

Abstrak: Kejadian gempa bumi sederhana hingga kuat di Ranau pada tahun 1966, 1991, dan 2015, serta aktiviti seismik yang tinggi, menunjukkan kehadiran garisan sesar aktif di kawasan ini. Pada tahun 2018, Jabatan Mineral dan Geosains Malaysia (JMG) telah memasang 31 monumen *Global Navigation Satellite System* (GNSS) di Ranau dan memulakan pemantauan sistematik pada tahun 2019. Analisis ini menggunakan data yang dikumpul sehingga tahun 2024. Hasil pemantauan GNSS menunjukkan bahawa pergerakan mendatar kerak bumi adalah 3 mm/tahun hingga 14 mm/tahun, iaitu dominan ke arah *NW* dan barat, manakala pergerakan menegak direkodkan antara -10 mm/tahun (menurun) hingga +12 mm/tahun (menaik). Perubahan ini dipercayai berkait rapat dengan proses pengangkatan Gunung Kinabalu, yang dipengaruhi oleh interaksi antara palung *NW* Borneo dan palung *NE* Borneo. Data GNSS turut menunjukkan bahawa kerak bumi di kawasan Ranau yang bergerak secara relatif ke arah barat adalah didorong oleh pergerakan Plat Filipina ke arah *WNW*, yang memberi kesan signifikan terhadap pergerakan kerak bumi di kawasan Ranau.

Katakunci: Plat tektonik, gempa bumi, sesar aktif, kerak bumi, GNSS, Ranau, Sabah

Abstract: The occurrence of moderate to strong earthquakes in Ranau in 1966, 1991, and 2015, along with high seismic activity, indicates the presence of an active fault line in the area. In 2018, the Department of Mineral and Geoscience Malaysia (JMG) installed 31 Global Navigation Satellite System (GNSS) monuments in Ranau and initiated systematic monitoring in 2019. This analysis uses data collected up to 2024. GNSS monitoring results show that the horizontal crustal movement ranges from 3 mm/year to 14 mm/year, predominantly towards the northwest and west, while vertical movement ranges from -10 mm/year (downward) to +12 mm/year (uplift). These changes are believed to be closely related to the uplift process of Mount Kinabalu, influenced by the interaction between the NW Borneo trough and the NE Borneo trough. GNSS data also indicate that the westward relative movement of the crust in the Ranau area is driven by the WNW movement of the Philippine Plate, significantly impacting the crustal movement in the Ranau region.

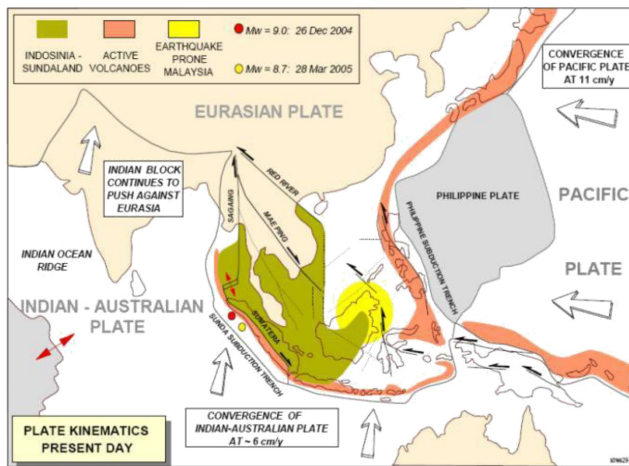
Keywords: Tectonic plate, earthquake, active fault, crust, GNSS, Ranau, Sabah

PENGENALAN

Sabah merupakan sebahagian daripada blok Sundaland, yang merangkumi Laut Sunda yang cetek, Jawa, Sumatera, Borneo, Semenanjung Malaysia, Thailand, dan Indochina (termasuk Kemboja, Laos, dan Vietnam). Kedudukannya antara Plat Filipina dan Plat Pasifik menyebabkan berlakunya sesar di beberapa lokasi utama seperti Semenanjung Semporna-Lahad Datu, Teluk Labuk (Paitan-Beluran), Teluk Marudu (Kudat-Kota Marudu-Pitas-Pulau Banggi), serta pantai barat Sabah (Ranau-Tenom-Keningau-Tambunan-Telupid) (Yan *et al.*, 2006; Tjia, 2007; Ismail *et al.*, 2015; Golutin *et al.*, 2022). Zon pertembungan ini mengandungi lembangan lautan kecil, kompleks ofiolit, lengkungan pulau

gunung berapi, dan kompleks daratan benua Asia Tenggara, yang berkaitan dengan aktiviti seismik dan letusan gunung berapi berhampiran zon pertembungan transkontinental dan *interplate* (Rajah 1).

Kerak bumi yang mendasari Sabah telah mengalami perubahan akibat pemuaihan proto-Laut China Selatan serta pertembungan dengan Plat Filipina, Plat Eurasia, dan Plat India-Australia. Aktiviti seismik di Sabah berpunca daripada pergerakan kerak bumi yang berterusan (Tongkul, 2017). Rejim tegasan di Sabah mengakibatkan pembentukan sesar normal akibat regangan serta sesar sengkup dan sesar mendatar akibat tekanan mampatan (Ismail *et al.*, 2015). Gunung Kinabalu, dengan ketinggian puncak kira-kira 4,095



Rajah 1: Peta menunjukkan kedudukan Sabah yang merupakan sebahagian daripada blok Sundaland (Simons *et al.*, 2007).

meter di atas paras laut, merupakan jisim plutonik igneus yang sebahagian daripada Banjaran Crocker dan menerobos sempadan daerah Kota Belud dan Ranau. Ia dipercayai mengalami kenaikan jangka panjang pada kadar sekitar 0.5 mm setahun (Hall *et al.*, 2009). Rekod gempa dari METMalaysia menunjukkan aktiviti seismik ketara sering berlaku di Ranau, dengan kebanyakan gempa bumi terjadi pada kedalaman kurang daripada 50 kilometer.

Plat yang berdekatan dengan Sabah, iaitu Plat India-Australia, Plat Filipina, dan Plat Eurasia, mempunyai pergerakan tahunan masing-masing sebanyak lima, sepuluh, dan tujuh milimeter (Simons *et al.*, 2007). Menurut Mustafar *et al.* (2017), Sabah mengalami daya mampatan dan regangan bersama dengan sedikit putaran mengikut arah jam, dengan tegasan regangan lebih ketara di utara dan barat, manakala tekanan mampatan berlaku di timur dan tenggara. Walau bagaimanapun, jarak monumen GNSS yang jauh menyukarkan penggunaan data ini untuk mengenalpasti pergerakan tempatan sesar aktif. Oleh kerana tidak semua sesar aktif di Sabah dilengkapi sistem pemantauan geodetik, maka lokasi serta pergerakan tepat sesar aktif masih belum dapat ditentukan dengan jelas (Ismail *et al.*, 2015). Untuk menangani isu ini, Jabatan Mineral dan Geosains Malaysia (JMG) mula merekodkan pergerakan kerak bumi Sabah secara sistematik pada tahun 2019 menggunakan stesen monumen GNSS di Ranau dan Lahad Datu.

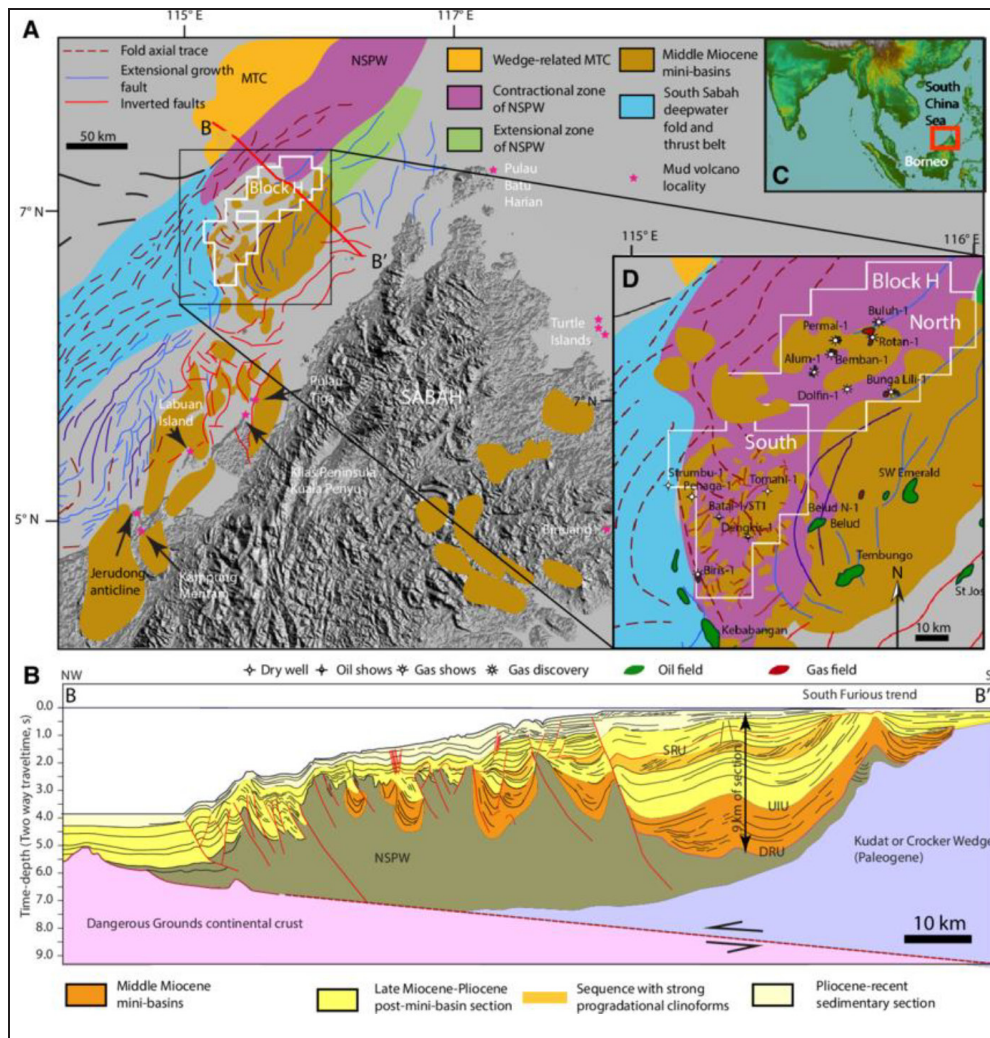
Kajian geologi dan tektonik Sabah telah dijalankan sejak awal 1970-an oleh ramai pengkaji seperti Collenette (1958), Tokuyama & Yoshida (1974), Hamilton (1979), Holloway (1982), Wood (1985), Rangin *et al.* (1990), Tan & Lamy (1990), Tongkul (1990, 1991), Hinz *et al.* (1991), Hall (1996, 2013), Hall & Wilson (2000), dan Hutchison *et al.* (2000). Evolusi geologi di utara dan barat Sabah dipengaruhi oleh pergerakan konvergen blok proto-Laut China Selatan ke arah tenggara (Tongkul, 1990), dengan pergerakan ini berkurangan pada awal hingga pertengahan Miosen (Taylor & Hayes, 1983; Briaies *et al.*, 1993;

Barckhausen & Roeser, 2004). Pengangkatan besar di pantai barat Sabah menghasilkan Banjaran Crocker, yang selari dengan arah *NE-SW* (Hall, 2013). Ketidakstabilan graviti menyebabkan pergerakan banjaran ini ke arah *NW* ke dalam palung Sabah (Hall, 2013; Sapin *et al.*, 2013). Episod hakisan dipercayai berlaku pada Miosen Tengah di Deep Regional Unconformity (DRU) (Bol & van Hoorn, 1980; Levell, 1987; Hutchison, 2004, 2005; Balaguru & Hall, 2009; Lunt & Madon, 2017) (Rajah 2).

Walaupun banyak kajian telah dilakukan, beberapa jurang penyelidikan masih wujud. Pertama, penggunaan data GNSS yang terhad menyukarkan pengesanan pergerakan sesar aktif secara terperinci (Simons *et al.*, 2007; Mohamed, 2012; Sapin *et al.*, 2013; Mustafar *et al.*, 2014, 2017). Kedua, pemetaan dinamik pergerakan kerak bumi Sabah masih belum menyeluruh, terutama dalam mengenal pasti kadar dan arah pergerakan sesar aktif serta kaitannya dengan aktiviti seismik di pantai barat Sabah. Ketiga, meskipun terdapat kajian mekanisme fokal gempa bumi, model geodinamik yang menunjukkan interaksi antara pergerakan plat, sesar aktif, dan aktiviti seismik masih belum dikaji secara mendalam.

Teknologi GNSS memungkinkan kajian deformasi kerak bumi di barat Sabah menjadi lebih tepat dengan membolehkan pengukuran pergerakan kerak bumi secara terperinci. Sistem ini membantu ahli geologi memahami pergerakan tektonik yang berlaku di pantai barat Sabah. Jabatan Ukur dan Pemetaan Malaysia (JUPEM) mengendalikan MyRTKnet, sebuah program GNSS yang dipantau secara berterusan di Sabah. Walau bagaimanapun, sistem ini mempunyai keterbatasan dalam mengesan pergerakan sesar tempatan yang aktif, yang memerlukan kaedah pemantauan tambahan seperti radar interferometri dan analisis seismik bagi mendapatkan data yang lebih komprehensif.

Berdasarkan jurang ini, maka kajian ini dijalankan untuk menganalisis kadar dan arah pergerakan tektonik di Ranau menggunakan data GNSS terkini, mengenalpasti pergerakan kerak bumi jangka panjang di kawasan pantai barat Sabah berdasarkan data pemantauan selama lima tahun (2019-2024) berbanding kajian oleh Golutin *et al.* (2022) yang berdasarkan data selama dua tahun (2018-2020), menilai hubungan antara pergerakan sesar aktif tempatan dan mengenalpasti pengaruh tektonik rantau yang dominan, sama ada Plat Eurasia atau Plat Pasifik-Filipina. Selain itu, teknologi GNSS kini digunakan secara meluas untuk memantau perubahan mikro dalam pergerakan kerak bumi, membolehkan ramalan magnitud kekuatan gempa akan datang dianalisis (Bock *et al.*, 2011; Crowell *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2013; Melgar *et al.*, 2015; Goldberg *et al.*, 2021; Al Kautsar *et al.*, 2023; Meilano, 2024; Quinteros-Cartaya *et al.*, 2024). Data-data pemantauan ini boleh dijadikan rujukan dalam menjalankan analisis kekuatan gempa bumi pada masa akan datang berdasarkan Probability Seismic Hazard Analysis (PSHA).



Rajah 2: Perlanggaran arka-benua di utara Sabah menyebabkan Ketakselarjangan Miosen Tengah yang merujuk kepada *Deep Regional Unconformity* (DRU) di kawasan daratan dan luar pesisir Sabah (Lunt & Madon, 2017).

Geologi am dan tektonik pantai barat Sabah

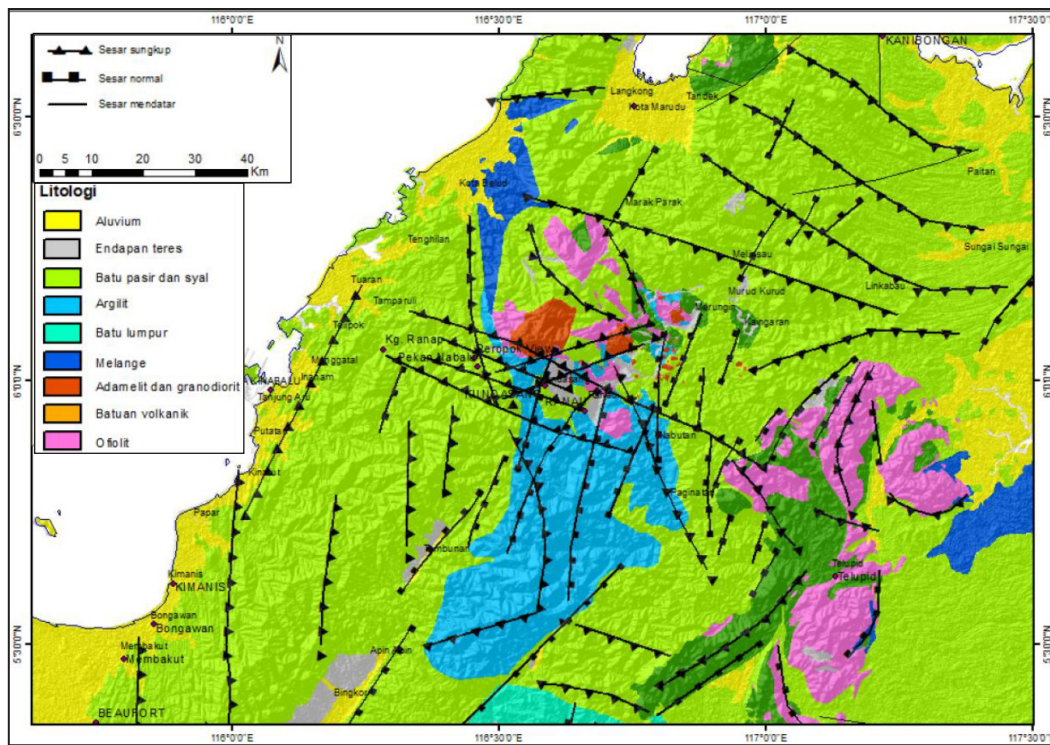
Pantai barat Sabah adalah didominasi oleh batuan sedimen yang terdiri daripada jujukan batu pasir, syal, argilit, endapan aluvium, batu lumpur dan endapan teres (JMGM, 2015) (Rajah 3). Selain itu, batuan igneus seperti adamelit dan granodiorit yang membentuk Gunung Kinabalu turut ditemukan di Gunung Nungkok, Gunung Tambuyukon, dan kawasan Telupid. Pembentukan Banjaran Crocker dan Banjaran Trusmid adalah hasil pengangkatan sedimen laut dalam akibat aktiviti tektonik obduksi di sepanjang palung *NW-SE* dan *NE-SW* Borneo.

Batuan sedimen yang mendominasi pantai barat Sabah ini mempunyai sejarah pembentukan yang kompleks, melibatkan proses sedimentasi, pemendapan, dan tektonik yang berlanjutan selama jutaan tahun. Batu pasir yang banyak terdapat di kawasan ini terbentuk hasil pemendapan bahan butiran kasar seperti kuarza dan feldspar. Syal dan argilit pula merupakan hasil pemendapan bahan yang lebih halus dalam persekitaran laut yang lebih dalam yang menunjukkan perubahan dalam tenaga pengangkutan sedimen pada masa lampau.

Selain itu, kehadiran endapan aluvium yang meluas di kawasan pantai dan lembah sungai menunjukkan proses geomorfologi yang berterusan. Endapan ini terdiri daripada lumpur, pasir, dan kerikil yang diangkut oleh sungai dari kawasan pedalaman ke kawasan muara. Endapan aluvium ini penting bukan sahaja sebagai rekod geologi tetapi juga sebagai sumber utama air bawah tanah dan tanah subur untuk aktiviti pertanian di kawasan dataran rendah Sabah.

Struktur geologi di kawasan ini turut dipengaruhi oleh kehadiran ofiolit dan melange, yang merupakan sisa kerak lautan yang terangkat ke permukaan akibat proses tektonik. Ofiolit merupakan kompleks batuan yang terdiri daripada peridotit, gabro, dan basalt yang berasal daripada kerak lautan yang lebih tua. Kehadiran ofiolit ini membuktikan bahawa kawasan pantai barat Sabah pernah mengalami proses obduksi dan pertembungan plat tektonik yang menyebabkan kerak lautan ini terangkat dan tersingkap di daratan.

Di samping itu, intrusi igneus seperti adamelit dan granodiorit yang terdapat di Gunung Kinabalu, Gunung Nungkok, Gunung Tambuyukon, dan kawasan Telupid menunjukkan aktiviti magmatik yang signifikan di Sabah.



Rajah 3: Peta geologi pantai barat Sabah yang menunjukkan dominasi batuan sedimen. Intrusi batuan granodiorit, adameilit dan ultrabasik berlaku di kawasan Ranau, Kota Marudu dan Telupid. Terdapat sesar bertren *NE-SW* yang berasosiasi dengan pemaiaan proto-Laut China Selatan dan *WNW-ESE* yang berasosiasi dengan pemaiaan proto-Laut Sulu.

Intrusi batolit Gunung Kinabalu, yang berusia lebih kurang 7-8 juta tahun, merupakan bukti utama bahawa terdapat proses pengangkatan yang berterusan di kawasan ini (Cottam *et al.*, 2010, 2013). Pembentukan batolit ini berlaku apabila magma dari dalam kerak bumi menyejuk dan membeku dalam lapisan kerak yang lebih dalam sebelum akhirnya terangkat ke permukaan akibat proses tektonik.

Kawasan Banjaran Crocker dan Banjaran Trusmadi adalah antara ciri landskap utama di Sabah yang terbentuk akibat pengangkatan sedimen laut dalam. Banjaran ini terdiri daripada batuan sedimen yang telah mengalami deformasi kuat akibat tekanan tektonik yang berterusan. Pergerakan plat tektonik di kawasan ini menghasilkan lipatan kompleks dan sesar sungkup yang mempengaruhi bentuk muka bumi serta kestabilan geologi kawasan ini.

Sesar normal berorientasi *NE-SW* yang memotong endapan aluvium dan teres di Keningau, Tambunan, Kundasang, dan Ranau menunjukkan bahawa aktiviti tektonik di kawasan ini masih berterusan (Tjia, 2007). Kehadiran sesar aktif ini berpotensi menyebabkan gempa bumi dan tanah runtuh, terutama di kawasan berhampiran garis sesar utama. Selain itu, sesar sungkup turut membentuk landskap Sabah dengan menghasilkan perlipatan rencam akibat tekanan mampatan. Tjia (1974) telah menjalankan kajian terhadap struktur geologi Formasi Trusmadi dan Crocker yang mendasari kawasan pantai barat Sabah. Hasil kajian beliau menunjukkan bahawa kedua-dua formasi ini adalah terdiri daripada batuan sedimen yang telah mengalami proses pelipatan dan deformasi tektonik yang kompleks yang menunjukkan

sejarah geologi yang dinamik di kawasan tersebut. Kedua-dua formasi ini terdiri daripada batuan sedimen yang telah mengalami proses tektonik intensif sejak berjuta-juta tahun lalu.

Pertembungan plat tektonik dan pengangkatan sedimen laut dalam mempengaruhi kestabilan cerun serta meningkatkan risiko bencana geologi. Kawasan Kundasang dan umumnya Ranau, terdedah kepada bahaya tanah runtuh akibat kehadiran garis-garis sesar aktif dan bahan geologi lemah, yang boleh di cetuskan oleh kadar curahan hujan yang tinggi dan kejadian gempa bumi. Oleh itu, kajian geologi diperlukan sebelum pembangunan dijalankan.

Kajian terdahulu

Sabah mengalami pergerakan tektonik berputar mengikut arah jam serta deformasi secara perlahan dan bebas (Rangin *et al.*, 1990; Simons *et al.*, 2007; Sapin *et al.*, 2013; Mustafar *et al.*, 2017). Pergerakan ini dalam dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara plat Eurasia, Laut Filipina, dan Indo-Australia yang menghasilkan daya mampatan serta regangan di kawasan tersebut. Deformasi ini berlaku dalam jangka masa yang panjang dan dipengaruhi oleh faktor geologi serta tektonik serantau.

Menurut King *et al.* (2010), Sapin *et al.* (2013), dan Hall (2013), gelongsoran graviti telah dikenalpasti sebagai punca utama anjakan kerak bumi di barat Sabah yang berkaitan dengan proses sedimentasi dan pembentukan batuan yang tidak stabil. Namun, Simons *et al.* (2007), Franke *et al.* (2008), dan Hesse *et al.* (2009) pula berpendapat bahawa daya mampatan *NW-SE* menyebabkan pemendakan kerak

bumi, yang menjadi faktor utama deformasi di kawasan tersebut. Bukti daripada data geofizik dan seismologi turut menunjukkan kehadiran pergerakan sesar aktif yang mempengaruhi kestabilan tanah di Sabah. Sesar aktif ini berpotensi mencetuskan gempa bumi dan tanah runtuh yang memberi kesan perubahan kepada landskap dan geomorfologi.

Gempa bumi bermagnitud 6.0 ML yang melanda Ranau pada 5 Jun 2015 mengesahkan aktiviti deformasi kerak bumi yang aktif di barat Sabah. Kejadian ini mengakibatkan kerosakan infrastruktur serta kehilangan nyawa. Golutin (2020) dan Tjia (2007) menyatakan bahawa sesar aktif di pantai barat Sabah cenderung bergerak, dan apabila tenaga yang terkumpul dilepaskan, maka kejadian gempa bumi boleh berlaku. Oleh itu, pemantauan berterusan adalah amat penting bagi memahami geotektonik sesar dan pola pergerakan kerak bumi di kawasan ini.

Mustafar *et al.* (2017) menganalisis data GNSS daripada rangkaian JUPEM dan mendapati kadar perubahan pergerakan kerak bumi di beberapa lokasi di barat Sabah, menunjukkan keperluan kajian lanjutan bagi memahami faktor yang mempengaruhi pergerakan tersebut. Pada tahun 2010, JUPEM dan JMG telah menjalankan pemantauan GNSS pasif pertama di Kundasang untuk memahami aktiviti tektonik Sesar Lobou-Lobou dan Sesar Mensaban. Kerja-kerja yang dilaksanakan merangkumi pembinaan monumen titik kawalan GNSS, pengukuran geodetik berulang dan menganalisis pergerakan sesar aktif.

Mohamed (2012) melaporkan anjakan sebanyak 3–5 cm setahun, yang memberi implikasi terhadap kestabilan struktur bangunan dan infrastruktur. Oleh itu, langkah mitigasi seperti pembangunan reka bentuk bangunan tahan gempa perlu dipertimbangkan bagi mengurangkan risiko kerosakan akibat gempa bumi.

Dalam kajian seterusnya, Mustafar *et al.* (2017) meneruskan analisis GNSS aktif di Sabah berdasarkan

IGS08 (Reischung *et al.*, 2012) dan Rangka Rujukan Terrestrial Antarabangsa 2008 (Altamimi *et al.*, 2011). Beliau menyimpulkan bahawa gelongsoran graviti tidak berlaku, bertentangan dengan dapatan Sapin *et al.* (2013). Sementara itu, Golutin *et al.* (2022) mendapati bahawa pantai barat Sabah adalah dibentuk oleh lipatan mega terbuka, yang menyebabkan daya regangan dan mendapan di beberapa lokasi (Rajah 4). Dapatan ini menunjukkan bahawa deformasi kerak bumi di Sabah adalah dipengaruhi oleh pelbagai faktor yang saling berkaitan dan memerlukan kajian lanjutan untuk memahami interaksinya dengan lebih mendalam.

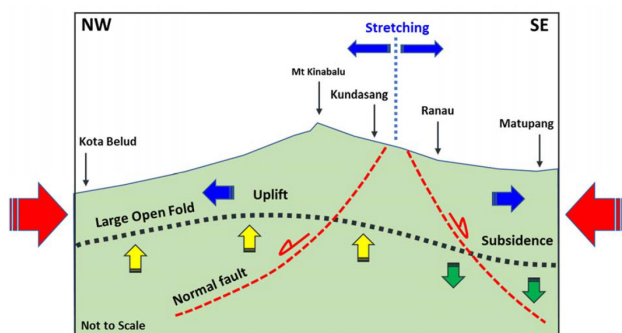
Sesar aktif di Ranau

Ismail *et al.* (2015) telah memetakan sekurang-kurangnya tujuh zon sesar aktif utama di Sabah. Zon-zon ini dikelaskan kepada tiga orientasi utama, iaitu *NE-SW*, *NW-SE*, dan *WSW-ENE*, yang dikenalpasti melalui analisis penderiaan jauh serta cerapan lapangan. Zon-zon sesar ini dikaitkan dengan daya mampatan dan daya regangan yang berlaku di kawasan tersebut akibat pergerakan kerak bumi dan interaksi antara plat tektonik. Sesar dengan orientasi *NE-SW*, yang miring ke arah *NW* dan *SE*, merangkumi Zon Sesar Kinabalu, Zon Sesar Lobou-Lobou, Zon Sesar Ranau, Zon Sesar Timbua, dan Zon Sesar Matupang.

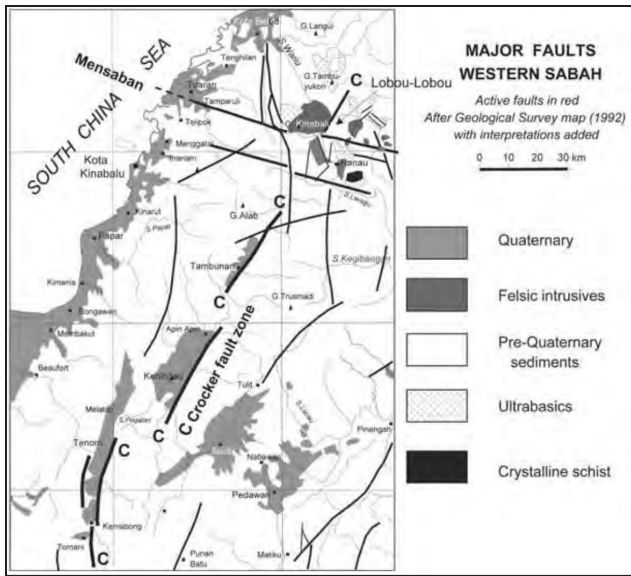
Sesar *NW-SE*, dikenali sebagai Zon Sesar Mensaban, merupakan sesar mendatar dengan pergerakan ke kiri dimana pergerakan ini dikenali sebagai sesar mendatar ke kiri (*left-lateral strike-slip fault*) (Golutin, 2020). Sementara itu, Zon Sesar Kibbas yang berorientasi *WSW-ENE* adalah sesar sungkup dengan pergerakan mendatar ke kanan (Golutin, 2021). Sesar ini sering dikaitkan dengan pembentukan struktur geologi yang kompleks dan berpotensi untuk menghasilkan gempa bumi kecil hingga sederhana di kawasan yang berdekatan (Golutin, 2021).

Tjia (2007) telah mengenalpasti empat orientasi utama sesar di pantai barat Sabah: *NE-SW*, *WNW-ESE*, *NW-SE* dan *NNE-SSW* yang menggambarkan sejarah geologi yang kompleks. Dua sesar utama tersebut ialah Sesar Mensaban (*WNW-ESE*) dan Zon Sesar Crocker (CFZ) yang berorientasi *NNW-SSE* serta *NE-SW*. CFZ, sepanjang kira-kira 175 km, merentasi Tomani, Tenom, Keningau, Tambunan dan Kundasang, manakala Sesar Mensaban melintasi Telupid hingga Tamparuli (Rajah 5). CFZ berpotensi menghasilkan gempa bumi jika berlaku pergerakan signifikan.

Kajian yang dijalankan oleh (JMGM, 2009) telah mengenalpasti beberapa sesar aktif di pantai barat Sabah. Antaranya ialah Sesar Lobou-Lobou, Sesar Kedamaian, Sesar Mensaban, Sesar Keningau, Sesar Tambunan, Sesar Mamut, Sesar Tenom, Sesar Lugus, Sesar Nalapak, dan Sesar Parancangan. Peta seismotektonik yang dihasilkan oleh JMGM (2009) menunjukkan bahawa Sesar Lobou-Lobou dan Sesar Mensaban merupakan dua sesar utama yang melintasi kawasan Kundasang, menjadikannya kawasan yang berisiko tinggi terhadap kejadian gempa bumi.



Rajah 4: Model skematik yang menerangkan pergerakan mendatar dan menegak di kawasan Ranau. Pemampatan tektonik Sabah yang berterusan dalam arah barat laut-tenggara (*NW-SE*) telah menghasilkan lipatan terbuka yang besar, menyebabkan kenaikan dan penurunan kerak bumi dengan magnitud yang sangat kecil. Sesar normal antara Kundasang dan Ranau menyebabkan pergerakan mendatar ke arah barat laut (*NW*) dan tenggara (*SE*) (Golutin *et al.*, 2022).



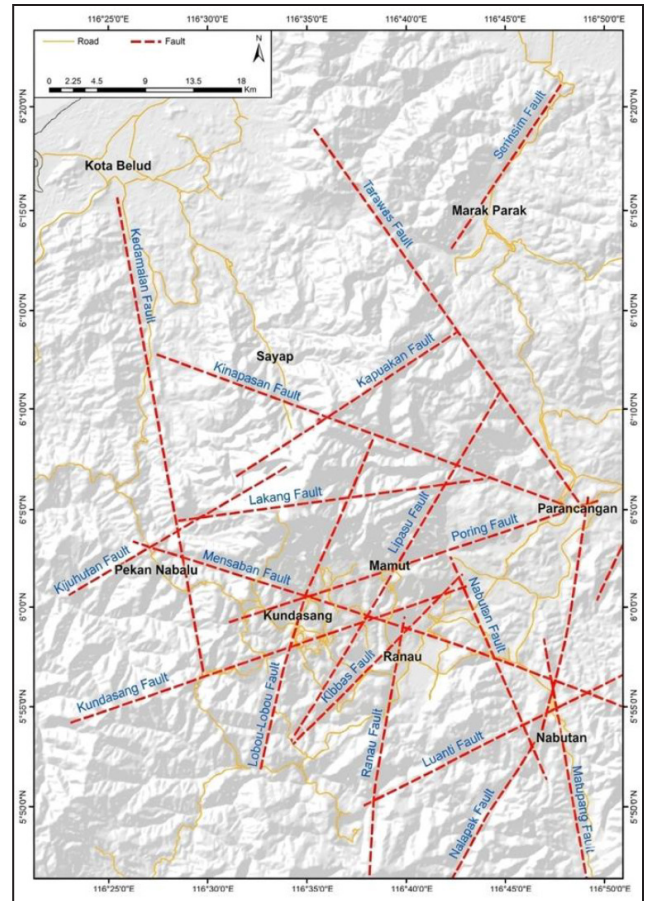
Rajah 5: Crocker Fault Zone (CFZ) memotong Banjaran Crocker NNE-SW (Tomani-Tenom-82 Melalap) dan NE-SW (Keningau-Tambunan-Kundasang) (Tjia, 2007).

Kajian terkini oleh Golutin *et al.* (2022) telah memetakan sebanyak 18 sesar utama yang mempunyai titik gempa iaitu Sesar Lobou-Lobou, Sesar Mensaban, Sesar Kedamaian, Sesar Nalapak, Sesar Lipasu, Sesar Ranau, Sesar Kibbas, Sesar Nabutan, Sesar Matupang, Sesar Merungin, Sesar Serinsim, Sesar Kijuhutan, Sesar Kapuakan, Sesar Kinapasan, Sesar Lakang, Sesar Poring, Sesar Kundasang dan Sesar Tarawas (Rajah 6). Oleh kerana pergerakan sesar-sesar ini menghasilkan aktiviti seismik dan gegaran gempa bumi, maka dapat disimpulkan bahawa kesemua 18 sesar ini adalah aktif dan berpotensi untuk menyebabkan impak yang signifikan terhadap pembangunan dan keselamatan penduduk di kawasan terbabit.

METODOLOGI

Kajian ini menggunakan pendekatan pemantauan monumen GNSS untuk menganalisis pergerakan kerak bumi di Ranau dan pantai barat Sabah. Metodologi yang digunakan merangkumi pemasangan sistem pemantauan GNSS (monumen aktif dan pasif), pengumpulan data jangka panjang melalui pemantauan pergerakan kerak bumi (integrasi data dan analisis pergerakan), serta mengenalpasti daya tektonik (analisis daya dan tektonik rantau) berdasarkan model deformasi kerak bumi (Rajah 7).

Pemantauan monumen GNSS dijalankan melalui satu rangkaian sistem yang dipasang oleh Jabatan Mineral dan Geosains Malaysia (JMG) sejak tahun 2018. Metodologi pemantauan ini melibatkan beberapa peringkat utama, termasuk pemilihan lokasi, pemasangan peralatan, konfigurasi sistem, pengumpulan data, dan analisis data menggunakan kaedah tertentu. Proses ini dijalankan dengan teliti untuk memastikan ketepatan data serta meningkatkan pemahaman terhadap pergerakan kerak bumi di Sabah.



Rajah 6: Sebahagian daripada 18 sesar aktif yang telah dikenalpasti di Ranau iaitu Sesar 108 Lobou-Lobou, Sesar Mensaban, Sesar Kedamaian, Sesar Nalapak, Sesar Lipasu, Sesar Ranau, 109 Sesar Kibbas, Sesar Nabutan, Sesar Matupang, Sesar Serinsim, Sesar Kijuhutan, Sesar 110 Kapuakan, Sesar Kinapasan, Sesar Lakang, Sesar Poring, Sesar Kundasang, Sesar Tarawas 111 manakala Sesar Merungin di timur unjurannya terkeluar sedikit dari kawasan kajian (Golutin *et al.*, 2022).



Rajah 7: Rangka kerja metodologi mengenalpasti dinamik tektonik di kawasan Ranau.

Lokasi yang dipilih juga dipastikan bebas daripada gangguan struktur atau faktor persekitaran yang boleh mempengaruhi ketepatan pengukuran. Penilaian awal dilakukan melalui kajian geologi dan penggerudian auger dan mackintosh bagi memastikan kawasan yang dipilih tidak terdedah kepada hakisan, pergerakan tanah, atau gangguan lain yang boleh menyebabkan ketidakstabilan

dalam pengukuran. Dalam pemilihan lokasi, aspek lain yang dipertimbangkan termasuk jarak dari sumber gangguan elektromagnetik, ketepatan dalam menangkap isyarat satelit, serta aksesibiliti kawasan bagi tujuan penyelenggaraan berkala. Pemilihan lokasi yang strategik adalah penting bagi memastikan data GNSS yang diperolehi adalah bersih dan tidak terjejas oleh faktor luar yang boleh menyebabkan kesalahan dalam pengukuran.

Setiap stesen GNSS dilengkapi dengan antena GNSS berkeupayaan tinggi yang disambungkan kepada penerima GNSS bagi membolehkan pemantauan secara berterusan. Peralatan ini berfungsi dengan menerima isyarat daripada pelbagai sistem satelit global seperti GPS, GLONASS, Galileo, dan BeiDou. Dengan menggunakan pelbagai sumber satelit, ketepatan data yang dikumpul dapat ditingkatkan serta mengurangkan kesalahan yang berpunca daripada gangguan atmosfera dan kesilapan sistematik. Pemasangan antena GNSS dilakukan dengan teliti bagi memastikan peralatan dipasang pada ketinggian yang optimum dan pada sudut yang betul untuk mendapatkan liputan isyarat maksimum. Struktur pemasangan juga perlu kukuh dan kalis cuaca bagi memastikan ketahanan jangka panjang terhadap perubahan cuaca ekstrem di Sabah. Stesen GNSS ini dilengkapi dengan sistem tenaga autonomi seperti panel solar dan bateri simpanan untuk memastikan operasi berterusan tanpa gangguan bekalan elektrik.

Konfigurasi sistem pemantauan dilakukan menggunakan perisian Trimble T4D, yang membolehkan pemantauan masa nyata serta analisis jangka panjang terhadap perubahan kerak bumi. Perisian ini memainkan peranan penting dalam menilai trend perubahan kedudukan serta mengesan sebarang anjakan kecil dalam pergerakan tektonik. Pemantauan masa nyata membolehkan pengesanan awal terhadap perubahan geodinamik dan membantu dalam merangka strategi mitigasi risiko bencana. Dalam konfigurasi sistem ini, pelbagai parameter ditetapkan bagi memastikan ketepatan pemantauan, termasuk penentuan masa, sistem penyimpanan data, serta penghantaran data ke pusat pemrosesan utama. Data yang direkodkan dihantar secara automatik ke pusat analisis menggunakan teknologi komunikasi rangkaian selular. Ini memastikan penyelidik dapat mengakses data terkini dengan pantas bagi tujuan analisis dan kajian lanjut.

Pengumpulan data GNSS dilakukan secara berterusan, di mana data yang diperolehi direkodkan dalam bentuk koordinat geodetik yang sangat tepat. Data ini kemudiannya dianalisis menggunakan dua kaedah utama, iaitu *Precise Point Positioning* (PPP) dan *Differential GNSS* (DGNSS). Kaedah PPP membolehkan analisis kedudukan yang sangat tepat menggunakan satu penerima GNSS sahaja tanpa keperluan stesen rujukan berdekatan. Sebaliknya, kaedah DGNSS menggunakan stesen rujukan tambahan untuk meningkatkan ketepatan pengukuran relatif antara titik pemantauan. Gabungan kedua-dua kaedah ini memberikan resolusi yang tinggi dalam

menentukan pergerakan kerak bumi secara mendatar dan menegak. Pengumpulan data juga melibatkan penapisan awal bagi mengurangkan kesan gangguan ionosfera, troposfera, serta *multipath* yang boleh menjejaskan ketepatan pengukuran. Kaedah pemrosesan pasca-analisis turut digunakan untuk membandingkan data yang dikumpul dalam tempoh yang panjang bagi mendapatkan trend perubahan kerak bumi yang lebih jelas.

Dalam proses analisis, corak pergerakan kerak bumi dianalisis berdasarkan orientasi utama sesar, termasuk sesar normal berorientasi *NE-SW* dan *NE-SW* yang menunjukkan daya regangan di kawasan kajian, serta sesar sungkup dengan arah *NW-SE* yang menunjukkan tekanan mampatan aktif. Data GNSS yang diperolehi kemudiannya dibandingkan dengan data sejarah geologi dan tektonik bagi mengenalpasti pola perubahan yang boleh dikaitkan dengan aktiviti tektonik di kawasan tersebut. Analisis juga dilakukan menggunakan model matematik yang merangkumi aspek dinamik tektonik dan mekanisme sesar bagi mendapatkan pemahaman yang lebih mendalam terhadap pergerakan kerak bumi.

Seterusnya, data daripada pemantauan GNSS digabungkan sesar aktif dan data seismologi bagi meningkatkan ketepatan analisis pergerakan kerak bumi yang berpotensi menyebabkan gempa bumi di pantai barat Sabah serta untuk menilai hubungan kait antara pergerakan sesar aktif tempatan dan tektonik rantau.

KEPUTUSAN

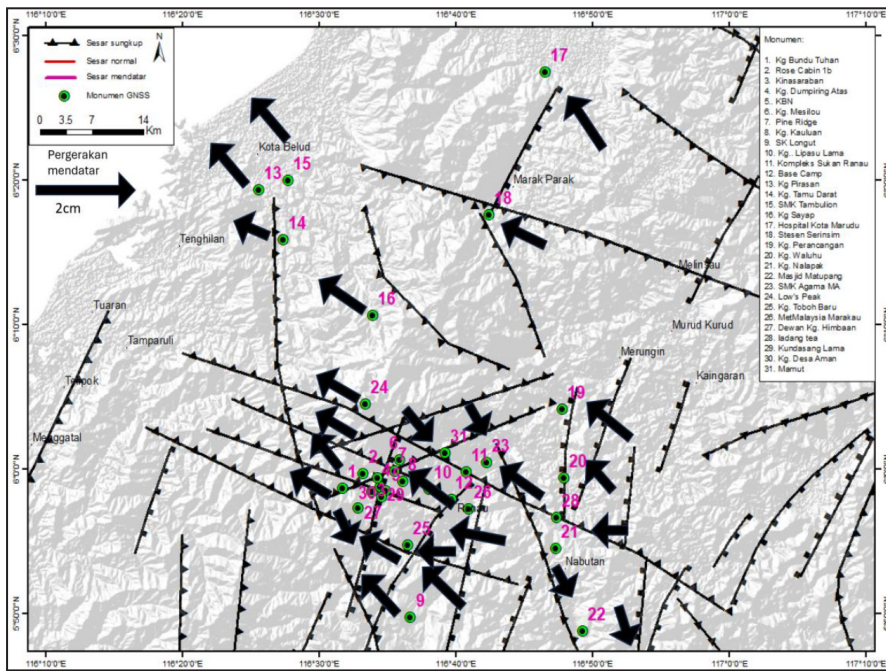
Analisis pergerakan kerak bumi berdasarkan graf pergerakan GNSS masa nyata telah dilakukan untuk tempoh lima tahun dari 2019 hingga 2024. Hasil pemerhatian menunjukkan pergerakan kerak bumi dalam dua arah utama iaitu mendatar dan menegak, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 8, Rajah 9 dan Jadual 1.

Bagi pergerakan mendatar, kadar pergerakan monumen yang direkodkan adalah antara 3 hingga 14 mm setahun. Secara keseluruhan, corak utama pergerakan adalah ke arah *NW*. Namun, terdapat beberapa kawasan yang menunjukkan pergerakan ke arah barat dan tenggara.

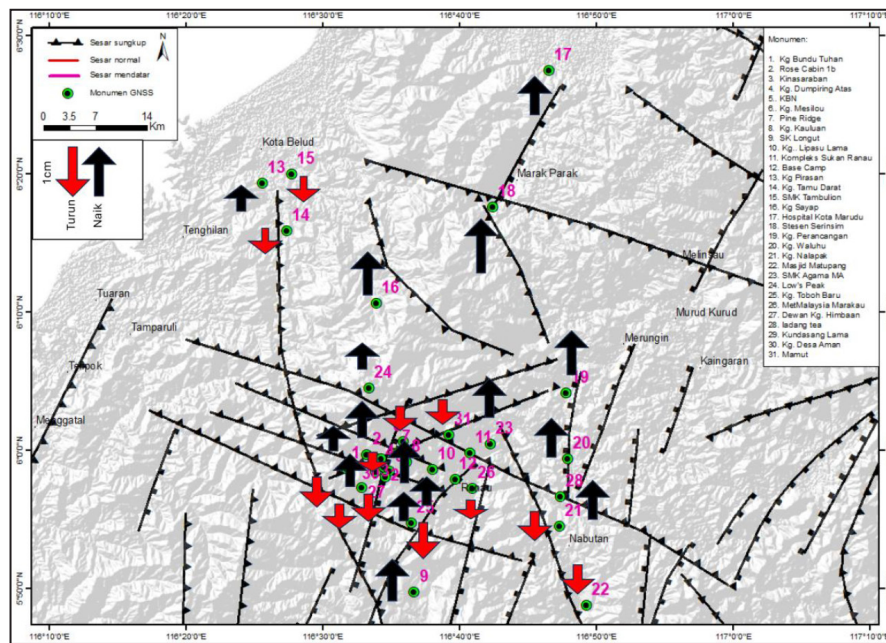
Bagi pergerakan menegak, kadar pergerakan yang direkodkan berada dalam lingkungan -10 hingga +12 mm setahun. Walaupun terdapat beberapa lokasi yang mengalami pergerakan menurun, secara keseluruhannya, pergerakan dominan adalah ke arah menaik.

PERBINCANGAN

Bacaan GNSS yang diperolehi di kawasan Ranau, Sabah, memberikan maklumat yang penting mengenai pergerakan kerak bumi di kawasan pantai barat Sabah. Secara keseluruhannya, pergerakan mendatar dan menegak yang dicatatkan oleh monumen GNSS menunjukkan dinamik geologi yang kompleks, yang bukan sahaja memberi petunjuk mengenai pergerakan kerak bumi setempat tetapi juga menggambarkan pengaruh faktor geologi dan tektonik



Rajah 8: Peta pergerakan mendatar selama 5 tahun stesen GNSS di Ranau (2019 – 2024).



Rajah 9: Peta pergerakan menegak selama 5 tahun stesen GNSS di Ranau (2019 – 2024).

yang lebih luas, terutamanya yang berkaitan dengan struktur geologi dan proses tektonik yang berlaku di pantai barat Sabah.

Pergerakan mendatar dan kaitannya dengan struktur geologi di Ranau

Bagi pergerakan mendatar, kadar pergerakan monumen GNSS yang direkodkan adalah antara 3 hingga 14 mm setahun. Secara keseluruhan, pola utama pergerakan adalah ke arah *NW*. Namun, terdapat beberapa kawasan yang menunjukkan pergerakan ke arah barat dan tenggara.

Corak pergerakan mendatar ini adalah berhubung rapat dengan aktiviti tektonik yang berlaku di kawasan Ranau dan sekitarnya, yang dipengaruhi oleh interaksi antara Plat Eurasia dan Plat Pasifik-Filipina.

Sesar aktif yang terdapat di kawasan ini memainkan peranan penting dalam mengawal pergerakan kerak bumi. Kajian oleh Golutin *et al.* (2022) telah mengenalpasti sebanyak 18 sesar utama yang mempunyai aktiviti seismik iaitu Sesar Lobou-Lobou, Sesar Mensaban, Sesar Kedamaian, Sesar Nalapak, Sesar Lipasu, Sesar Ranau, Sesar Kibbas, Sesar Nabutan, Sesar Matupang, Sesar Merungin,

Jadual 1: Kadar anjakan mendatar dan menegak monumen GNSS di kawasan Ranau untuk tempoh pemantauan dari tahun 2019 hingga 2025.

No	Monumen GNSS	Anjakan Mendatar		Anjakan Menegak	
		Anjakan (mm)	Arah	Anjakan (mm)	Arah
1	Kg. Bundu Tuhan	10	NW	-8	Menurun
2	Rose Cabin	10	NW	10	Menaik
3	Kg. Kinasaraban	9	W	5.0	Menaik
4	Kg. Desa Aman	9	SE	-5	Menurun
5	Kg. Dumpiring Atas	10	NW	-6	Menurun
6	Kem Bina Negara	10	NW	8	Menaik
7	Kg. Mesilou	8	SE	-7	Menurun
8	Pine Ridge	10	NE	10	Menaik
9	Kg. Kauluan	10	NE	9	Menaik
10	SK Longut	10	NE	10	Menaik
11	Kg. Lipasu Lama	7	NE	2.0	Menaik
12	Kompleks Sukan	11	NE	9.0	Menaik
13	Base Camp	5	NE	10	Menaik
14	Kg Pirasan	9	NE	2	Menaik
15	Kg. Tamu Darat	14	NE	-3	Menurun
16	SMK Tambulion	12	NE	-4	Menurun
17	Kg. Sayap	13	SE	10.0	Menaik
18	Hospital Kota Marudu	15	NE	8	Menaik
19	Serinsim	13	NE	7	Menaik
20	Kg. Perancangan	15	NE	12	Menaik
21	Kg. Waluhu	8	NE	11	Menaik
22	Kg. Nalapak	9	SE	-8	Menurun
23	Matupang	9	NE	-6	Menurun
24	SMK Mohamad Ali	3	SE	3	Menaik
25	Gunung Kinabalu	8	NE	6	Menaik
26	Kg. Toboh Baru	7	NE	-10	Menurun
27	Kg. Marakau	11	NE	-4	Menurun
28	Kg. Himbaan	10	NE	-10	Menurun
29	Sabah Tea	6	W	2	Menaik
30	Kundasang Lama	5	SW	-4	Menurun
31	Mamut	4	SW	-3	Menurun

Sesar Serinsim, Sesar Kijuhutan, Sesar Kapuakan, Sesar Kinapasan, Sesar Lakang, Sesar Poring, Sesar Kundasang dan Sesar Tarawas. Sesar ini menunjukkan pergerakan mendatar yang berbeza-beza bergantung kepada daya mampatan dan regangan yang dikenakan terhadap kerak bumi.

Sesar Lobou-Lobou dan Sesar Mensaban yang merentasi kawasan Kundasang merupakan sesar normal utama yang berorientasi dalam arah *NW-SE* dan *WNW-ESE*. Sesar Mensaban dikenali sebagai sesar mendatar ke kiri

(*left-lateral strike-slip fault*) yang menunjukkan pergerakan ke arah *NW*, manakala Sesar Lobou-Lobou menunjukkan pergerakan mendatar yang kompleks dengan kemungkinan pergerakan ke arah barat dan tenggara. Keberadaan sesar-sesar ini menyumbang kepada pola pergerakan mendatar yang tidak seragam di kawasan Ranau.

Selain itu, aktiviti tektonik di pantai barat Sabah, termasuk zon sesar seperti Zon Sesar Crocker (CFZ), turut memberi kesan terhadap pergerakan mendatar di kawasan ini. CFZ yang memanjang dari Tenom ke Tambunan, manakala

Sesar Lobou-Lobou di Kundasang adalah meruapakan segmen di hujung utara CFZ yang dikaitkan dengan sesar normal dengan kombinasi pergerakan mendatar yang signifikan, dimana tekanan dari interaksi plat tektonik menyebabkan sesar-sesar aktif di sekitarnya mengalami pergerakan berterusan.

Kajian oleh Ismail *et al.* (2015) dan Golutin *et al.* (2022) menunjukkan terdapat sesar-sesar normal, sesar sungkup dan sesar mendatar yang aktif di Ranau dimana sesar-sesar ini mempengaruhi pergerakan monumen GNSS yang dipantau secara aktif dan pasif. Oleh itu, pemantauan monumen GNSS secara berterusan adalah penting untuk memahami lebih lanjut tentang dinamik tektonik di kawasan Ranau serta risiko geologi yang berkaitan seperti gempa bumi dan tanah runtuh.

Secara keseluruhannya, pergerakan mendatar monumen GNSS di Ranau adalah hasil daripada interaksi kompleks antara plat tektonik rantau dan sistem sesar aktif tempatan. Pergerakan ini bukan sahaja menunjukkan kestabilan kerak bumi tetapi juga menjadi petunjuk kepada risiko geologi yang perlu diberi perhatian dalam aspek pembangunan dan mitigasi bencana.

Pergerakan menegak dan hubungannya dengan aktiviti tektonik

Pergerakan menegak monumen GNSS di kawasan Ranau turut dipengaruhi oleh kehadiran sesar sungkup seperti Sesar Poring, Sesar Kundasang, Sesar Lakang dan Sesar Luanti (Rajah 6) seperti yang dinyatakan dalam kajian Golutin *et al.* (2022). Sesar sungkup ialah sesar yang dicirikan oleh pergerakan menegak kerak bumi, dimana blok batuan pada bahagian atas sesar bergerak ke atas berbanding blok yang berada di bawahnya akibat daya mampatan yang kuat. Manakala pergerakan menurun monumen GNSS adalah dikaitkan dengan sesar normal seperti sesar utama yang melintasi kawasan Kundasang iaitu Sesar Lobou-Lobou, Sesar Lipasu, Sesar Serinsim dan Sesar Ranau (Rajah 6).

Bagi pergerakan menegak monumen GNSS, kadar pergerakan yang direkodkan berada dalam lingkungan -10 hingga +12 mm setahun. Walaupun terdapat beberapa lokasi yang mengalami pergerakan menurun, secara keseluruhannya, pergerakan dominan adalah secara menaik.

Dalam konteks Ranau, sesar berorientasi *WSW-ENE* seperti Sesar Poring, Sesar Kundasang, Sesar Lakang dan Sesar Luanti telah dikenalpasti sebagai sesar sungkup yang berpotensi menyumbang kepada pergerakan menegak yang dominannya adalah secara menaik. Golutin *et al.* (2022) mendapati bahawa sesar sungkup ini boleh menyebabkan pengangkatan kerak bumi, yang selari dengan kadar pergerakan menegak positif yang direkodkan di kawasan ini.

Selain itu, sesar lain yang dikenalpasti dalam kajian tersebut adalah seperti Sesar Kijuhutan dan Sesar Kapuakan yang turut berkemungkinan mempunyai komponen pergerakan menegak yang signifikan. Ini menjelaskan mengapa terdapat kawasan tertentu di Ranau yang

mengalami kadar kenaikan yang lebih tinggi, manakala kawasan lain pula menunjukkan penurunan akibat interaksi kompleks antara sesar sungkup dan sesar normal yang wujud di kawasan ini.

Oleh itu, pergerakan monumen GNSS secara menegak di Ranau bukan hanya hasil daripada interaksi antara Plat Eurasia dan Plat Pasifik-Filipina tetapi juga dipengaruhi oleh mekanisma sesar sungkup dan sesar normal yang aktif seperti yang dikenalpasti dalam kajian oleh Golutin *et al.* (2022).

KESIMPULAN

Kajian aktiviti seismik dan pergerakan tektonik di Ranau menunjukkan bahawa kerak bumi di kawasan ini mengalami pergerakan berterusan akibat interaksi antara Plat Eurasia dan Plat Pasifik-Filipina. Pergerakan mendatar dominan adalah ke arah *NW* dan barat pada kadar 3-14 mm setahun, manakala pergerakan menegak berada -10 mm hingga +12 mm setahun.

Struktur geologi di Ranau adalah didominasi oleh sistem sesar aktif dan lipatan mega yang terbentuk akibat tekanan tektonik yang berterusan. Kajian ini mengesahkan kehadiran lipatan mega terbuka di kawasan Kundasang-Ranau serta tegasan regangan yang berkaitan dengan sesar normal berorientasi *NE-SW* dan *NNE-SSW*, yang meningkatkan risiko kejadian gempa bumi di kawasan Ranau seperti dapatan kajian oleh Golutin *et al.* (2022).

Pergerakan relatif kerak bumi ke arah barat adalah hasil kombinasi pergerakan Plat Pasifik-Filipina yang mempunyai kadar pergerakan relatif yang lebih cepat berbanding Plat Eurasia serta tegasan regangan *NW-SE* yang bertindak sebagai tindak balas terhadap pemendekan kerak bumi dalam arah *N-S* akibat daya mampatan *N-S*.

Penggunaan teknologi GNSS membolehkan pemantauan pergerakan kerak bumi dengan ketepatan tinggi, memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang geodinamik dan struktur tektonik di Sabah. Kajian ini menekankan kepentingan pemantauan berterusan, kerjasama antarabangsa, serta pembangunan strategi mitigasi risiko dan perancangan infrastruktur bagi mengurangkan impak bencana geologi di Ranau dan kawasan sekitarnya.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan setinggi-setinggi penghargaan kepada Jabatan Mineral dan Geosains (JMG) Malaysia, khususnya Pasukan Geologi Kejuruteraan JMG Sabah, atas kerjasama dalam urusan pemasangan monumen Sistem Satelit Navigasi Global (GNSS) dan pemantauan sesar aktif di kawasan Ranau. Selain itu, ucapan terima kasih turut ditujukan kepada para penilai atas ulasan serta saranan membina yang telah menambah baik kualiti manuskrip ini secara signifikan.

SUMBANGAN PENULIS

Penulis 1 (BG) mencadangkan kajian dan metodologi, mengumpul data, menjalankan analisis, memvisualisasikan data menggunakan graf dan peta, dan menulis teks

manuskrip. Menjalankan eksperimen, mengumpul data, dan menyumbang kepada analisis data.

Penulis 2 (IAR) memainkan peranan penting dalam mentafsir penemuan, memberi maklum balas kritikal, menyemak manuskrip untuk kandungan intelektual penting, dan menyelia projek.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis mengisytiharkan tidak mempunyai sebarang konflik kepentingan.

RUJUKAN / REFERENCES

- Al Kautsar, M., Prayoga, O., Wibowo, S.T., & Sudrajat, A., 2023. Estimasi Magnitudo Gempa Bumi Alor 4 November 2015 Dengan Data GNSS CORS 1 Hz. *Geomatika*, 29(2), 99–106.
- Altamimi, Z., Collilieux, X., & Métivier, L., 2011. ITRF2008: An Improved Solution of the International Terrestrial Reference Frame. *J. Geod.*, 85, 457–473. <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0444-4>.
- Balaguru, A., & Hall, R., 2009. Tectonic Evolution and Sedimentation of Sabah, North Borneo, Malaysia. *Search and Discovery Article #30084* (2009).
- Barckhausen, U., & Roeser, H.A., 2004. Sea Floor Spreading Anomalies in the South China Sea Revisited. In: Clift, P., Wang, P., Kuhnt, W., & Hayes, D.E. (Eds.), *Continent Ocean Interactions Within the East Asian Marginal Seas*. American Geophysical Union Geophysical Monograph, 49, 121–125. <https://doi.org/10.1029/149GM07>.
- Bock, Y., Melgar, D., & Crowell, B.W., 2011. Real-time Strong-motion Broadband Displacements from Collocated GPS and Accelerometers. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 101(6), 2904–2925. <https://doi.org/10.1785/0120110007>.
- Bol, A.J., & van Hoorn, B., 1980. Structural Style in Western Sabah Offshore. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 12, 1–16.
- Briais, A., Patriat, P., & Tapponnier, P., 1993. Updated Interpretation of Magnetic Anomalies and Sea Floor Spreading Stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary Tectonics of Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research*, 98, 6299–6328.
- Collenette, P., 1958. *The Geology and Mineral Resources of the Jesselton-Kinabalu area, North Borneo*. U.S. Government Printing Office, Kuching. 194 p.
- Cottam, M.A., Hall, R., Forster, M.A., & Flecker, R., 2013. Neogene Rock Uplift and Erosion in Northern Borneo: Evidence from the Kinabalu Granite, Crocker Fan and Trusmadi Formation. *Journal of the Geological Society*, 170(5), 853–865. <https://doi.org/10.1144/jgs2012-110>.
- Cottam, M.A., Hall, R., Sperber, C., Armstrong, R.A., Ghani, A.A., & Hutchison, C.S., 2010. Pulsed Emplacement of the Mount Kinabalu Granite, Northern Borneo. *Journal of the Geological Society*, 167(1), 49–60. <https://doi.org/10.1144/0016-76492009-037>.
- Crowell, B.W., Melgar, D., Bock, Y., Haase, J.S., & Geng, J., 2013. Earthquake Magnitude Scaling Using Seismogeodetic Data. *Geophys. Res. Lett.*, 40(23), 6089–6094. <https://doi.org/10.1002/2013GL058391>.
- Franke, D., Barckhausen, U., Heyde, I., Tingay, M., & Ramli, N., 2008. *Seismic Images of a Collision Zone Offshore NW Sabah/ Borneo*. *Mar. Pet. Geol.*, 25, 606–624. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.11.004>.
- Goldberg, D.E., Melgar, D., Hayes, G.P., Crowell, B.W., & Sahakian, V.J., 2021. A Ground-Motion Model for GNSS Peak Ground Displacement. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 111(5), 2393–2407. <https://doi.org/10.1785/0120210042>.
- Golutin, B., 2020. Distribution of Ground Motion Seismic Surface Wave of the 2015 Shallow Strong Earthquake at Ranau Central Zone Seismically Active Region, Sabah, Malaysia. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 69, 67 - 77. <https://doi.org/10.7186/bgs69202006>.
- Golutin, B., 2021. *Sesar Aktif dan Pergerakan Tektonik di kawasan Ranau, Sabah*. Tesis Sarjana, Universiti Malaysia Sabah.
- Golutin, B., Tongkul, F., & Rahim, I.A., 2022. Intraplate Crustal Deformation in Sabah: Preliminary Results of Global Positioning System/Global Navigation Satellite System Measurements in the Ranau Area. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 74, 111 - 122. <https://doi.org/10.7186/bgs74202207>.
- Hall, R., 1996. Reconstructing Cenozoic SE Asia. In: Hall, R. & Blundell, D.J. (Eds.), *Tectonic Evolution of SE Asia*. Geological Society of London Special Publication, 106, 153-184.
- Hall, R., 2013. Contraction and Extension in Borneo. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76, 399-411.
- Hall, R., Cottam, M., Suggate, S., Tongkul, F., Sperber, C., & Batt, G., 2009. *The Geology of Mount Kinabalu*. Sabah Parks Publication, Kota Kinabalu. 76 p.
- Hall, R., & Wilson, M.E.J., 2000. Neogene Sutures in Eastern Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18, 787–814.
- Hamilton, W., 1979. *Tectonic Map of the Indonesian Region*. U.S. Geological Survey, Miscellaneous Investigations Series, Map I-875-D.
- Hesse, S., Back, S., & Franke, D., 2009. The Deep-Water Fold-and-Thrust Belt Offshore NW Borneo: Gravity-Driven versus Basement-Driven Shortening. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 121, 939–953. <https://doi.org/10.1130/B26411.1>.
- Hinz, K., Block, M., Kudrass, H.R., & Meyer, H., 1991. Structural Elements of the Sulu Sea, Philippines. *AAPG Bulletin*, 78, no. CONF-940803--.
- Holloway, N.H., 1982. North Palawan Block – Its Relation to Asian Mainland and Role in Evolution of South China Sea. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 66, 1355–1383.
- Hutchison, C.S., 2004. Marginal Basin Evolution: The Southern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 21, 1129–1148.
- Hutchison, C.S., 2005. *Geology of North-West Borneo*. Elsevier, Amsterdam. 444 p.
- Hutchison, C.S., Bergman, S.C., Swauger, D.A., & Graves, J.E., 2000. A Miocene Collisional Belt in North Borneo: Uplift Mechanism and Isostatic Adjustment Quantified by Thermochronology. *Journal of the Geological Society of London*, 157, 783-793.
- Ismail, A.R., Tongkul, F., Mustaffa, K.S., Tajul, A.J., Alexander, Y.S.W., Mohd Rosaidi, C.A., Noraini, S., Rozaini, I., Mohd Nazan, A., Ferdaus, A., Mohamad, M., Bailon, G., Henry, L.A., Ledyhernando, T., Zaidi, D., Roziah, C.M., Zahid, A., Rabieah, A.B., Khamarrul, A.R., & B., Harry, 2015. *Remote Sensing and Field Survey Analysis of Active Faults in Tectonically Active Areas in Malaysia*. Science fund Project 04-01-10-SF0201 Technical Report, MOSTI. 124 p.

- JMGM, 2009. Seismotectonic Map of Malaysia, Jabatan Mineral dan Geosains Malaysia.
- JMGM, 2015. Peta Geologi Sabah, Jabatan Mineral dan Geosains Malaysia.
- King, R.C., Backé, G., Morley, C.K., Hillis, R.R., & Tingay, M.R.P., 2010. Balancing Deformation in NW Borneo: Quantifying Plate-Scale vs. Gravitational Tectonics in a Delta and Deepwater Fold-Thrust Belt System. *Mar. Pet. Geol.*, 27, 238–246. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.07.008>.
- Levell, B.K., 1987. The Nature and Significance of Regional Unconformities in the Hydrocarbon-Bearing Neogene Sequences Offshore West Sabah. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 21, 55-90.
- Lunt, P., & Madon, M., 2017. Onshore to Offshore Correlation of Northern Borneo; a Regional Perspective. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 64, 101–122.
- Meilano, I., 2024. Orasi Ilmiah Guru Besar: Geodesi Gempabumi – Memahami Sumber Gempa, Mengurangi Risiko Bencana. Institut Teknologi Bandung Press, Bandung, Indonesia. 99 p. ISBN: 978-623-297-424-1.
- Melgar, D., Crowell, B.W., Geng, J., Allen, R.M., Bock, Y., Riquelme, S., Hill, E.M., Protti, M., & Ganas, A., 2015. Earthquake Magnitude Calculation Without Saturation from the Scaling of Peak Ground Displacement. *Geophys. Res. Lett.*, 42(13), 5197–5205. <https://doi.org/10.1002/2015GL064278>.
- Mohamed, A., 2012. Monitoring Active Fault in Ranau, Sabah using GPS. 19th United Nations Regional Cartographic Conference for Asia and the Pacific, Bangkok Thailand, 29 October – 1 November 2012.
- Mustafar, M.A., Simons, W.J.F., Omar, K.D., & Ambrosius, B.A.C., 2014. Monitoring of Local Deformation in North Borneo. *Proceeding of FIG Congress 2014, Engaging the Challenges, Enhancing the Relevance*, Kuala Lumpur, Malaysia, 16-21 June 2014.
- Mustafar, M.A., Simons, W.J.F., Tongkul, F., Satirapod, C., Omar, K.M., & Visser, P.N.A.M., 2017. Quantifying Deformation in North Borneo with GPS. *J. Geod.*, 91, 1241–1259. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1024-z>.
- Quinteros-Cartaya, C., Köhler, J., Li, W., Faber, J., & Srivastava, N., 2024. Exploring a CNN Model for Earthquake Magnitude Estimation Using HR-GNSS Data. *Journal of South American Earth Sciences*, 136, 104815.
- Rangin, C., Bellon, H., Benard, F., Letouzey, J., Moller, C., & Tahir, S., 1990. Neogene Arc-Continent Collision in Sabah, N. Borneo (Malaysia). *Tectonophysics*, 183(1-4), 305-319.
- Rebischung, P., Griffiths, J., Ray, J., Schmid, R., Collilieux, X., & Garayt, B., 2012. IGS08: The IGS Realization of ITRF2008. *GPS Solutions*, 16(4), 483-494. <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0248-2>.
- Sapin, F., Hermawan, I., Pubellier, M., Vigny, C. & Ringenbach, J.C., 2013. The Recent Convergence on the NW Borneo Wedge-Acrustal-Scale Gravity Gliding Evidenced from GPS. *Geophys. J. Int.*, 193, 549–556. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt054>.
- Simons, W.J.F., Socquet, A., Vigny, C., Ambrosius, B.A.C., Haji Abu, S., Promthong, C., Subarya, C., Sarsito, D.A., Matheussen, S., Morgan, P., & Spakman, W., 2007. A Decade of GPS in Southeast Asia: Resolving Sundaland Motion and Boundaries. *J. Geophys. Res.*, 112, B06420. <https://doi.org/10.1029/2005JB003868>.
- Tan, D.N.K., & Lamy, J.M., 1990. Tectonic Evolution of the NW Sabah Continental Margin Since the Late Eocene. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 27, 241-260.
- Taylor, B., & Hayes, D.E., 1983. Origin and History of the South China Sea Basin. In: Hayes, D.E. (Ed.), *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands: Part 2*. *Geophys. Monogr. Ser.*, 27. American Geophysical Union, Washington, D.C. <https://doi.org/10.1029/GM027p0023>.
- Tjia, H.D., 1974. Sense of Tectonic Transport in Intensely Deformed Trusmadi and Crocker Sediments, Ranau-Tenompok Area, Sabah. *Sains Malaysiana*, 3(2), 129-16.
- Tjia, H.D., 2007. Kundasang (Sabah) at the Intersection of Regional Fault Zones of Quaternary Age. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 53, 59-66.
- Tokuyama, A., & Yoshida, S., 1974. Kinabalu Fault, a Large Strike Slip Fault in Sabah, East Malaysia. In: Kobayashi, T., & Toriyama, R. (Eds.), *Geology and Palaeontology of Southeast Asia*. Univ. Tokyo Press, 14, 175–188.
- Tongkul, F., 1990. Structural Styles and Tectonics of Western and Northern Sabah. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 27, 227–240.
- Tongkul, F., 1991. Tectonic evolution of Sabah, Malaysia. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 6, 395–406.
- Tongkul, F., 2017. Active Tectonics in Sabah – Seismicity and Active Faults. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 64, 27–36.
- Wang, R., Parolai, S., Ge, M., Jin, M., Walter, T.R., & Zschau, J., 2013. The 2011 Mw 9.0 Tohoku Earthquake: Comparison of GPS and Strong-motion Data. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 103(2B), 1336–1347. <https://doi.org/10.1785/0120110264>.
- Wood, B.G.M., 1985. The Mechanics of Progressive Deformation in Crustal Plates: Working Model for S.E. Asia. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 18, 55–10.
- Yan, A.S.W., Suratman, S., Liau, A., Hamzah, M., Ramli, M.Y., Ariffin, H., Manap, M.A., Taib, M.B.M., Ali, A., & Tjia, H.D., 2006. Study on The Seismic and Tsunami Hazards and Risks in Malaysia: Report on the Geological and Seismotectonic Information of Malaysia. Department of Mineral and Geoscience Malaysia, Kuala Lumpur.

Manuscript received 2 January 2025;
Received in revised form 16 February 2025;
Accepted 21 March 2025
Available online 29 May 2026