

**KAJIAN GEOLOGI STRUKTUR DAMPAK PERGERAKAN SESAR
BERDASARKAN ANALISIS GEOMORFOLOGI TEKTONIK DAN
SEISMISITAS DAERAH MARUDU HINGGA PITAS, SABAH,
MALAYSIA**

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Meraih Gelar Sarjana
Program Studi Teknik Geologi Fakultas Teknik
Universitas Islam Riau



Oleh:

RAGILAYU HARDINA

213610648

**PROGRAM STUDI TEKNIK GEOLOGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM RIAU PEKANBARU**

2025

HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI SKRIPSI

**KAJIAN GEOLOGI STRUKTUR DAMPAK PERGERAKAN SESAR
BERDASARKAN ANALISIS GEOMORFOLOGI TEKTONIK DAN
SEISMISITAS DAERAH MARUDU HINGGA PITAS, SABAH,
MALAYSIA**

Disusun Oleh:



Ragil Ayu Hardina

213610648

Di periksa dan disetujui oleh : Pekanbaru, 25 April 2025

Dosen Pembimbing :



Catur Cahyaningsih, B.Sc(Hons)M.Sc

NIDN : 1021128903

Disahkan oleh :

Ka. Prodi Teknik Geologi



Budi Prayitno, ST., MT

NIDN : 1010118403

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN PENELITIAN

Dengan ini saya menyatakan :

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah di ajukan untuk mendapat gelar akademik (strata satu), baik di Universitas Islam Riau maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini merupakan gagasan, rumusan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan dosen pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas di cantumkan sebagai acuan dalam naskah, dengan di sebutkan nama pengarang dan dicatumkan sebagai acuan dalam daftar pustaka.
4. Penggunaan "software" komputer bukan menjadi tanggung jawab Universitas Islam Riau.
5. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan tidak kebenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah saya peroleh, serta sanksi lainya dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Pekanbaru, 29 Februari 2025

Penulis



Ragil Ayu Hardina

2136110648

KAJIAN GEOLOGI STRUKTUR DAMPAK PERGERAKAN SESAR BERDASARKAN ANALISIS GEOMORFOLOGI TEKTONIK DAN SEISMISITAS DAERAH MARUDU HINGGA PITAS, SABAH, MALAYSIA

SARI

Daerah penelitian berada di Daerah Marudu hingga Pitas, Sabah, yang merupakan bagian dari Pulau Borneo yang dianggap stabil sebelumnya. Penelitian tektonik dan seismisitas di Pulau Borneo, masih tergolong terbatas baik dari segi kuantitas maupun kualitas data. Sebagian besar penelitian terdahulu lebih menekankan pada aspek geologi regional, stratigrafi, sementara kajian yang secara khusus membahas aktivitas tektonik aktif masih relatif jarang. Selain itu, ketiadaan peta geomorfologi tektonik, seismisitas, skenario gempabumi yang detail menciptakan kesenjangan pengetahuan. Oleh karena itu, penulis termotivasi melakukan penelitian mengenai geomorfologi tektonik, analisis seismisitas, dan penyusunan peta neotektonik berbasis data lapangan. Metode dalam penelitian ini memadukan pengumpulan data primer dan sekunder. Data primer dianalisis di studio menggunakan berbagai perangkat lunak, seperti ArcGIS untuk pemetaan geomorfologi tektonik, GeoMapApp untuk pemetaan seismisitas, serta penerapan rumus prediksi *Moment magnitude* (M_w) guna menyusun peta skenario gempa bumi. Penelitian ini menghasilkan *output* berupa peta geomorfologi tektonik, peta seismisitas, dan peta skenario gempa bumi, yang dilengkapi dengan dokumentasi foto lapangan terkini. Geomorfologi tektonik daerah penelitian menunjukkan perkembangan 9 zona regim utama dengan dikontrol oleh 11 sesar utama. Bentuklahan yang dominan berupa lembah struktural, dengan total 45 lembah dan 12 lembah besar yang padat penduduk, yang terbentuk akibat aktivitas sesar. Secara umum, rezim tektonik didominasi oleh sesar geser mengangan (dekstral) berarah baratlaut–tenggara. Seismisitas yang direkomendasikan oleh Geomapp sangat minim, penulis memberikan 11 nilai rekomendasi *Centroid Moment Tensor* yang sangat penting untuk memberikan informasi parameter sesar. Hasil perhitungan potensi *Moment magnitude* 5,7 M_w – 6,4 M_w diklasifikasikan gempabumi sedang – kuat. Potensi terbesar gempabumi dihasilkan oleh *Tinduk – Taginambor Fault* (TTF). Bukti deformasi lapangan memperkuat aktivitas tektonik aktif, ditunjukkan oleh keberadaan punggungan, *triangular facet*, lipatan, *offset* perlapisan dan *offset vein*, serta longsoran. Analisis *Strain Riedl Shear* dari sesar Taritipan – Sulu (TSF) menghasilkan kombinasi pergeseran simpel komposit dan kompresi murni (*composite simple shear and compressive pure shear*).

Kata kunci: Tektonik, Geomorfologi Tektonik, Seismisitas, Skenario Gempabumi, *Moment magnitude* (M_w)

**GEOLOGICAL STUDY OF STRUCTURE IMPACT OF FAULT MOVEMENT
BASED ON ANALYSIS OF TECTONIC GEOMORPHOLOGY AND
SEISMICITY OF THE MARUDU TO PITAS REGION, SABAH, MALAYSIA**

ABSTRACT

The research area extends from Marudu to Pitas, Sabah, a part of Borneo Island that was previously considered stable. Research on tectonics and seismicity on Borneo Island remains limited, both in terms of data quantity and quality. Most previous studies have focused on regional geology and stratigraphy, while studies specifically addressing active tectonic activity are still relatively rare. Furthermore, the lack of detailed maps of tectonic geomorphology, seismicity, and earthquake scenarios creates a knowledge gap. Therefore, the authors were motivated to conduct research on tectonic geomorphology, seismicity analysis, and the preparation of neotectonic maps based on field data. The research method combines primary and secondary data collection. Primary data was analyzed in the studio using various software, such as ArcGIS for tectonic geomorphology mapping, GeoMapApp for seismicity mapping, and the application of prediction formulas. Moment magnitude (M_w) to compile an earthquake scenario map. This research produces output in the form of tectonic geomorphology maps, seismicity maps, and earthquake scenario maps, which are equipped with the latest field photo documentation. The tectonic geomorphology of the study area shows the development of nine main regime zones controlled by eleven major faults. The dominant landforms are structural valleys, with a total of 45 valleys and twelve large, densely populated valleys, formed by fault activity. In general, the tectonic regime is dominated by northwest-southeast-trending right-slip faults. The seismicity recommended by Geomapapp is very minimal, with the authors giving it a recommendation score of 11 Centroid Moment Tensor which is very important to provide fault parameter information. The results of the potential calculation, Moment magnitude 5.7 M_w – 6.4 M_w are classified as moderate to strong earthquakes. The greatest potential for earthquakes is generated by Tinduk – Taginambor Fault (TTF). Evidence of field deformation strengthens active tectonic activity, indicated by the presence of ridges, triangular facet, folds, offset layering and offset vein, and landslides. Analysis Strain Riedl Shear of the Taritipan – Sulu fault (TSF) produces a combination of simple composite displacement and pure compression (composite simple shear and compressive pure shear).

Keywords: *Tectonics, Tectonic Geomorphology, Seismicity, Earthquake Scenarios, Moment magnitude (M_w)*

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum wr. wb.

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi skripsi dengan judul **“Kajian Geologi Struktur Dampak Pergerakan Sesar Berdasarkan Analisis Geomorfologi Tektonik Dan Seismisitas Daerah Marudu hingga Pitas, Sabah, Malaysia”**. Laporan skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat dalam menyelesaikan studi pada Program Studi Teknik Geologi, Universitas Islam Riau.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta bimbingan selama proses penyusunan skripsi ini. Secara khusus, penulis menyampaikan terima kasih kepada dosen pembimbing, keluarga, serta rekan-rekan mahasiswa yang telah memberikan motivasi, arahan, dan dorongan yang sangat berarti.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari berbagai pihak demi perbaikan dan penyempurnaan laporan ini.

Akhir kata, semoga laporan skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang geologi, serta dapat menjadi sumbangsih dalam memahami dinamika tektonik di daerah penelitian.

Penulis

DAFTAR ISI

COVER	I
HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI SKRIPSI	II
SARI	IV
ABSTRACT	V
KATA PENGANTAR.....	VI
DAFTAR ISI	VI
DAFTAR GAMBAR	X
DAFTAR TABEL	XIII
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	16
1.5 Batasan Masalah	4
1.6 Lokasi Penelitian	5
1.7 Rencana Penelitian	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1 Geologi Regional	12
2.1.1 Geologi Borneo	12
2.1.2 Geologi Sabah	16
2.2.3 Geologi Daerah Penelitian	23
2.3 Struktur Geologi	26
2.3.1 Sesar.....	26
2.3.2 Sesar Borneo	28
2.3.3 Sesar Sabah	33

2.3.4 Lipatan	37
2.3.5 Kekar.....	38
2.4 Geomorfologi Tektonik	42
2.4.1 Punggungan	47
2.5 Focal Mechanism Solution	48
2.6 Gempabumi.....	51
BAB III METODE PENELITIAN	55
3.1 Tahap Persiapan	55
3.2 Tahap Penelitian.....	55
3.3 Tahap Pengambilan Data.....	56
3.3.1 Tahap Pengambilan Data Sekunder.....	56
3.3.2 Tahap Pengambilan Data Primer	56
3.3.3 Dokumentasi Lapangan.....	57
3.4 Analisis Data Sekunder	58
3.4.1 Geomorfologi Tektonik.....	58
3.4.2 Analisis Seismisitas.....	61
3.4.3 Area Retakan/Patahan.....	62
3.4.4 Perhitungan Moment Magnitude (Mw) Gempabumi	62
3.4.5 Sudut Kemiringan Sesar.....	63
3.4.6 Kedalaman Downtip Limit.....	63
3.4.7 Lebar Retakan/Patahan	64
3.4.8 Slip Rate.....	64
3.3.9 Moment Magnitude (Mw).....	65
3.3.10 Seismic Moment (Mo)	65
3.5 Perangkat Lunak Dan Aplikasi	66
3.5.1 Arcgis.....	66
3.5.2 Geomapapp	67
3.5.3 Georose	68
3.5.4 Faultkin	69
3.5.5 Canvas X.....	70

3.5.6 Timestamp	71
3.6 Alur Penelitian.....	72
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	74
4.1 Geomorfologi Tektonik.....	74
4.1.1 Tamalang	74
4.1.2 Kankan	77
4.1.3 Mangaris	80
4.1.4 Tandek	83
4.1.5 Matanggal	86
4.1.6 Kuppi	89
4.1.7 Manduring.....	92
4.1.8 Mempakat	95
4.1.9 Bengkoka	97
4.2 Seismisitas	100
4.3 Skenario Gempabumi	104
4.4 Bukti Deformasi Di Lapangan.....	108
4.4.1 Punggungan	109
4.4.2 Bukit Segitiga	110
4.4.3 Sesar.....	111
4.4.4 Lipatan	112
4.4.5 Offset Perlapisan.....	116
4.4.6 Offset Vein.....	117
4.4.7 Longsor	118
4.5 Pemodelan Strain Elipsoid Riedl Shear.....	119
4.6 Pemodelan 3d	120
4.6.1 Kudat.....	120
4.6.2 Marudu.....	122
4.6.3 Pitas.....	123
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	126
5.1 Kesimpulan.....	126

5.1.1 Geomorfologi Tektonik	126
5.1.2 Seismisitas	126
5.1.3 Skenario Gempabumi	127
5.1.4 Bukti Deformasi Lapangan	127
5.2 Saran	128



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Peta Administrasi Daerah Penelitian.....	6
Gambar 2. 1 Peta Tektonik Asia Tenggara	10
Gambar 2. 2 Peta Geologi Regional Borneo	15
Gambar 2. 3 Peta Geologi Sabah.....	21
Gambar 2. 4 Peta Geologi Regional Daerah Penelitian.....	25
Gambar 2. 5 Ilustrasi sesar normal, sesar naik, sesar mendatar, dan sesar oblik..	27
Gambar 2. 6 Peta Sesar Utama Borneo.....	29
Gambar 2. 7 Peta Lineamen Borneo	32
Gambar 2. 8 Peta Sesar Sabah	34
Gambar 2. 9 Pemodelan Lipatan Recumbent dan Lipatan Open (symmetrical).	38
Gambar 2. 10 Analisis Diagram Rose	40
Gambar 2. 11 Klasifikasi jenis lembah Lembah releasing bend, fault termination, pull- apart basin, dan fault branch	44
Gambar 2. 12 Ilustrasi geomorfologi fitur Triangular Facet	46
Gambar 2. 13 Ilustrasi Fitur Punggungan	48
Gambar 2. 14 Menunjukkan Aki Konvensi Aki dan Richard yang digunakan untuk tafsiran bidang sesar.....	50
Gambar 2. 15 Menunjukkan jenis Centroid Moment Tensor (CMT)	51
Gambar 3. 1 Menunjukkan bidang patahan diproyeksikan ke permukaan.....	63
Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian	73
Gambar 4. 1 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Tamalang.....	75
Gambar 4. 2 Analisis Diagram Rose (R1) Menunjukkan Arah Dominasi Punggungan Berarah Timurlaut-Baratdaya	77
Gambar 4. 3 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Kankan	79
Gambar 4. 4 Analisis Diagram Rose (R2) Menunjukkan Arah Dominasi Punggungan Berarah Timurlaut-Baratdaya	80
Gambar 4. 5 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Mangaris.....	82
Gambar 4. 6 Analisis Diagram Rose (R3) Menunjukkan Arah Dominasi Punggungan Berarah Timurlaut-Baratdaya	83
Gambar 4. 7 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Tandek.....	85

Gambar 4. 8 Analisis Diagram Rose (R4) Menunjukkan Arah Dominasi Punggungan Berarah Barat Laut – Tenggara	86
Gambar 4. 9 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Matanggal.....	88
Gambar 4. 10 Analisis Diagram Rose (R2) Menunjukkan Arah Dominasi Punggungan Berarah Timurlaut-Baratdaya	89
Gambar 4. 11 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Kuppi.....	91
Gambar 4. 12 Analisis Diagram Rose (R6) Menunjukkan Arah Dominasi Punggungan Berarah Timurlaut-Baratdaya	92
Gambar 4. 13 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Manduring	94
Gambar 4. 14 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Mempakat.....	96
Gambar 4. 15 Analisis Diagram Rose (R8) Menunjukkan Arah Dominasi Punggungan Berarah Timurlaut-Baratdaya	97
Gambar 4. 16 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Bengkoka.....	99
Gambar 4. 17 Peta Seismisitas Daerah Penelitian	102
Gambar 4. 18 Nilai Seismisitas Sesar Utama Daerah Penelitian	103
Gambar 4. 19 Peta Skenario Gempabumi Daerah Penelitian.....	108
Gambar 4. 20 Peta Bukti Lapangan dan Stasiun Lapangan	109
Gambar 4. 21 Foto Lapangan Menunjukkan Punggungan Daerah Penelitian ...	110
Gambar 4. 22 Foto Bukit Segitiga (Triangular facet) daerah penelitian.	111
Gambar 4. 23 Foto Singkapan 8 Yang Menunjukkan Sesar	111
Gambar 4. 24 Foto Singkapan Stasiun 1A Yang Menunjukkan Adanya Lipatan	113
Gambar 4. 25 Singkapan Stasiun 1B Yang Menunjukkan Adanya Lipatan	113
Gambar 4. 26 Foto Singkapan Stasiun 1C Yang Menunjukkan Adanya Lipatan	114
Gambar 4. 27 Foto Singkapan Stasiun 3 Yang Menunjukkan Adanya Lipatan.	115
Gambar 4. 28 Foto Singkapan Stasiun 10 Yang Menunjukkan Adanya Lipatan	115
Gambar 4. 29 Foto Singkapan Stasiun 11 Yang Menunjukkan Adanya Lipatan	116
Gambar 4. 30 Foto Singkapan Stasiun 3 yang menunjukkan adanya Offset	

Perlapisan	116
Gambar 4. 31 Foto Singkapan Stasiun 5 Yang Menunjukkan adanya Offset Vein	117
Gambar 4. 32 Foto Singkapan 1.D Yang Menunjukkan Adanya <i>Offset Vein</i>	118
Gambar 4. 33 Foto Bukti Lapangan Longsor Pada Stasiun 10	118
Gambar 4. 34 Pemodelan Sesar TTF Pada Daerah Penelitian Menggunakan Strain Elipsoid Riedl Shear	120
Gambar 4. 35 Pemodelan 3D Deformasi Daerah Kudat.....	121
Gambar 4. 36 Pemodelan 3D Deformasi Daerah Marudu.....	123
Gambar 4. 37 Pemodelan 3D Deformasi Daerah Pitas.....	125

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Aktivitas Penelitian	8
Tabel 2. 1 Nilai Rekomendasi BDT kawasan Sabah	23
Tabel 2. 2 Struktur Geologi Utama di Borneo	30
Tabel 2. 3 Karakteristik Sesar Utama Sabah.....	36
Tabel 2. 4 Karakteristik lipatan terbuka dan rebah	38
Tabel 2. 5 Perbandingan jenis lembah tektonik	44
Tabel 2. 6 Klasifikasi Gempabumi Berdasarkan Beberapa Kriteria.....	52
Tabel 2. 7 Penelitian Terdahulu.....	54
Tabel 4.1 Nilai Parameter Gempabumi dan Klasifikasi Sesar Daerah Penelitian	107

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu wilayah dengan kondisi tektonik paling kompleks di dunia karena terletak pada pertemuan tiga lempeng utama, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik. Interaksi ketiga lempeng tersebut menghasilkan berbagai proses tektonik aktif seperti subduksi, kolisi, pergeseran sesar, serta deformasi kerak yang intens, sehingga menjadikan Indonesia rawan terhadap kejadian gempa bumi dan bencana geologi lainnya (Hamilton, 1979; Hall, 2002). Aktivitas tektonik ini berperan penting dalam pembentukan morfologi, struktur geologi, serta pola seismisitas regional di seluruh wilayah Indonesia. Meskipun demikian, tingkat aktivitas tektonik di Indonesia tidak bersifat seragam. Beberapa wilayah, seperti Sumatra, Jawa, dan Sulawesi, telah banyak dikaji karena keterkaitannya dengan zona subduksi aktif dan sesar-sesar utama yang menghasilkan gempa bumi besar dan merusak. Sebaliknya, wilayah lain yang secara umum dianggap relatif stabil, seperti Pulau Borneo, cenderung kurang mendapat perhatian dalam kajian tektonik dan kebencanaan. Kondisi ini berpotensi menimbulkan kesenjangan pengetahuan mengenai dinamika tektonik dan potensi bahaya geologi di wilayah tersebut.

Pulau Borneo terletak di bagian tengah kawasan Asia Tenggara dan berada di antara Lempeng Eurasia dan Lempeng Laut Filipina, serta dipengaruhi oleh sistem Lempeng Mikro Sunda yang kompleks (Simandjuntak & Barber, 1996; Hall, 2013). Secara tektonik, Borneo sering diasumsikan sebagai blok yang relatif stabil dibandingkan wilayah sekitarnya. Namun, berbagai penelitian menunjukkan bahwa wilayah ini tetap mengalami proses deformasi kerak, baik akibat pengaruh regional maupun reaktivasi struktur geologi lama. Hal ini tercermin dari keberadaan sesar, lipatan, serta perubahan morfologi permukaan yang mengindikasikan aktivitas tektonik yang masih berlangsung, khususnya di wilayah Sabah. Wilayah Sabah di bagian timur laut Borneo menunjukkan karakter tektonik yang lebih kompleks dibandingkan bagian Borneo lainnya. Beberapa kejadian gempa bumi berskala

kecil hingga menengah telah tercatat, meskipun frekuensinya relatif rendah. Kejadian gempa bumi Ranau pada 5 Juni 2015 dengan besaran Mw 6,0 merupakan peristiwa seismik terbesar yang pernah tercatat di wilayah ini dalam sejarah modern dan menjadi bukti nyata bahwa wilayah Sabah memiliki potensi tektonik signifikan yang belum sepenuhnya dipahami (Tongkul, 2017). Peristiwa tersebut juga menimbulkan dampak kerusakan infrastruktur dan korban jiwa, sehingga menegaskan pentingnya kajian bahaya gempa bumi di wilayah ini.

Hingga saat ini, penelitian tektonik dan seismisitas di wilayah Borneo, khususnya Sabah, masih tergolong terbatas baik dari segi kuantitas maupun kualitas data. Sebagian besar penelitian terdahulu lebih menekankan pada aspek geologi regional, stratigrafi, sementara kajian yang secara khusus membahas aktivitas tektonik aktif masih relatif jarang. Akibatnya, informasi mengenai sebaran dan karakteristik sesar aktif, tingkat deformasi kerak, serta hubungan antara struktur geologi dan pola seismisitas belum terdokumentasi secara sistematis dan terpadu. Pendekatan geomorfologi tektonik merupakan salah satu metode yang efektif untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi aktivitas tektonik aktif melalui analisis bentuk lahan hasil deformasi kerak. Fitur geomorfologi seperti sesar, lipatan, punggung struktural, triangular facet, serta pembelokan alur sungai dapat digunakan sebagai indikator aktivitas sesar dan tingkat deformasi permukaan (Burbank & Anderson, 2013). Pemanfaatan data topografi resolusi menengah seperti *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) memungkinkan pemetaan geomorfologi tektonik dalam cakupan wilayah yang luas (Farr dkk., 2007). Namun, penerapan metode ini di wilayah Sabah masih terbatas, terutama karena tutupan vegetasi yang rapat dan morfologi yang relatif datar, sehingga banyak fitur deformasi minor dan mikrostruktur tektonik belum teridentifikasi secara optimal.

Selain keterbatasan data geomorfologi, kajian seismisitas di wilayah Sabah juga menghadapi kendala berupa minimnya data mekanisme sumber gempa (*focal mechanism*) dan parameter sesar yang terpublikasi. Informasi mengenai arah jurus (*strike*), kemiringan sesar (*dip*), arah pergeseran (*rake*), serta nilai *Moment Magnitude* (Mw) masih sangat terbatas, sehingga menyulitkan interpretasi geometri sesar aktif dan mekanisme deformasi yang bekerja di wilayah ini (Tongkul, 2017).

Kondisi ini menyebabkan sesar-sesar seperti Sesar Crocker, Sesar Ranau, dan struktur lainnya belum dapat dikarakterisasi secara memadai dari sudut pandang seismotektonik. Prediksi besaran gempa bumi di masa depan berdasarkan nilai *Moment Magnitude* (M_w) merupakan aspek penting dalam penilaian bahaya seismik. Informasi tersebut sangat dibutuhkan untuk mendukung perencanaan tata ruang, pembangunan infrastruktur tahan gempa, serta penyusunan kebijakan mitigasi bencana berbasis risiko. Namun, keterbatasan data mengenai magnitudo maksimum potensial dan karakteristik sesar aktif di wilayah Sabah hingga saat ini masih menjadi hambatan utama dalam penyusunan skenario gempabumi yang komprehensif.

Selain analisis berbasis data tidak langsung, bukti geologi permukaan seperti pergeseran sesar, offset stratigrafi, lipatan aktif, rekahan permukaan, dan longsor yang dipicu oleh aktivitas seismik merupakan indikator langsung deformasi aktif kerak bumi. Bukti lapangan ini sangat penting untuk merekonstruksi sejarah aktivitas sesar dan mengevaluasi potensi kejadian gempa bumi di masa depan. Namun, pendokumentasian ilmiah terhadap bukti-bukti deformasi permukaan di wilayah Sabah masih sangat terbatas (Hutchison, 2005; Tongkul, 2017), sehingga hubungan antara fitur geomorfologi tektonik dan kejadian seismik belum dipahami secara utuh. Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat kebutuhan mendesak untuk melakukan kajian terpadu yang mengombinasikan pemetaan geomorfologi tektonik, analisis seismisitas, serta verifikasi bukti lapangan guna memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai konfigurasi, karakteristik, dan tingkat aktivitas sesar di wilayah Sabah. Penelitian ini dilakukan untuk mengisi kesenjangan pengetahuan tersebut dengan menghasilkan peta geomorfologi tektonik skala rinci, interpretasi geometri sesar aktif, estimasi besaran gempa bumi potensial berdasarkan nilai *Moment Magnitude* (M_w), serta penyusunan peta skenario gempabumi di wilayah penelitian. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah bagi pengembangan kajian tektonik di Borneo serta menjadi dasar yang kuat bagi perencanaan mitigasi bencana dan pembangunan yang berkelanjutan serta tangguh terhadap ancaman seismik di wilayah Sabah.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah penelitian ini adalah:

- 1 Bagaimana keadaan geomorfologi tektonik di daerah penelitian?
- 2 Bagaimana keadaan seismisitas di daerah penelitian?
- 3 Bagaimana besarnya potensi *Moment magnitude* (M_w) gempa bumi dimasa depan?
- 4 Bagaimana bukti-bukti foto lapangan yang akibat proses deformasi sebagai validasi aktivitas tektonik di daerah penelitian?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan utama penelitian ini sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi dan menginterpretasikan geomorfologi tektonik di daerah penelitian
2. Mengidentifikasi dan menginterpretasikan keadaan seismisitas di daerah penelitian
3. Memprediksi besaran nilai potensi *Moment magnitude* (M_w) dimasa yang akan datang
4. Mengidentifikasi bukti-bukti foto lapangan akibat proses deformasi sebagai validasi aktivitas tektonik di daerah penelitian

1.5 Batasan Masalah

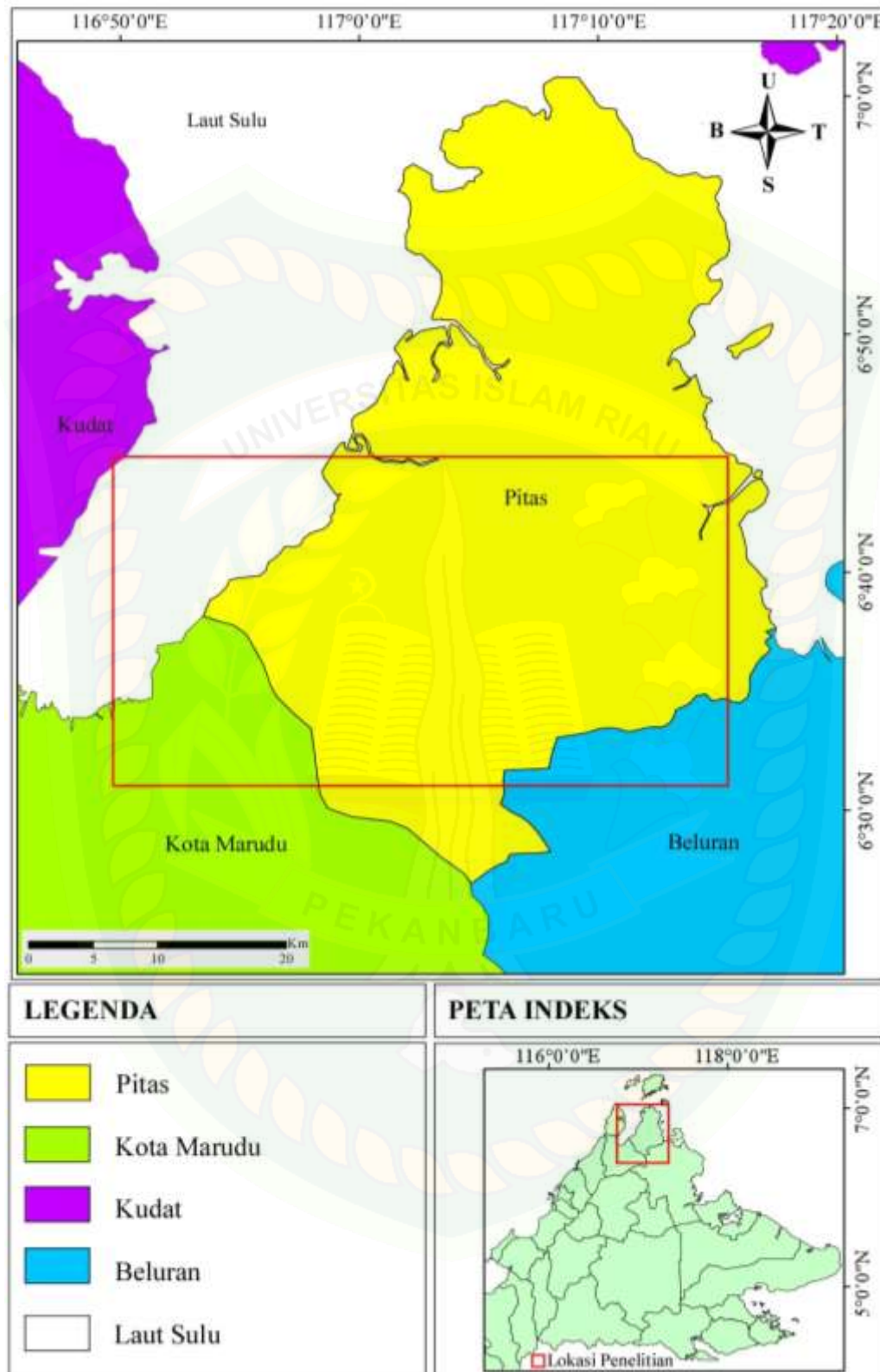
Penelitian ini dibatasi pada empat aspek utama yang berkaitan dengan dinamika tektonik di wilayah studi. Pertama, aspek geomorfologi tektonik permukaan dianalisis menggunakan citra satelit *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) beresolusi ~30 meter untuk mengidentifikasi bentuk lahan yang mengindikasikan aktivitas tektonik, seperti kelurusan morfologi, dan perbedaan elevasi. Kedua, aspek seismisitas difokuskan pada penyusunan rekomendasi geometri sesar aktif yang belum terdokumentasi sebelumnya, dengan pendekatan berbasis analisis data historis dan instrumental gempa bumi. Ketiga, dilakukan estimasi besaran *Moment magnitude* (M_w) dari gempa potensial di masa mendatang melalui pendekatan empiris berdasarkan parameter geometri sesar. Keempat, penelitian ini mencakup pengumpulan bukti geologi lapangan berupa singkapan batuan terdeformasi, struktur sesar, dan indikasi pergeseran lapisan

sebagai verifikasi interpretasi morfotektonik dan pemodelan seismik. Pembatasan ini dimaksudkan untuk memberikan fokus analisis yang terarah dan mendalam terhadap potensi deformasi dan aktivitas tektonik di wilayah penelitian.

1.6 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini terletak cukup jauh dari Universitas Islam Riau, dengan jarak sekitar ± 4000 km dari Kota Pekanbaru, sehingga akses menuju lokasi tidak dapat dilakukan secara langsung dan memerlukan waktu tempuh sekitar lima jam melalui dua kali penerbangan, yaitu dari Pekanbaru ke Kuala Lumpur, lalu dilanjutkan dengan penerbangan menuju Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia. Setelah tiba di Kota Kinabalu, perjalanan dilanjutkan dengan rute darat menggunakan kendaraan roda empat, menyusuri jalur observasi yang membentang dari Kota Marudu hingga Kota Pitas. Lokasi penelitian mencakup wilayah seluas kurang lebih ± 75 km² dan dipilih berdasarkan indikasi geomorfologi serta potensi keberadaan struktur sesar aktif yang penting untuk dianalisis.

Secara administratif lokasi penelitian meliputi Kota Marudu hingga Kota Pitas, Sabah, Malaysia, yang ditunjukkan pada peta (**Gambar 1.1**). Terletak pada koordinat $116^{\circ}50'0''\text{E}$ hingga $117^{\circ}20'0''\text{E}$ dan $6^{\circ}30'0''\text{N}$ hingga $7^{\circ}0'0''\text{N}$. Daerah penelitian disebelah Utara berbatasan dengan Laut Sulu ditandai dengan simbol warna putih, disebelah Barat berbatasan dengan daerah Kudat ditandai dengan simbol warna ungu, sebelah selatan berbatasan dengan daerah Marudu ditandai dengan simbol warna hijau, sebelah timur berbatasan dengan daerah Beluran ditandai dengan simbol warna biru.



Gambar 1. 1 Peta Administrasi Daerah Penelitian

1.7 Rencana Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dalam rentang waktu sekitar sepuluh bulan, dimulai pada minggu ketiga Juli 2025 dan berakhir pada minggu kedua April 2026, dengan tahapan kegiatan yang disusun secara sistematis dan bertahap. Pada periode awal, yaitu minggu ketiga hingga keempat Juli 2025, peneliti memfokuskan kegiatan pada tahap persiapan yang mencakup studi literatur, pengumpulan referensi, serta perumusan topik dan judul penelitian. Selanjutnya, pada minggu pertama hingga kedua Agustus 2025 dilakukan penyusunan proposal penelitian yang meliputi perumusan latar belakang, tinjauan pustaka, metodologi, serta rencana kerja penelitian. Minggu ketiga Agustus 2025 dilaksanakan Seminar Proposal sebagai bentuk evaluasi awal terhadap kelayakan penelitian.

Berikutnya, kegiatan pengambilan data lapangan dilaksanakan pada minggu keempat Agustus hingga minggu pertama September 2025. Kegiatan ini meliputi observasi langsung di lapangan, dokumentasi geomorfologi tektonik, serta pengukuran struktur geologi seperti sesar dan kekar. Secara paralel, pada minggu kedua hingga keempat September 2025 peneliti juga melakukan penguasaan perangkat lunak pendukung, seperti ArcGIS untuk pemetaan, GeoMapApp untuk analisis topografi, FaultKin untuk interpretasi struktur geologi, GeoRose untuk analisis data orientasi, serta Canvas X untuk pembuatan ilustrasi geologi.

Tahap pengolahan data dilakukan pada minggu pertama Oktober 2025 hingga minggu keempat Januari 2026. Pada tahap ini, seluruh data lapangan dan data sekunder dianalisis dan diinterpretasikan untuk menghasilkan peta geomorfologi tektonik, analisis seismisitas, serta pemodelan struktur geologi. Selanjutnya, tahap penulisan skripsi dilaksanakan pada minggu pertama Februari hingga minggu pertama April 2026, yang mencakup penyusunan hasil penelitian, pembahasan, hingga kesimpulan. Seluruh rangkaian kegiatan penelitian ini ditutup dengan pelaksanaan sidang skripsi pada minggu kedua April 2026 sebagai bentuk pertanggungjawaban akademik atas hasil penelitian yang telah dilakukan.

Tabel 1. 1 Aktivitas Penelitian

No	Aktivitas Penelitian	2025												2026																								
		Juli		Agustus			September				Oktober				November				Desember				Januari				Februari				Maret				April			
		3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4			
1	Tahap Persiapan																																					
2	Penulisan Proposal																																					
3	Seminar Proposal																																					
4	Pengambilan Data Lapangan																																					
5	Penguasaan Perangkat Lunak																																					
	a. Arcgis																																					
	b. GeomapApp																																					
	c. Faultkin																																					
	d. GeoRose																																					
	e. Canvas X																																					
6	Tahap Pengolahan Data																																					
7	Penulisan Skripsi																																					
8	Sidang Skripsi																																					

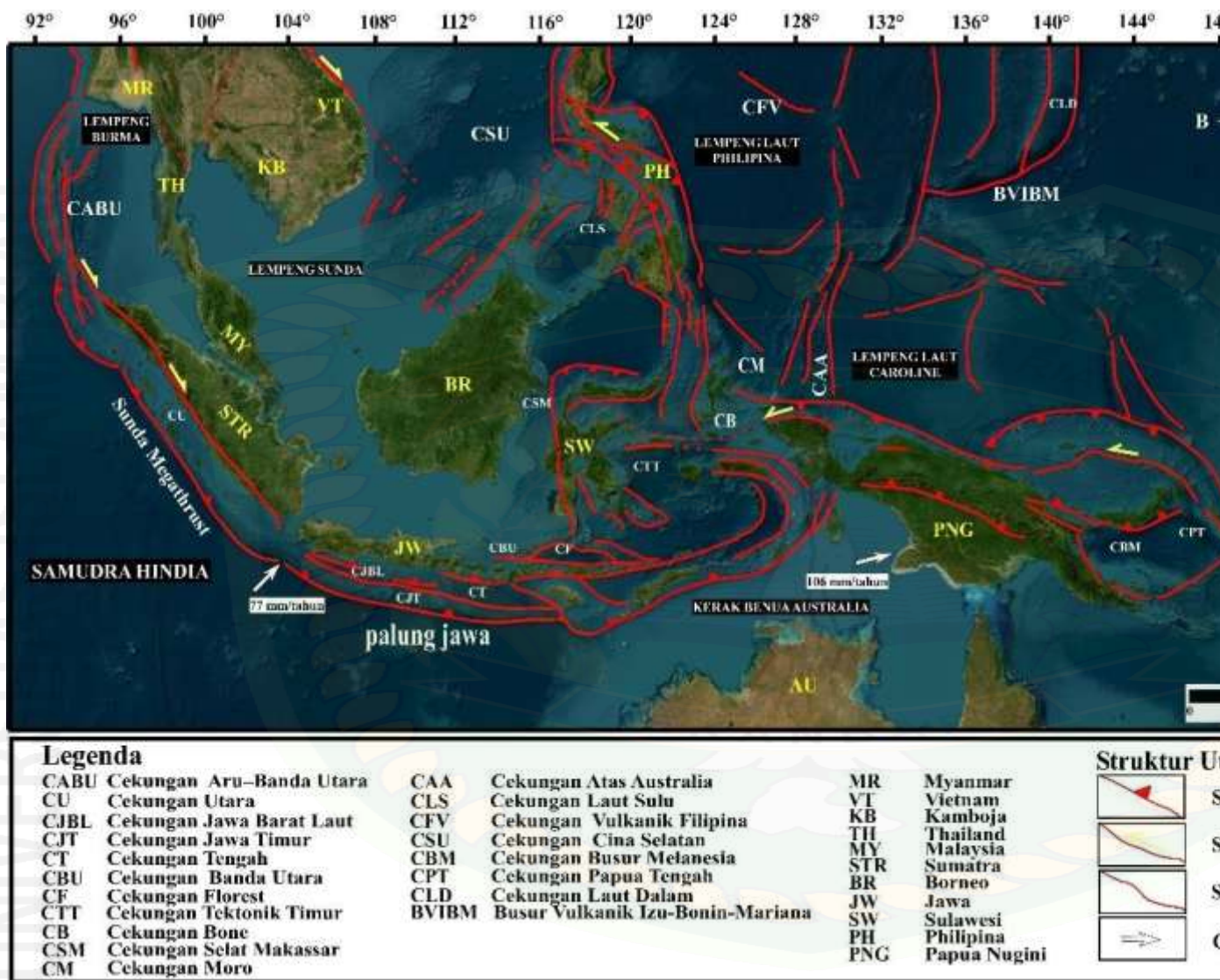
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Latar Belakang Tektonik

Pulau Borneo, yang merupakan bagian dari Lempeng Sunda di Asia Tenggara, memiliki sejarah geologi dan tektonik yang sangat kompleks dan berlangsung selama ratusan juta tahun. Evolusi tektonik pulau ini merupakan hasil dari interaksi yang dinamis antara beberapa lempeng utama, termasuk Lempeng Eurasia dan Lempeng Filipina dapat dilihat pada **Gambar 2.1**. Proses-proses seperti konvergensi, divergensi, translasi lateral, serta rotasi blok tektonik telah membentuk struktur geologi Borneo yang beragam dan unik hingga saat ini. Sejak Paleozoikum Akhir hingga Mesozoikum Awal, wilayah ini terbentuk dari beberapa fragmen benua yang berasal dari superkontinen Gondwana, seperti Blok Sibumasu dan Blok *East Malaya*, yang hanyut ke utara akibat peristiwa divergensi dan akhirnya mengalami kolisi dengan margin selatan Eurasia. Proses ini menandai dimulainya akresi kompleks yang memperkaya kerak benua Asia Tenggara, (Burret, dkk., 1990; Metcalfe, 2013).

Memasuki periode Mesozoikum, khususnya pada Jura hingga Kapur, wilayah Borneo mengalami akresi signifikan dari berbagai elemen geologi seperti terumbu karbonat, sedimen laut dalam, dan sisa busur magmatik yang terbentuk sepanjang zona penutupan Laut Paleo-Tethys. Proses ini mencerminkan sejarah panjang kolisi dan subduksi yang berlangsung antara Mikroblok Gondwana dengan margin selatan Eurasia, sehingga menghasilkan sabuk orogenik serta penebalan kerak di sebagian besar wilayah barat dan utara Borneo, (Pubellier dkk., 2003). Di awal Kenozoikum, khususnya pada kala Eosen hingga Miosen, terjadi rotasi besar dari Lempeng Eurasia yang mengakibatkan pembentukan Laut Cina Selatan melalui proses ekstensi litosfer dan pencabikan kerak benua. Bersamaan dengan itu, translasi lateral blok kerak di Kalimantan bagian utara mulai terjadi sebagai respon terhadap tegangan regional yang dipengaruhi oleh interaksi tektonik antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Filipina, (Morley, 2012).



Gambar 2. 1 Peta Tektonik Asia Tenggara

Peran Sulawesi dalam dinamika tektonik Borneo bagian timur juga sangat signifikan. Sulawesi terdiri dari berbagai *terrane* hasil tumbukan, subduksi, dan akresi, termasuk busur gunung api aktif dan sisa kerak samudra yang mengalami deformasi. Kompleksitas tersebut tercermin dalam hubungan tektonik antara Sulawesi dan Borneo, yang terbentuk akibat pergerakan konvergen antara Lempeng Australia dan Lempeng Filipina, serta translasi dari blok mikro-Lempeng Laut Sulu. Peristiwa ini, yang berlangsung sejak Miosen hingga masa kini, menimbulkan zona deformasi aktif di wilayah perbatasan timurlaut Borneo, (Zahirovic dkk., 2014). Wilayah Sabah bagian timurlaut, keragaman satuan batuan seperti ofiolit, sedimen laut dalam, dan kompleks vulkanik menunjukkan riwayat akresi yang intensif. Kehadiran ofiolit, khususnya di daerah Telupid dan Ranau, mengindikasikan adanya sisa kerak samudra yang terdorong ke atas melalui mekanisme subduksi yang telah tidak aktif lagi sejak Neogen, (Hutchison, 2007; Tongkul, 1991).

Secara geomorfologi tektonik, bagian "telinga Sabah" di sekitar Marudu dan "mulut Sabah" di pesisir timur memperlihatkan morfologi yang terdeformasi secara aktif akibat kombinasi gaya kompresi dan geser dari arah barat dan tenggara. Pola kelurusan sungai, sistem sesar berarah NNE–SSW, serta pengangkatan tektonik disepanjang pesisir timur Sabah merupakan bukti adanya proses deformasi yang masih berlangsung. Penelitian terkini mulai menyoroti wilayah Sabah sebagai zona transisi antara deformasi benua di *Sundaland* dan sistem subduksi aktif di sepanjang Lempeng Filipina. Hal ini menjadi semakin penting mengingat selama beberapa dekade, wilayah ini dianggap relatif stabil secara tektonik. Studi tentang geomorfologi tektonik, aktivitas seismik, serta dinamika blok Laut Sulu masih sangat terbatas, sehingga menyisakan ruang besar untuk penelitian lebih lanjut, (Kreemer, dkk., 2014). Kekosongan pengetahuan ini mendorong lahirnya perspektif baru bahwa Sabah bukan hanya wilayah marginal, tetapi merupakan simpul tektonik penting yang menjembatani interaksi kompleks antara blok-blok benua dan zona subduksi samudra, sekaligus menjadi kunci dalam memahami dinamika geologi Asia Tenggara secara keseluruhan.

2.2 Geologi Regional

Dalam upaya memahami karakteristik deformasi batuan dan menentukan zona *Brittle-Ductile Transition* (BDT), penulis membagi pembahasan geologi menjadi tiga skala utama: Geologi Regional Pulau Borneo, Geologi Sabah, dan Geologi Regional Daerah Penelitian (Marudu). Pendekatan ini diperlukan agar interpretasi geodinamika deformasi dapat dilakukan secara komprehensif berdasarkan kontrol struktur regional dan lokal.

2.2.1 Geologi Borneo

Pulau Borneo, sebagai pulau terbesar ke tiga di dunia dan bagian penting dari *Sundaland*, menyimpan sejarah geologi yang sangat kompleks serta beragam, hasil dari proses tektonik yang berlangsung sejak zaman kuno. Berdasarkan interpretasi peta geologi regional dan hasil pemetaan geosains modern, Borneo terdiri atas sejumlah satuan batuan dengan karakteristik litologi, umur, dan tektonik yang sangat bervariasi, mencerminkan sejarah panjang mulai dari Paleozoikum hingga Kenozoikum. Proses-proses seperti pembentukan cekungan sedimen, intrusi magmatik, akresi kerak samudra, deformasi struktural, hingga aktivitas sesar aktif yang masih berlangsung, menjadi penentu utama dalam evolusi kawasan ini (Hall, 2012; Pubellier, dkk., 2003). Setiap episode tektonik tidak hanya membentuk batuan dan struktur, tetapi juga membentuk ciri geomorfologi yang khas, yang dapat diamati hingga saat ini.

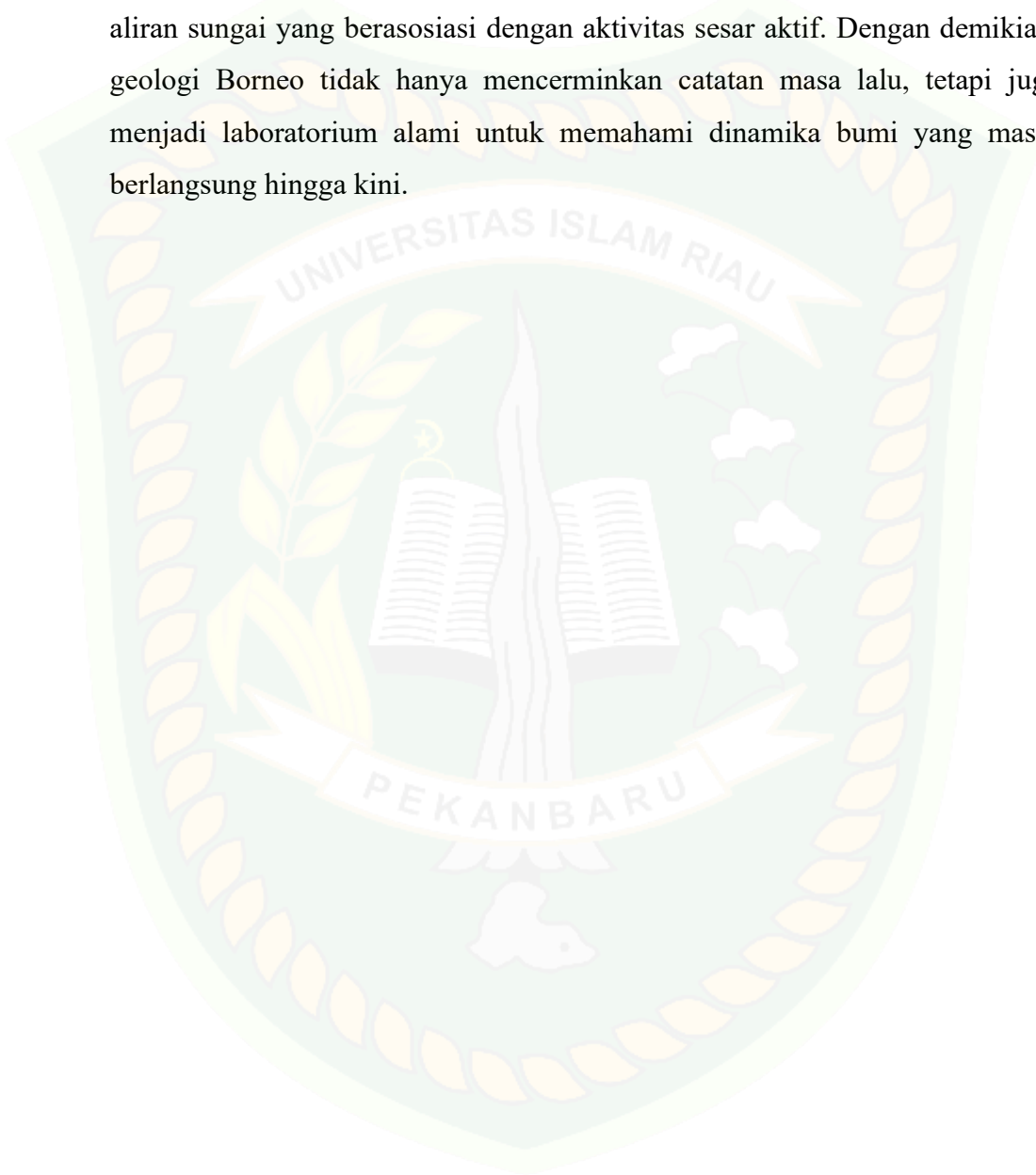
Secara stratigrafi regional, satuan batuan di Borneo dapat diklasifikasikan dari yang termuda hingga tertua, mulai dari sedimen Kuartar hingga batuan dasar yang tidak dikenali. Satuan sedimen Kuartar mencakup sekitar 16% wilayah Borneo, terdiri dari aluvium sungai, endapan pantai, dan rawa yang sebagian besar berumur Holosen hingga Pleistosen, tersebar luas di sepanjang pantai timur dan utara termasuk Delta Mahakam dan Cekungan Tarakan, (Hutchison, 2005). Cekungan busur luar Neogen Akhir menempati sekitar 6% wilayah dan terbentuk di lingkungan laut dangkal hingga deltaik, sedangkan cekungan kratonik antar pegunungan Neogen Awal mencakup 12% dan mencerminkan pengendapan yang terjadi dalam kondisi tektonik yang lebih

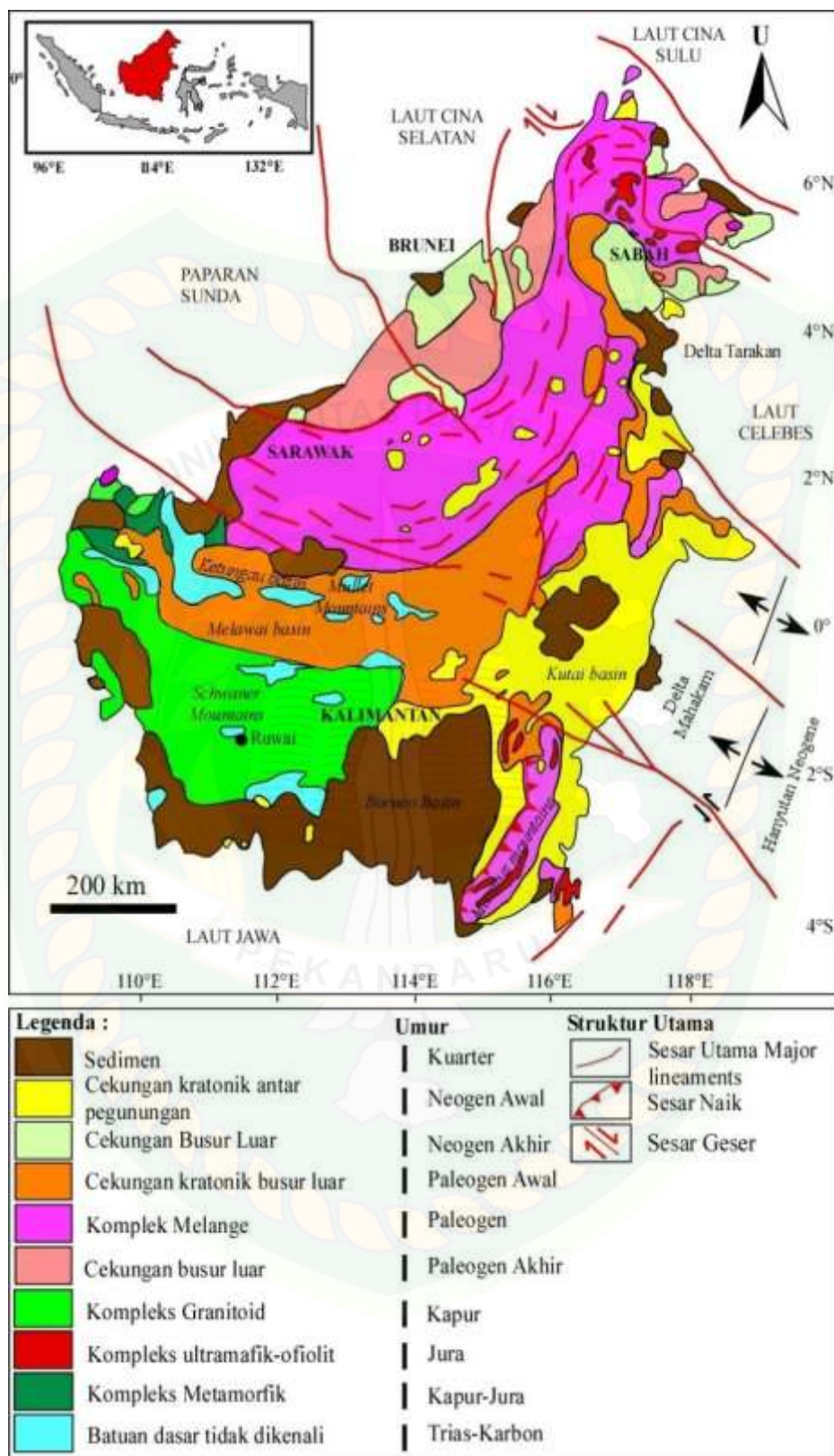
stabil dan terisolasi, (Morley, 2012). Sementara itu, cekungan busur luar Paleogen Akhir dan cekungan kratonik Paleogen Awal masing-masing mencakup sekitar 6% dan 16% wilayah Borneo, yang terbentuk melalui siklus regresi-transgresi sebagai respon terhadap dinamika subduksi dan penyesuaian isostatik regional, (Holloway, 1982).

Kemudian terdapat kehadiran satuan *melange* Paleogen yang menyusun sekitar 19% wilayah Borneo. Satuan ini merupakan hasil dari proses subduksi purba, terdiri dari ofiolit, batuan laut dalam, dan metamorf tingkat rendah, umumnya ditemukan di wilayah Sabah bagian tengah dan tenggara, (Tongkul, 1991). Kompleks granitoid berumur Kapur, seperti yang ditemukan di Gunung Kinabalu dan Pegunungan Crocker, menempati sekitar 15% wilayah dan terdiri atas granit biotit-hornblenda yang merupakan hasil dari intrusi magmatik pasca-subduksi pada Miosen Akhir. Kompleks ultramafik–ofiolit, yang menyusun sekitar 3% wilayah, adalah sisa kerak samudra purba yang terangkat akibat akresi dan tumbukan selama penutupan Laut Tethys, (Zahirovic, dkk., 2014). Batuan metamorf berumur Kapur hingga Jura menempati sekitar 3% wilayah dan menunjukkan transformasi batuan akibat tekanan dan suhu tinggi dalam skala regional. Terakhir, batuan dasar yang tidak dikenali, kemungkinan berasal dari era Karbon hingga Trias, menyusun 4% wilayah dan menjadi fondasi dari sistem geologi yang lebih muda di atasnya, (Hutchison, 2005; Hall, 2012). Peta geologi regional Borneo ditunjukkan pada **Gambar 2.2**.

Struktur-struktur geologi utama di Borneo juga menjadi indikator penting dalam memahami dinamika dan evolusi tektonik regional. Jalur-jalur sesar utama dengan orientasi barat laut–tenggara dan timur laut–barat daya membentang dari Kalimantan Barat hingga Sabah, merepresentasikan batas blok-blok tektonik hasil dari proses translasi dan rotasi lempeng sejak Mesozoikum hingga Kenozoikum, (Pubellier dan Morley, 2014). Sepanjang margin Cekungan Kutai dan Cekungan Melawai, keberadaan sesar naik memainkan peranan besar dalam membentuk morfologi tinggi seperti Pegunungan Schwanner dan Pegunungan Mullet, yang diyakini terbentuk akibat gaya kompresi dari konvergensi Lempeng Indo-Australia terhadap

Lempeng Eurasia, (Metcalf, 2013). Struktur-struktur tersebut tidak hanya berfungsi sebagai batas-batas tektonik, tetapi juga sebagai kontrol utama terhadap pola pengendapan, pengangkatan, dan deformasi yang terjadi, serta menjadi faktor penentu dalam pembentukan antiklin, kubah tektonik, dan pola aliran sungai yang berasosiasi dengan aktivitas sesar aktif. Dengan demikian, geologi Borneo tidak hanya mencerminkan catatan masa lalu, tetapi juga menjadi laboratorium alami untuk memahami dinamika bumi yang masih berlangsung hingga kini.





Gambar 2. 2 Peta Geologi Regional Borneo

1.4 Manfaat Penelitian

Melalui integrasi pendekatan geomorfologi tektonik, analisis seismisitas, penyusunan skenario gempabumi, serta verifikasi bukti lapangan geologi di wilayah Sabah, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi dalam memahami dinamika deformasi kerak bumi secara menyeluruh. Pendekatan terpadu tersebut tidak hanya memungkinkan identifikasi dan karakterisasi sesar aktif secara lebih akurat, tetapi juga mendukung analisis potensi kejadian gempabumi di masa depan. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

a. Akademik

- 1) Memberikan kontribusi ilmiah dan memperkaya literatur tektonik aktif serta seismisitas di wilayah Borneo.
- 2) Menghasilkan pemahaman holistik tentang deformasi kerak bumi melalui integrasi geomorfologi, seismisitas, dan data lapangan.
- 3) Menjadi dasar awal untuk penelitian lanjutan terkait sesar aktif, estimasi gempa (M_w), dan pemetaan bahaya gempa.

b. Pemerintah

- 1) Menjadi dasar ilmiah dalam penyusunan kebijakan mitigasi bencana gempa bumi yang berbasis data aktual.
- 2) Mendukung perencanaan tata ruang dan pembangunan infrastruktur yang mempertimbangkan risiko seismik.
- 3) Menyediakan informasi penting mengenai sebaran sesar aktif, karakteristik seismisitas, dan skenario gempabumi di wilayah Sabah

c. Masyarakat

- 1) Meningkatkan pemahaman dan kesadaran masyarakat terhadap potensi bahaya gempa bumi.
- 2) Membantu masyarakat mengenali tingkat risiko seismik dan mendorong kesiapsiagaan menghadapi bencana.
- 3) Berkontribusi pada pengurangan risiko korban jiwa dan kerugian material akibat gempa bumi.

2.1.2 Geologi Sabah

Sabah terletak di bagian utara Pulau Borneo, memiliki sejarah geologi yang sangat kompleks sebagai hasil dari interaksi lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Filipina-Pasifik. Sejak zaman Pra-Kapur, wilayah ini telah mengalami berbagai peristiwa geologi penting, termasuk subduksi dasar samudera, obduksi batuan ofiolit, kolisi antara blok-blok benua, pembentukan cekungan setelah fase kolisional, serta aktivitas vulkanik yang masih berlangsung hingga kala geologi Kuartar. Berdasarkan interpretasi geologi yang dikembangkan dan diperbarui, serta hasil studi geosains terkini, struktur geologi Sabah dapat dibagi ke dalam beberapa satuan batuan utama yang tersusun secara stratigrafi dari yang paling tua hingga yang termuda, (Tongkul, dkk., 1997; dan Tongkul, dkk., 2017). Satuan tersebut mencakup batuan dasar kristalin dan batuan ofiolit dari kala Kapur, diikuti oleh endapan laut dalam dari Formasi Crocker dan Formasi Trusmadi yang berumur mulai dari kala Paleogen hingga Neogen, kemudian disusul oleh satuan olistostrom dan sedimen hasil pengendapan setelah fase kolisional pada kala Miosen hingga Pliosen, batuan beku dan batuan piroklastik dari kala Kuartar, serta ditutupi oleh endapan sedimen aluvial muda yang mendominasi bagian permukaan wilayah tersebut.

Aktivitas tektonik ini juga didukung oleh bukti-bukti seismik yang menunjukkan adanya sesar aktif dan pola deformasi kerak bumi yang sesuai dengan rezim tekanan kompresi berarah baratlaut–tenggara, yang dihasilkan oleh gerakan konvergen Lempeng Filipina-Lempeng Pasifik terhadap tepi Lempeng Eurasia. Lebih lanjut, data paleomagnetik menunjukkan bahwa Pulau Borneo telah mengalami rotasi hampir sembilan puluh derajat berlawanan arah jarum jam sejak akhir kala Kapur hingga pertengahan kala Miosen, yang berhubungan erat dengan proses pembukaan Laut Cina Selatan serta dinamika tektonik regional di Asia Tenggara. Seluruh rangkaian proses geologi ini menciptakan arsitektur batuan dan struktur tektonik yang sangat beragam, menjadikan Sabah sebagai wilayah penting dalam kajian evolusi tektonik wilayah Sundaland dan kawasan Asia Tenggara secara keseluruhan.

Berdasarkan peta geologi Sabah yang interpretasi lebih lanjut, (Tongkul, 1997), distribusi satuan batuan di wilayah ini mencerminkan evolusi geologi yang panjang dan kompleks dari zaman Pra-Kapur hingga Kuartar. Batuan dasar berumur Pra-Kapur ditandai dengan simbol berwarna merah dan tersingkap terutama di bagian tenggara peta dengan persebaran sekitar 5%. Sedimen berumur Paleogen Awal hingga Kapur ditandai dengan warna biru yang mendominasi wilayah selatan dan tenggara pada peta, meliputi sekitar 20% dari total luas, menunjukkan proses pengendapan laut dalam pada masa awal pembentukan cekungan. Di atasnya terdapat satuan ofiolit berumur Eosen yang diberi simbol warna ungu, juga dominan di tenggara dan tengah pada peta dengan sebaran sekitar 10%, mencerminkan hasil obduksi kerak samudera pada masa tersebut. Selanjutnya, sedimen Paleogen Akhir hingga Neogen Awal yang ditandai dengan warna oranye muda merupakan unit batuan terluas dengan cakupan sekitar 20%, tersebar dominan di bagian baratdaya hingga timurlaut dan mencerminkan pengendapan turbidit dalam lingkungan laut dalam.

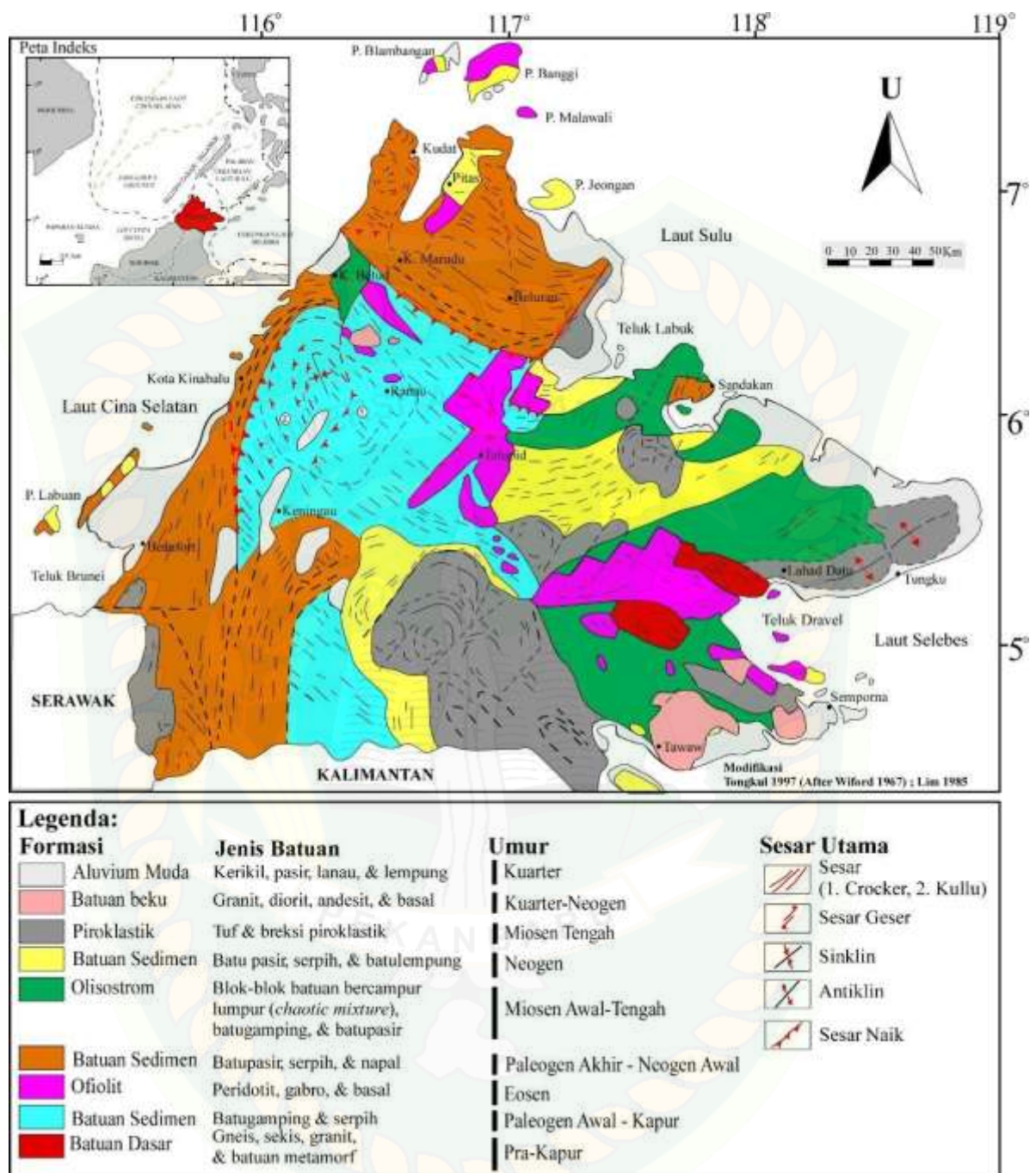
Piroklastik yang terbentuk pada zaman Miosen Tengah ditandai dengan warna abu-abu tua, dengan persebaran di bagian tenggara hingga selatan pada peta dengan persentase sebaran 10%. Bagian timur hingga tenggara, terdapat satuan olistostrom berumur Miosen Awal hingga Tengah dengan simbol warna hijau yang menyebar sekitar 10%, hasil dari proses kolisional dan pergerakan massa batuan besar. Sedimen Neogen ditandai dengan warna kuning mendominasi wilayah selatan dan timur, meliputi sekitar 10% dari peta, merupakan endapan fluvial dan delta yang terbentuk pasca-kolisi. Kemudian, satuan batuan beku berumur Kuartar hingga Neogen yang dilambangkan dengan warna merah muda, tersebar sekitar 5% di wilayah tenggara, menandai fase transisi tektonik pasca-tekan. Terakhir, sedimen Kuartar yang ditandai dengan warna abu-abu menunjukkan persebaran sekitar %, dominan di sepanjang pesisir barat laut, mencerminkan akumulasi sedimen paling muda dalam lingkungan pantai dan aluvial. Distribusi dan urutan stratigrafi ini secara keseluruhan menggambarkan perjalanan geotektonik Sabah dari fase subduksi dan obduksi, pembentukan cekungan laut dalam,

kolisi dan *uplift*, hingga aktivitas vulkanik dan sedimentasi modern, menjadikan wilayah ini penting dalam studi evolusi geologi Asia Tenggara (Tongkul, 1997; Tongkul, 2017; Hutchison, 2005). Peta geologi regional Sabah ditunjukkan pada **Gambar 2.3**.

Struktur geologi yang berkembang di wilayah Sabah merepresentasikan hasil dari deformasi tektonik multi fase yang berlangsung sejak zaman Oligosen hingga Kuartar, mencerminkan kompleksitas proses geodinamika di kawasan tepi aktif Lempeng Eurasia. keberadaan sesar geser berorientasi timurlaut–baratdaya seperti Sesar Telupid dan Sesar Lahad Datu mencerminkan aktivitas transpresi dan pergeseran lateral antar mikroblok yang disebabkan oleh rotasi dan interaksi Lempeng Filipina – Lempeng Pasifik terhadap margin timur *Sundaland*, (Tongkul 1997). Bagian barat dan tengah Sabah, berkembang sesar naik yang memicu pelipatan intensif, khususnya pada Formasi Crocker, yang merupakan hasil dari tekanan tektonik selama fase kompresi Oligosen–Miosen, (Hutchison, 2005; Hall, 2009). Pelipatan ini membentuk struktur sinklin dan antiklin yang menandai deformasi regional yang luas. Selain itu, kehadiran dua struktur linear besar, yaitu Sesar Crocker dan Sesar Kallu, memperlihatkan kontrol struktural yang kuat terhadap orientasi lipatan dan sesar regional, mendukung interpretasi adanya fase deformasi bertahap dari kompresi awal hingga transpresi akhir, (Balaguru, dkk., 2003). Keseluruhan pola ini menegaskan bahwa Sabah terbentuk bukan hanya melalui satu mekanisme tektonik, melainkan sebagai hasil akumulasi berbagai gaya deformasi, termasuk subduksi, kolisi, dan rotasi blok, yang masih berlangsung secara aktif hingga zaman Kuartar. Oleh karena itu, Sabah menjadi salah satu wilayah kunci dalam studi evolusi tektonik di Asia Tenggara, terutama dalam konteks interaksi lempeng, dinamika busur pulau, dan pembentukan cekungan pasca-kolisi.

Peta geologi Sabah memberikan landasan penting dalam analisis nilai *Brittle-Ductile Transition* (BDT) merupakan batas kedalaman dimana batuan kerak mengalami transisi dari deformasi rapuh (*brittle*) ke deformasi plastis (*ductile*). Penentuan kedalaman BDT sangat bergantung pada beberapa

parameter geologi dan geofisika, termasuk gradien geothermal, komposisi litologi kerak, serta umur dan sejarah tektonik batuan. Sabah, yang umumnya didominasi oleh satuan batuan sedimen dari kala Paleogen hingga Neogen, serta keberadaan terbatas dari batuan kristalin dan intrusi ofiolitik, kedalaman BDT secara umum diperkirakan berada dalam kisaran 4 hingga 10 kilometer. Estimasi ini didasarkan pada studi laboratorium dan pemodelan geothermal yang menunjukkan bahwa batuan sedimen dan batuan ofiolit mengalami transisi dari deformasi rapuh ke plastis (*brittle – ductile*) pada suhu sekitar 300°C hingga 450°C, yang biasanya dicapai pada kedalaman antara 15 hingga 18 kilometer dalam kondisi gradien geotermal sebesar 25 hingga 30°C per kilometer, (Hyndman dkk., 1997; Sibson, 1984). Nilai ini memiliki implikasi signifikan terhadap pemahaman mekanisme seismotektonik dan akomodasi deformasi di zona kerak Sabah, terutama dalam konteks keberadaan sesar aktif dan sejarah deformasi multifase yang kompleks.



Gambar 2. 3 Peta Geologi Sabah

Interpretasi zona *Brittle–Ductile Transition* (BDT) di wilayah Sabah, berdasarkan peta geologi yang tersedia, dapat dilakukan dengan mengaitkan jenis satuan batuan, umur, serta litologi dominan terhadap nilai kedalaman dan suhu BDT. Satuan batuan dasar (*basement*) kristalin Pra-Kapur, yang

tersusun atas batuan granitik dan metamorfik, umumnya memiliki kedalaman BDT yang relatif dalam, yaitu sekitar 12–18 km dengan suhu transisi berkisar 300–450°C karena karakteristik batuan yang keras dan tahan deformasi plastis (Bürgmann dan Dresen, 2008). Pada penelitian ini menerapkan batas *downdip* maksimum pada kedalaman 18 kilometer sebagai asumsi konservatif berdasarkan suhu transisi antara 400 sampai 450° Celcius, yang umum dijumpai pada batuan ofiolit dan sedimen termal tinggi, (Hall, 2012; Cattin dan Avouac, 2000). Pada satuan ofiolit Kapur–Eosen, yang terdiri atas batuan ultrabasa seperti peridotit dan basal, nilai BDT berada pada kedalaman sekitar 10–15 km dengan suhu transisi 300–400°C, mencerminkan zona campuran antara deformasi rapuh dan duktil (*brittle-ductile*) yang seringkali berkaitan dengan zona sesar aktif (Hirth dan Kohlstedt, 2003). Satuan sedimen Kapur hingga Paleosen, seperti batupasir dan batugamping, menunjukkan BDT pada kisaran 7–10 km dengan suhu sekitar 250–350°C, sementara sedimen Paleogen hingga Neogen awal yang lebih lunak (batulempung, serpih) memiliki transisi lebih dangkal sekitar 6–9 km. Pada satuan yang lebih muda seperti olistostrom Miosen Awal–Tengah dan sedimen Neogen, BDT diperkirakan berada hanya pada kedalaman 4–8 km dengan suhu 150–280°C, mencerminkan kemampuan deformasi rapuh pada kedalaman yang lebih dangkal akibat kompaksi rendah dan tingkat penghalusan struktur yang belum tinggi. Satuan piroklastik Miosen dan batuan beku Kuartir–Neogen juga menunjukkan transisi pada 6–14 km tergantung tingkat rekristalisasi dan pendinginannya. Sementara itu, aluvium Kuartir, yang terdiri atas material lepas seperti pasir dan kerikil, berada di permukaan (<1 km) dan tidak relevan untuk penentuan BDT karena belum mengalami proses litifikasi atau tekanan geologi signifikan. Oleh karena itu, pemahaman terhadap variasi litologi dan umurnya sangat penting dalam menentukan karakteristik mekanik kerak serta dalam memetakan zona potensi deformasi tektonik yang aktif, (Bürgmann dan Dresen, 2008; Hirth dan Kohlstedt, 2003). Nilai rekomendasi BDT di daerah Sabah berdasarkan geologi regional Sabah ditunjukkan pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2. 1 Nilai Rekomendasi BDT kawasan Sabah

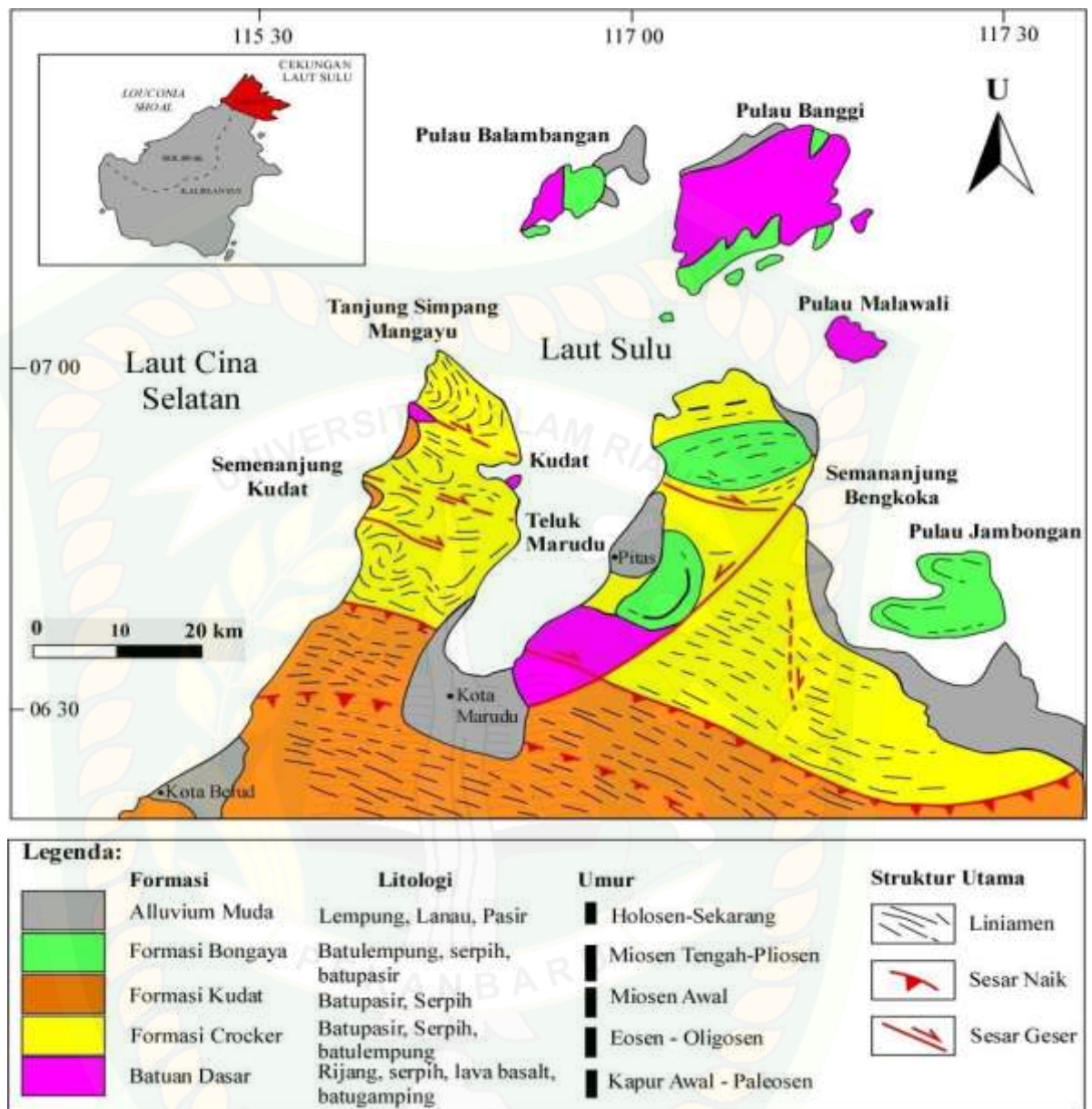
NO	SATUAN GEOLOGI/ WARNA	LITOLOGI DOMINAN	UMUR	ESTIMASI KEDALAMAN	ESTIMASI SUHU BDT	KETERANGAN
1	Basement Kristalin Pra-Kapur (Merah)	Batuan metamorfik, granit, tonalit	Pra-Kapur (Pre-Cretaceous)	12–18 km	300–450°C	Zona duktil dominan; BDT relatif dalam karena batuan kuat dan rekristalisasi.
2	Ophiolit Kapur – Eosen (Magenta)	Peridotit, gahro, basal, rijang	Kapur–Eosen	10–15 km	300–400°C	Zona campuran brittle–ductile, banyak menunjukkan zona geser aktif.
3	Sedimen Kapur– Paleogen Awal (Kuning)	Batupasir, serpih, batugamping	Kapur–Paleosen	7–10 km	250–350°C	Sedimen kompak, transisi berada pada kedalaman menengah.
4	Sedimen Paleogen Akhir–Neogen Awal (Hijau)	Serpih, batupasir, napal	Eosen– Miosen Awal	6–9 km	200–300°C	Batuan lebih lunak, transisi bisa lebih dangkal.
5	Ofisostrom Miosen Awal–Tengah (Biru terang)	Campuran klastik besar, breksi, batulempung	Miosen Awal– Tengah	5–8 km	180–280°C	Batuan tidak kompak, mudah terdeformasi secara rapuh.
6	Sedimen Neogen (Hijau muda)	Batulempung, lanau, batupasir	Neogen	4–7 km	150–250°C	Batuan relatif muda dan lemah, transisi dangkal.
7	Piroklastik Miosen Tengah (Oranye kekuningan)	Tuf, ignimbrit, breksi piroklastik	Miosen Tengah	6–10 km	200–300°C	Jika terlasifikasi baik, bisa duktil pada kedalaman menengah.
8	Batuan Beku Kuartir–Neogen (Merah muda)	Andesit, basal, dasit	Neogen–Kuartir	10–14 km	300–400°C	Batuan keras; BDT relatif lebih dalam.
9	Aluvium Kuartir (Abu-abu terang)	Pasir, lanau, kerikil	Kuartir	<1 km	<100°C	Tidak relevan untuk BDT; hanya zona permukaan.

2.2.3 Geologi Daerah Penelitian

Pada peta geologi daerah Marudu, Sabah, dapat disusun dari satuan tertua hingga termuda terdiri dari batuan dasar berumur Kapur Awal–Paleosen tersusun atas rijang, serpih, lava basal, dan batugamping, tersebar sekitar 10% yang ditandai dengan simbol berwarna merah muda di bagian timur dan pulau seperti Banggi dapat dilihat pada **Gambar 2.4**. Di atasnya, Formasi Crocker berumur Eosen hingga Oligosen mendominasi sekitar 40% wilayah dengan litologi batupasir, serpih, dan batulempung yang merepresentasikan endapan laut dalam (*turbidit*) ditandai dengan simbol berwarna kuning, (Hutchison, 2005; Tongkul, 1997). Kemudian Formasi Kudat yang berumur Miosen Awal, mencakup sekitar 25% wilayah terutama di Semenanjung Kudat dan Bengkoka, terdiri dari batupasir dan serpih sebagai hasil pengendapan laut dangkal hingga darat ditandai dengan simbol berwarna kuning kecoklatan. Selanjutnya Formasi Bongaya berumur Miosen Tengah–Pliosen dengan sebaran sekitar 15%, terdiri atas batulempung,

serpih, dan batupasir, yang dijumpai terutama di wilayah Pitas dan pulau-pulau kecil ditandai dengan warna hijau. Sedangkan satuan termuda adalah Aluvium Muda berumur Holosen hingga sekarang, mencakup sekitar 10% wilayah dan terdiri dari lempung, lanau, serta pasir, yang mengisi lembah-lembah sungai dan dataran rendah ditandai dengan warna abu-abu. Informasi sekuen litologi ini penting dalam menafsirkan kondisi bawah permukaan dan membantu dalam analisis zona transisi rapuh – daktil (*brittle-ductile*) yang dikontrol oleh variasi litologi dan sejarah deformasi masing-masing satuan.

Terdapat sesar pada daerah penelitian dapat dilihat pada peta geologi daerah Marudu, Sabah, struktur struktur ini memiliki peran penting dalam mengontrol tatanan struktur dan evolusi tektonik wilayah tersebut. Sesar naik yang tersebar di bagian barat daya mencerminkan gaya kompresi intens yang menyebabkan penumpukan dan pelipatan satuan batuan seperti Formasi Crocker dan batuan dasar, serta mendorong satuan yang lebih tua di atas yang lebih muda, (Tongkul, 2017). Di sisi lain, sesar geser yang memotong wilayah tengah hingga timur, seperti di sekitar Teluk Marudu dan Pitas, menunjukkan aktivitas geser horizontal yang menggeser posisi formasi secara lateral dan memfasilitasi jalur deformasi serta rekahan batuan. Keberadaan sesar-sesar ini tidak hanya menunjukkan dinamika tektonik Sabah yang kompleks, tetapi juga menjadi elemen penting dalam menentukan potensi zona *Brittle-Ductile Transition* (BDT), karena sesar merupakan jalur utama konsentrasi tegasan dan perubahan perilaku mekanik batuan pada berbagai kedalaman, (Bürgmann dan Dresen, 2008; Hirth dan Kohlstedt, 2003).



Gambar 2. 4 Peta Geologi Regional Daerah Penelitian

2.3 Struktur Geologi

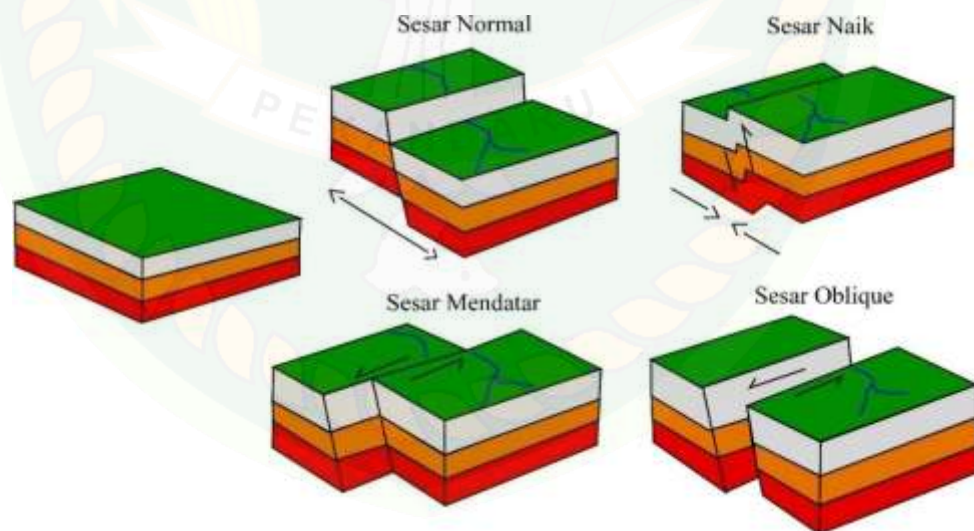
Sub bab ini membahas secara detail mengenai definisi sesar, sesar aktif Borneo, dan sesar aktif Sabah, lipatan dan kekar.

2.3.1 Sesar

Sesar (*fault*) merupakan bidang diskontinuitas atau rekahan sepanjang mana terjadi perpindahan relatif antara dua blok batuan akibat gaya tektonik. Berdasarkan arah pergeseran relatif dan komponen gerakannya, sesar diklasifikasikan menjadi lima tipe utama, yaitu sesar normal, sesar naik, sesar mendatar, dan sesar oblik (gabungan antara geser dan vertikal), ditunjukkan pada **Gambar 2.5**. Sesar normal terbentuk sebagai hasil dari gaya ekstensional (tensional) di mana blok yang berada di bagian atas bidang sesar (*hanging wall*) bergerak turun relatif terhadap blok bawah (*footwall*). Sesar ini umum dijumpai di zona kerak yang mengalami penipisan seperti cekungan *rift* atau zona pasif margin, (Twiss dan Moores, 2007). Sebaliknya, sesar naik (*reverse fault*) dihasilkan oleh gaya kompresional, di mana *hanging wall* bergerak naik relatif terhadap *footwall*. Bila sudut kemiringan bidang sesar sangat landai ($<30^\circ$), sesar ini disebut sebagai *thrust fault*, dan biasanya diasosiasikan dengan zona orogenik seperti sabuk pegunungan, (Fossen, 2016). Sesar mendatar atau *strike-slip fault* memiliki arah pergeseran mendatar sejajar dengan jurus bidang sesar, tanpa komponen vertikal signifikan. Sesar ini dibedakan menjadi *sinistral* (kiri) dan *dekstral* (kanan) tergantung arah gerakan blok relatif.

Salah satu metode penting yang digunakan adalah pemetaan struktur menggunakan citra *hillshade*, yang berasal dari data ketinggian permukaan bumi atau *Digital Elevation Model* (DEM). Citra ini dapat menampilkan bentuk-bentuk halus di permukaan bumi, seperti garis patahan atau kelurusan lereng, bahkan di daerah yang tertutup hutan atau tidak memiliki singkapan batuan. Dalam proses pemetaan sesar, digunakan simbol geologi yang menunjukkan tingkat kepastian data. Garis merah tebal menandakan sesar yang telah terkonfirmasi melalui data lapangan, sementara garis merah putus-putus menunjukkan sesar yang masih diduga berdasarkan bentuk morfologi

dan pola sungai, (Twiss dan Moores, 2007). Kombinasi antara peta yang pasti dan yang masih berupa dugaan ini penting untuk mengetahui apakah dua bagian sesar yang terpisah sebenarnya masih berhubungan dan merupakan bagian dari satu sistem yang sama. Untuk membantu memahami arah kemiringan sesar, digunakan prinsip yang disebut Hukum V, yaitu bentuk huruf V pada garis kontur yang menunjukkan arah kemiringan bidang sesar. Jika bentuk V mengarah ke hulu sungai, maka bidang sesar miring ke arah hulu. Sebaliknya, jika mengarah ke hilir, maka kemiringannya berlawanan arah. Dalam penelitian ini, gabungan antara citra *hillshade* dan prinsip Hukum V digunakan untuk mengetahui arah dan kemiringan sesar yang tidak terlihat langsung di lapangan. Salah satu hasil yang diperoleh adalah identifikasi sesar oblik dengan pergerakan naik dan geser ke kanan, yang memiliki kemiringan rata-rata sebesar tiga puluh lima derajat ke arah timurlaut. Temuan ini ditandai dengan bentuk lipatan yang tidak simetris dan pola V yang tajam ke arah hulu. Pendekatan ini terbukti dapat meningkatkan ketepatan dalam memetakan struktur geologi, serta sangat berguna dalam memahami pola pergeseran batuan dan potensi gempa di daerah tektonik aktif seperti Sabah.

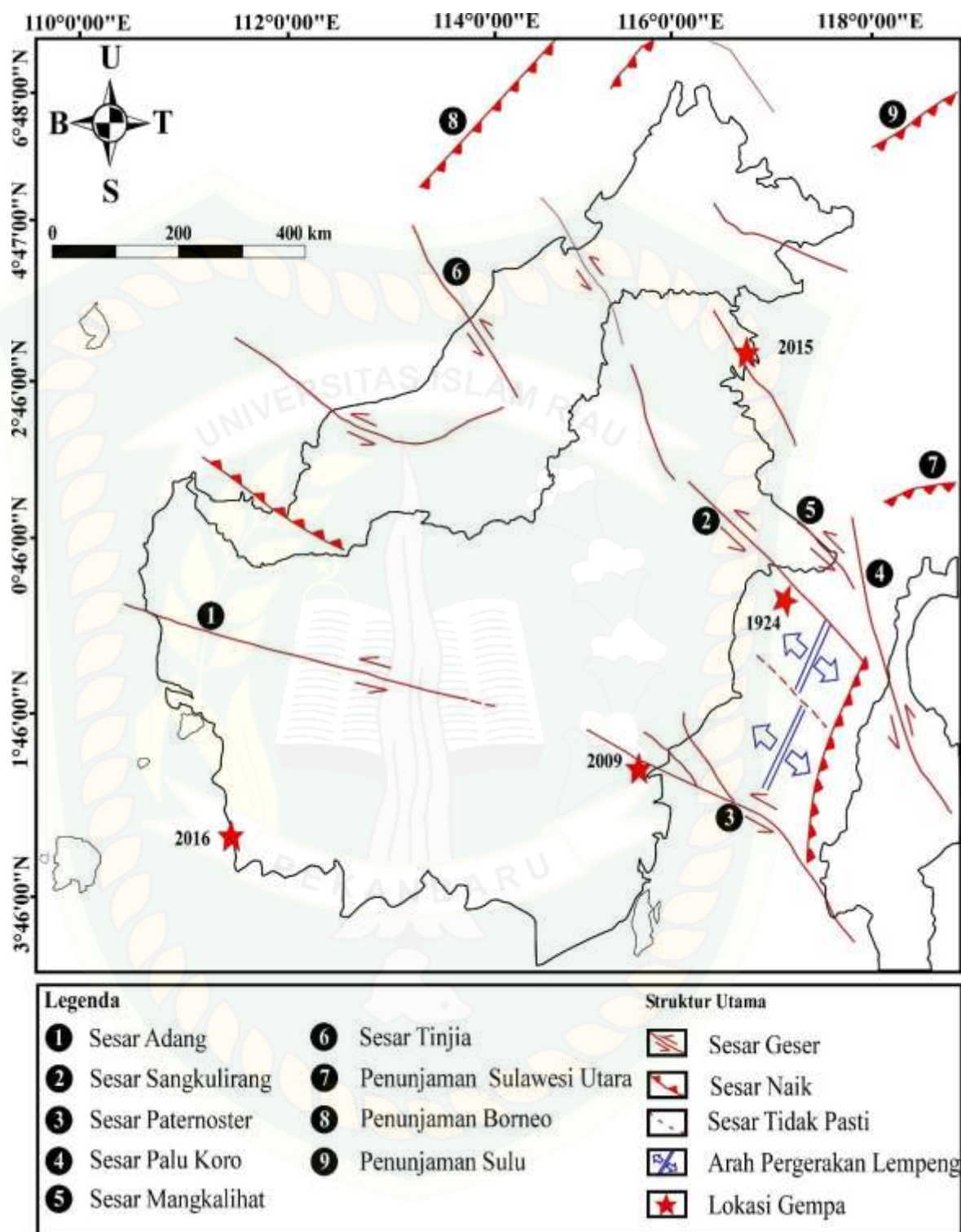


Gambar 2. 5 Ilustrasi sesar normal, sesar naik, sesar mendatar, dan sesar oblik

2.3.2 Sesar Borneo

Peta struktur geologi regional Pulau Borneo menunjukkan keberadaan sejumlah sesar utama dan zona subduksi aktif yang mencerminkan kompleksitas tektonik kawasan ini. Secara umum, Borneo dikelilingi oleh sistem konvergen dan sesar mendatar yang aktif secara tektonik. Di bagian utara, teridentifikasi zona penunjaman Borneo dan Sulu, yang merupakan hasil dari tumbukan antara Lempeng Laut Cina Selatan dengan busur kepulauan di Filipina Selatan ditunjukkan pada **Gambar 2.6**. Zona ini ditandai dengan arah konvergensi ke selatan dan menciptakan deformasi kompresional di Kalimantan Utara serta kawasan Sabah, (Hall, 2013).

Sistem sesar besar seperti Sesar Tanjung Selor, Sesar Mangkalihat, dan Sesar Adang menunjukkan gerakan dominan mendatar/geser (*strike-slip*), yang mengontrol orientasi struktur dan segmentasi kerak di Kalimantan bagian tengah dan timur. Keberadaan Sesar Mangkalihat, misalnya, berperan penting dalam membentuk jalur patahan yang menghubungkan zona subduksi Laut Sulu dengan Laut Sulawesi. Sementara itu, Sesar Tinjia dan Sesar Sangkulirang memotong Kalimantan Tengah dengan gerakan geser sinistral (kiri) yang diinterpretasikan sebagai respons terhadap tekanan regional akibat interaksi Lempeng Indo-Lempeng Australia dan Lempeng Eurasia, (Pubellier dkk., 2003; Moss dan Wilson, 1998).



Gambar 2. 6 Peta Sesar Utama Borneo

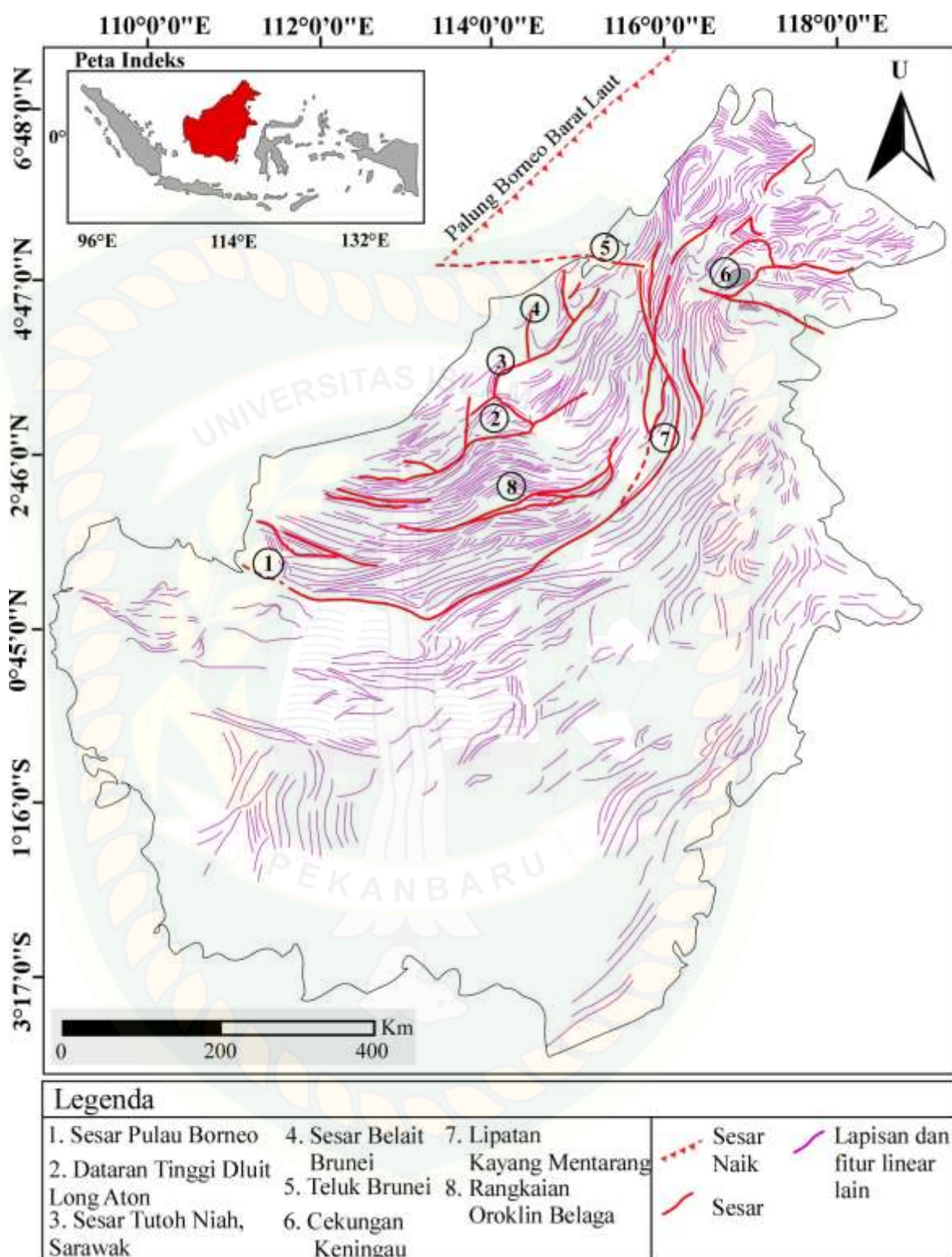
Bagian tenggara Kalimantan, Sesar Paternoster dan Sesar Palu - Sesar Koro menjadi struktur dominan yang menunjukkan gerakan geser dekstral (kanan), berperan sebagai batas tektonik antara Kalimantan dan Sulawesi Barat. Kedua sesar ini memiliki potensi seismik tinggi karena mengakomodasi pergerakan tektonik antar lempeng dengan laju deformasi signifikan. Adanya episentrum gempa tahun 2009 dan 2016 di kawasan barat dan selatan mendukung interpretasi bahwa Borneo bukanlah kawasan tektonik pasif, tetapi masih mengalami deformasi aktif hingga saat ini, (Simons dkk., 2007; Curray, 2005). Struktur geologi utama di Borneo ditunjukkan pada **Tabel 2.2.**

Tabel 2. 2 Struktur Geologi Utama di Borneo

NO	NAMA STRUKTUR	JENIS GERAKAN	LOKASI DOMINASI	FUNGSI TEKTONIK	IMPLIKASI GEOLOGI
1	Sesar Tanjung Selor	Sesar geser (strike-slip)	Kalimantan bagian utara	Pembatas struktur utama antara utara dan tengah Borneo	Menyebabkan segmentasi kerak dan potensi deformasi lateral
2	Sesar Mangkalihat	Sesar geser (strike-slip)	Kalimantan timur	Jalur transfer antara zona subduksi dan kerak benua	Kontrol terhadap pola pelipatan dan pensesaran Neogen
3	Sesar Adang	Sesar geser (strike-slip)	Kalimantan barat	Mengakomodasi pergeseran horizontal kerak	Potensi seismik signifikan dan deformasi aktif
4	Sesar Sangkuliang	Sesar geser (strike-slip)	Kalimantan tenggara	Perpanjangan sistem sesar aktif menuju Sulawesi	Berhubungan dengan pembentukan cekungan lokal dan deformasi geser
5	Sesar Palu-Koro	Sesar geser kanan (dextral)	Kalimantan tenggara – Sulawesi barat	Batas lempeng mikro antara Kalimantan dan Sulawesi	Struktur aktif, potensi gempa besar (e.g. Palu 2018)
6	Sesar Paternoster	Sesar geser kanan (dextral)	Kalimantan tenggara	Sistem sesar utama di zona batas kerak	Mengontrol jalur deformasi zona transisi ke laut
7	Sesar Tinjau	Sesar geser (strike-slip)	Kalimantan bagian tengah	Menyambung zona rekahan dalam benua	Potensi jalur fluida dan mineralisasi
8	Penunjaman Borneo	Subduksi (konvergen)	Kalimantan utara	Penunjaman lempeng Laut Cina Selatan di bawah Sabah	Menyebabkan gaya kompresi dan pelipatan di utara Borneo
9	Penunjaman Sulu	Subduksi (konvergen)	Laut Sulu	Penunjaman busur Filipina bagian selatan	Aktivitas seismik dan pembentukan melange
10	Penunjaman Sulawesi Utara	Subduksi (konvergen)	Laut Sulawesi	Subduksi laut dalam ke arah selatan	Sumber aktivitas vulkanik dan seismik aktif di Sulawesi

Lineamen dan sesar utama yang tersebar dari barat laut hingga tenggara Pulau Borneo, ditunjukkan pada **Gambar 2.7**. Lineamen di Pulau Borneo digambarkan dengan garis ungu tipis yang mewakili lapisan batuan dan fitur linier lainnya, sementara struktur sesar utama ditunjukkan dengan garis tebal berwarna merah. Beberapa sesar penting yang teridentifikasi dalam peta ini

meliputi *Borneo Island Fault* (BIF), Sesar Belait, Sesar Tutoh, dan zona tektonik lainnya seperti *Compressional Bend* dan *Oroclinal Bend*. Pola penyebaran lineamen yang cenderung sejajar serta berorientasi barat laut-tenggara mencerminkan arah utama tegasan regional yang bekerja di kawasan ini, yang dipengaruhi oleh interaksi Lempeng Indo – Lempeng Australia, Lempeng Sunda, dan Lempeng Laut Filipina (Hall, 2013). Pola oroklinal dan kompresional yang tampak pada peta menunjukkan bahwa bagian tengah hingga timurlaut Borneo telah mengalami deformasi lipatan dan pengangkatan signifikan, yang dapat dikaitkan dengan reaktivasi struktur lama dan pengaruh gaya konvergen dari arah Laut Filipina di bagian utara. Sementara itu, keberadaan sesar naik di bagian utara (Palung Borneo) menunjukkan aktivitas pengangkatan yang kemungkinan berasosiasi dengan pembentukan cekungan dan proses inversi tektonik, (Morley, 2016). Keberadaan fitur linier seperti lineamen dan sesar pada peta ini memberikan informasi penting mengenai arah tegasan utama (σ_1) serta zona-zona lemah dalam kerak bumi yang menjadi jalur potensial deformasi selanjutnya.



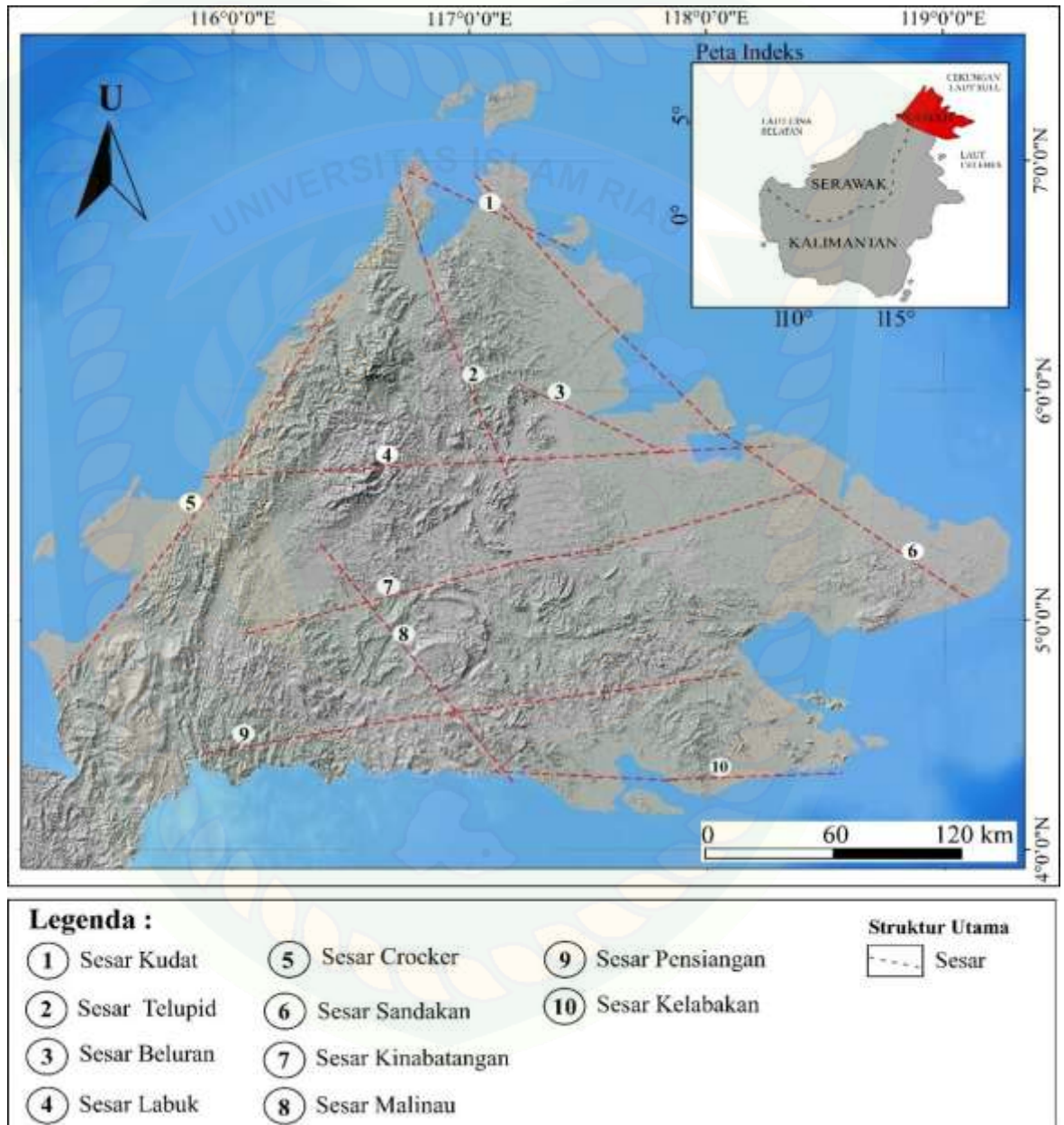
Gambar 2. 7 Peta Lineamen Borneo

2.3.3 Sesar Sabah

Wilayah Sabah di bagian timurlaut Pulau Borneo merupakan kawasan dengan sejarah geologi yang sangat kompleks dan aktif secara tektonik. Hal ini tercermin dari keberadaan sejumlah sesar utama yang tersebar di seluruh wilayah Sabah yang dapat dilihat pada **Gambar 2.8**. Berdasarkan interpretasi peta struktur yang dilampirkan, terdapat sepuluh sesar utama, yakni Sesar Kudat, Sesar Telupid, Sesar Beluran, Sesar Labuk, Sesar Crocker, Sesar Sandakan, Sesar Kinabatangan, Sesar Maliau, Sesar Pensiangan, dan Sesar Kelabakan. Secara umum, sesar-sesar ini menunjukkan orientasi utama baratlaut - tenggara dan timurlaut – baratdaya, mencerminkan respons batuan terhadap gaya-gaya tektonik kompresi dan ekstensi yang bekerja sejak Mesozoikum hingga Kenozoikum. Misalnya, Sesar Crocker dan Sesar Kudat berasosiasi dengan zona lipatan dan sesar di Kompleks Crocker yang terbentuk selama deformasi tektonik berarah timurlaut - baratdaya pada masa Oligosen hingga Miosen, (Hutchison, 2005; Tongkul, 1991). Sesar-sesar ini tidak hanya berperan dalam mengontrol pengangkatan dan pelipatan batuan sedimen, tetapi juga menjadi zona lemah yang memungkinkan reaktivasi struktur lama.

Bagian timur Sabah, seperti pada Sesar Sandakan dan Sesar Kinabatangan, struktur geologi lebih dipengaruhi oleh gaya ekstensional yang berkaitan dengan pembukaan Cekungan Laut Sulu dan proses *back-arc* basin yang aktif selama Miosen hingga Plio-Plistosen, (Hall, 2013). Struktur ini memotong formasi-formasi sedimen muda dan memberikan kontrol terhadap morfologi lembah dan aliran sungai utama. Sesar Telupid, Sesar Labuk, dan Sesar Beluran memotong bagian tengah Sabah dan merupakan bagian dari zona transpresif yang menghubungkan struktur-struktur utama di barat dan timur. Zona ini merupakan hasil interaksi kompleks antara gaya konvergen dari arah barat (Asia Tenggara) dan gaya ekstensi dari arah timurlaut (Lempeng Laut Filipina), yang menyebabkan terbentuknya banyak sesar mendatar dan *oblique-slip* (Tongkul, 1997). Lebih ke selatan, Sesar Pensiangan, Sesar Maliau, dan Sesar Kelabakan merupakan bagian dari

struktur yang mempengaruhi batas antara blok Sabah dan Kalimantan. Keberadaan sesar- sesar ini berhubungan erat dengan aktivitas tektonik regional, termasuk koalisi antara blok *Sundaland* dan elemen-elemen tektonik dari Laut Sulawesi sejak Kapur Akhir hingga Tersier, (Hutchison, 2004; Pubellier dan Morley, 2014).



Gambar 2. 8 Peta Sesar Sabah

Berdasarkan tabel karakteristik sesar, dapat diidentifikasi 10 sesar utama yang memainkan peran penting dalam sejarah geologi dan evolusi

tektonik Sabah dapat dilihat pada **Tabel 2.3**. Sesar-sesar ini mencerminkan hasil dari gaya tektonik regional yang kompleks, mulai dari kompresi, ekstensi, hingga gaya geser, akibat interaksi antara Lempeng Eurasia, Lempeng Laut Filipina, dan Lempeng Sunda, (Hutchison, 2005; Tongkul, 1991). Salah satu sesar paling dominan adalah Sesar Crocker, yang berorientasi barat-baratlaut-timur-tenggara dan bertipe mendatar-naik. Sesar ini memainkan peran utama dalam pembentukan Pegunungan *Crocker* serta deformasi dalam sabuk Lipatan Crocker, terutama selama Oligosen–Miosen akibat gaya kompresi berarah timurlaut-baratdaya, (Tongkul, 1997; Hutchison, 2005). Utara Sabah, Sesar Kudat dengan arah Gerak utara-timurlaut-selatan-baratdaya mengontrol deformasi Formasi Kudat yang diasosiasikan dengan pengendapan dalam cekungan dangkal. Struktur ini menunjukkan pengaruh dari gaya ekstensi awal dan deformasi lipatan selanjutnya, mencerminkan dinamika tektonik dari bagian paling utara Sabah, (Tongkul, 1991). Sisi tenggara, Sesar Kelabakan dengan arah gerak baratlaut-tenggara menjadi batas barat dari Kompleks Vulkanik Tawau dan tetap aktif hingga masa kini. Sesar ini menunjukkan keterkaitan dengan aktivitas tektonik post-magmatik serta sistem pemekaran regional Neogen, (Hall, 2013).

Sementara itu, Sesar Labuk dan Sesar Kinabatangan yang berorientasi timurlaut-tenggara menunjukkan gerakan mendatar-oblik dan berperan dalam deformasi batuan Pratersier serta pengendapan Neogen. Struktur ini mencerminkan pengaruh gaya-gaya transpresif yang berasal dari interaksi antara Lempeng Eurasia dan Lempeng Laut Filipina, khususnya setelah fase subduksi Laut Sulu, (Pubellier dan Morley, 2014). Bagian barat daya Sabah, Sesar Pensiangan yang memiliki gerakan naik dan mendatar dengan orientasi baratlaut-tenggara, menyebabkan *uplift* dan pembentukan Tinggian Pensiangan, sebagai respon terhadap tekanan lokal dan kemungkinan reaktivasi struktur lama, (Tongkul, 1997). Sesar Telupid dengan orientasi timur-barat, merupakan struktur naik dan geser yang sangat signifikan dalam membentuk Sabuk Lipatan Telupid dan berhubungan langsung dengan deformasi Formasi Trusmadi. Zona ini mencerminkan gaya kompresi utama

dari arah utara–selatan selama Paleogen (Hutchison, 2004). Adapun Sesar Maliau, berorientasi baratlaut-tenggara, mengontrol struktur sekitar Kawah Maliau yang terbentuk akibat kompresi dari arah baratdaya dan menunjukkan deformasi berarah lipatan dalam cekungan tertutup. Bagian baratlaut, Sesar Kota Belud menjadi penting karena berasosiasi dengan aktivitas hidrotermal dan panas bumi di daerah Ranau dan Mesilau. Zona ini juga dikaitkan dengan aktivitas seismik dan menjadi jalur potensial pelepasan energi geologi. Timur Laut Sabah, Sesar Sandakan berorientasi Utara-Selatan dan mengontrol deformasi Formasi Sandakan serta struktur Cekungan Sandakan Basin. Sesar ini menunjukkan aktivitas hingga masa kini, dan mempengaruhi arah aliran sungai, pengendapan, dan pola deformasi sedimen Kuartar, (Hall, 2013). Secara keseluruhan, sesar-sesar ini membentuk sistem struktur regional Sabah yang kompleks, merepresentasikan pengaruh berbagai episode tektonik mulai dari subduksi, kolisi, hingga pemekaran lempeng. Studi terhadap sistem sesar ini tidak hanya penting dalam memahami evolusi geologi regional, tetapi juga dalam pengelolaan risiko bencana geologi, serta eksplorasi sumber daya mineral dan panas bumi.

Tabel 2. 3 Karakteristik Sesar Utama Sabah

NO	NAMA SESAR	JENIS SESAR	ARAH GERAK	LOKASI DOMINASI	KETERANGAN GEOLOGI
1	Sesar Crocker	Sesar mendatar dan naik	WNW-ESE	Pegunungan Crocker, Sabah Barat	Berperan dalam pembentukan Pegunungan Crocker, sesar ini aktif selama Oligosen-Miosen, mengontrol struktur sabuk lipatan dan sesar Crocker.
2	Sesar Kudat	Sesar mendatar	NNE-SSW	Kudat, Sabah Utara	Mengontrol deformasi Formasi Kudat, berasosiasi dengan cekungan dangkal dan struktur lipatan regional.
3	Sesar Kelabakan	Sesar mendatar	NW-SE	Tenggara Sabah (Tawau-Kalabakan)	Mengontrol batas barat dari Kompleks Vulkanik Tawau, sering dihubungkan dengan aktivitas Neogen hingga kini.
4	Sesar Labuk	Sesar mendatar-oblique	NE-SW	Labuk Bay, Sabah Timur Laut	Terlibat dalam deformasi Kompleks Melange, mengontrol struktur batuan Pra-Tersier di bagian timur laut Sabah.
5	Sesar Kinabatangan	Sesar mendatar-oblique	NE-SW	Kinabatangan, Sabah Timur	Mengontrol batas formasi sedimen Neogen, menunjukkan aktivitas post-Miosen dengan pengaruh tektonik regional.
6	Sesar Pensiangan	Sesar naik dan mendatar	NW-SE	Pensiangan, pedalaman Sabah	Mengontrol uplift dan deformasi di bagian barat daya Sabah, terkait pembentukan zona tinggian Pensiangan.
7	Sesar Telupid	Sesar naik dan geser	E-W	Telupid, Sabah Tengah	Berkaitan dengan zona kompresi yang mempengaruhi Formasi Trusmi dan pembentukan sabuk lipatan Telupid.
8	Sesar Maliau	Sesar naik	NW-SE	Maliau Basin, Sabah Tengah	Mengontrol struktur sekeliling Kawah Maliau, berkaitan dengan deformasi kompresi dari arah barat daya.
9	Sesar Kota Belud	Sesar mendatar	NE-SW	Kota Belud, Sabah Barat Laut	Terhubung dengan aktivitas seismik dan hidrotermal, dekat dengan sumber panas bumi di Ranau dan sistem panas bumi Mesilau.
10	Sesar Sandakan	Sesar mendatar	N-S	Sandakan, Sabah Timur Laut	Mengontrol deformasi Formasi Sandakan dan sistem cekungan Sandakan Basin, mencerminkan pergeseran Neogen hingga kini.

2.3.4 Lipatan

Lipatan terbentuk akibat tekanan kompresi yang menyebabkan deformasi plastis pada batuan, terutama pada lapisan sedimen, menjadikannya struktur penting untuk mengungkap sejarah tektonik suatu daerah. Analisis lipatan dimulai di lapangan melalui observasi langsung mengukur orientasi lapisan (arah sejajar atau *strike* dan kemiringan atau *dip*), ketebalan, dan pola geometri seperti simetri atau asimetri. Data ini dikumpulkan menggunakan peralatan seperti kompas geologi, pita ukur, serta didukung informasi dari peta topografi atau citra satelit. Selanjutnya, orientasi tersebut diplot dalam diagram stereografi sering menggunakan proyeksi area sama untuk mengidentifikasi sumbu lipatan dan bidang sumbu (*axial plane*), sebagai dasar analisis geometri lipatan. Lipatan secara umum diklasifikasikan menjadi antiklin dan sinklin, tetapi identifikasi lebih mendalam mempertimbangkan variasi ketebalan pada sayap lipatan, bentuk bidang sumbu, serta *interlimb angle* yaitu sudut antara dua sayap lipatan (Ramsay dan Huber, 1987) yang menjadi klasik dalam taksonomi lipatan.

Kajian terkini menyoroti bahwa parameter tersebut juga mencerminkan karakteristik lapisan seperti ketebalan dan anisotropi mekanik serta kondisi perbatasan geologis selama deformasi, yang secara signifikan mempengaruhi gaya pembentukan lipatan (*fold-thrust deformation*) dan mode deformasi. Dengan demikian, analisis lipatan secara sistematis, melalui pengukuran lapangan, interpretasi stereografis, dan pemodelan, merupakan langkah fundamental dalam pemetaan struktur tektonik dan rekonstruksi fase deformasi suatu kawasan. Lipatan diklasifikasikan berdasarkan sudut antara sayap lipatan (*interlimb angle*) dan kemiringan sumbu lipatannya. Salah satu jenis lipatan yang umum dijumpai adalah lipatan terbuka (*open fold*), yang ditandai dengan sudut antara sayap berkisar antara 70° hingga 120° dapat dilihat pada **Gambar 2.9**. Lipatan ini umumnya memiliki bentuk simetris atau sedikit asimetris, dan terbentuk dalam kondisi deformasi sedang. Kemiringan sumbu lipatannya biasanya tegak atau hanya sedikit miring, menunjukkan

bahwa gaya kompresi bekerja dalam arah yang relatif moderat.

Sebaliknya, lipatan rebah (*recumbent fold*) merupakan jenis lipatan yang terbentuk dalam kondisi deformasi intensif, biasanya pada lingkungan tektonik yang sangat aktif seperti sabuk orogenik. Lipatan ini memiliki sumbu lipatan yang hampir mendatar (0° – 10°) dan sudut antar sayap yang sangat kecil, umumnya kurang dari 30° , sehingga salah satu atau kedua sayapnya hampir sejajar dengan bidang perlapisan dapat dilihat pada **Gambar 2.9**

Tabel 2. 4 Karakteristik lipatan terbuka dan rebah

JENIS LIPATAN	KEMIRINGAN SUMBU LIPATAN	SUDUT ANTARA SAYAP (INTERLIMB ANGLE)	CIRI - CIRI UTAMA	CONTOH UMUM DI ALAM	SITASI
Lipatan Terbuka	Hampir tegak atau miring lemah	$70^{\circ} - 120^{\circ}$	Sayap berkemiringan lemah, bentuk simetris atau asimetris, sumbu tidak terlalu miring	Umum di daerah deformasi lemah	Ramsay & Huber (1987), Twiss & Moores (2007)
Lipatan Rebah	Hampir horizontal ($\sim 0^{\circ} - 10^{\circ}$)	$< 30^{\circ}$	Sumbu lipatan mendatar, salah satu atau kedua sayap hampir sejajar dengan bidang perlapisan	Zona tektonik intensif seperti sabuk orogenik aktif	Davis, Reynolds & Kluth (2012)

Karakteristik ini menunjukkan bahwa batuan telah mengalami gaya kompresi besar dalam jangka waktu lama, menyebabkan pergeseran signifikan dan pembentukan struktur lipatan horizontal (Davis, Reynolds, dan Kluth, 2012). Karakteristik lipatan ditunjukkan pada **Tabel 2.4**.



Gambar 2. 9 Pemodelan Lipatan Recumbent dan Lipatan Open (symmetrical)

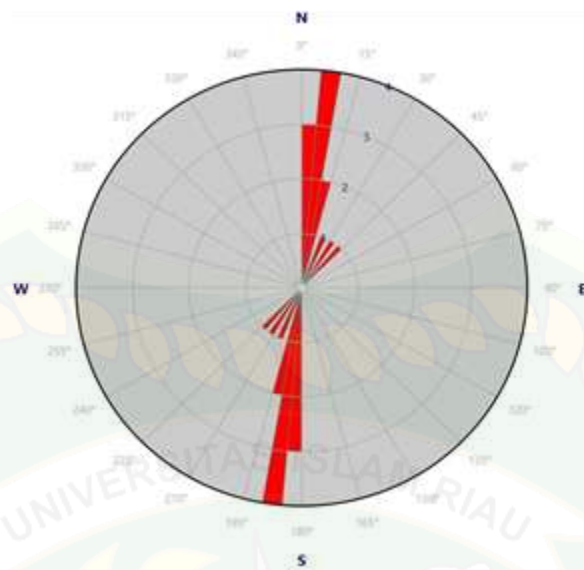
2.3.5 Kekar

Salah satu mekanisme utama pembentukan kekar adalah aktivitas sesar yang menghasilkan medan tegasan kompleks di sekitarnya. Ketika sebuah sesar mengalami pergerakan, tegasan diferensial yang tinggi akan terdistribusi secara tidak merata ke dalam batuan di sekeliling zona sesar.

Akibatnya, batuan mengalami deformasi *brittle* yang menghasilkan sistem rekahan atau kekar yang berkembang sejajar, tegak lurus, atau membentuk pola *conjugate* terhadap bidang sesar (Twiss dan Moores, 2007). Kekar yang terbentuk oleh pengaruh sesar biasanya terorganisir dalam pola tertentu, seperti kekar tarik (*extensional joints*) yang berkembang tegak lurus terhadap arah minimum stress (σ_3), atau kekar geser (*shear joints*) yang mengikuti arah maksimum stress (σ_1). Pada banyak kasus, sistem kekar yang terbentuk di sekitar sesar utama dapat memberikan informasi penting tentang arah tegasan paleotektonik, serta sejarah aktivitas deformasi yang dialami oleh batuan (Ramsay dan Huber, 1987). Misalnya, dalam sistem sesar mendatar, kekar tarik sering terbentuk pada bagian dinding sesar karena adanya pemisahan lateral dan rotasi blok batuan. Pada penelitian ini penulis menggunakan integrasi analisis diagram rose dan riedl shear untuk interpretasi kekar yang diperoleh di lapangan. Dua metode yang sering digunakan untuk menginterpretasikan data orientasi kekar adalah diagram *rose* dan analisis sistem *riedel shear*. Keduanya memberikan informasi yang saling melengkapi mengenai arah tegasan dan mekanisme pembentukan kekar.

1. Analisis Kekar dengan Diagram *Rose*

Diagram rose merupakan alat statistik grafis berbentuk histogram melingkar yang digunakan untuk menggambarkan distribusi arah jurus kekar. Data orientasi kekar yang dikumpulkan dari lapangan, umumnya berupa jurus (*strike*), direduksi menjadi rentang 0° – 180° karena sifat simetri bidang kekar. Arah kekar kemudian dikelompokkan dalam interval tertentu (misalnya 10°), dan frekuensinya diplot secara radial dapat dilihat pada **Gambar 2.10**.



Gambar 2. 10 Analisis Diagram Rose

Pola dari diagram ini membantu mengidentifikasi sistem kekar dominan serta arah tegasan paleotektonik yang mungkin menyebabkan terbentuknya rekahan tersebut (Twiss dan Moores, 2007). Dalam konteks deformasi regional, diagram *rose* sering menunjukkan adanya lebih dari satu populasi kekar, seperti sistem *conjugate* atau kekar tarik yang berkaitan dengan gaya regangan atau kompresi. Pola ini sangat berguna dalam eksplorasi geoteknik, hidrogeologi, maupun penilaian kestabilan lereng (Davis, Reynolds, dan Kluth, 2012).

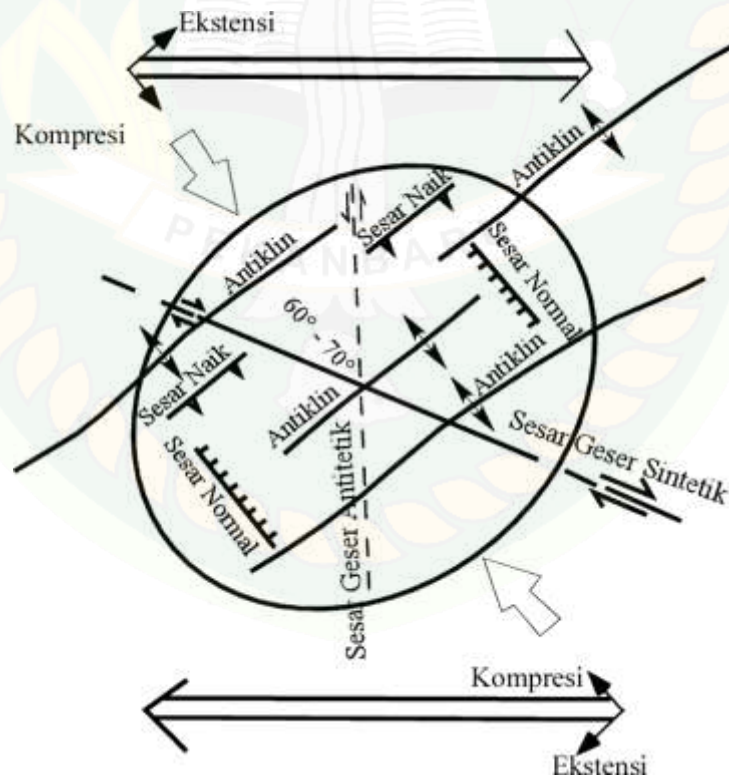
2. Interpretasi Kekar dengan Sistem *Riedel Shear*

Metode *riedel shear* merupakan model deformasi geser (*shear zone*) yang menjelaskan pembentukan kekar dan sesar minor di sekitar sesar utama (*main fault*), ditunjukkan pada **Gambar 2.11**. Dalam sistem ini, kekar dan rekahan diklasifikasikan menjadi beberapa komponen:

- a. *R-shear* (*Riedel shear*): terbentuk dengan sudut sekitar 10–20° terhadap arah sesar utama, sejajar dengan arah geser dominan.
- b. *R'-shear* (*antithetic Riedel*): berorientasi berlawanan, dengan sudut lebih besar (sekitar 60–70° terhadap sesar utama).
- c. *P-shear* : berkembang pada arah kompresif, biasanya membentuk sudut kecil dengan bidang geser utama.

- d. *T-fracture (tensile fracture)*: rekahan tegak lurus terhadap arah tegasan minimum (σ_3), menunjukkan bukaan (*extension*).

Sistem ini digunakan untuk mengidentifikasi arah gerak sesar utama dan menyusun kembali urutan deformasi. Kekar yang terbentuk dalam pola riedel sering kali terekam dalam batuan sebagai rekahan kecil namun teratur, yang dapat dianalisis bersama-sama dengan data *rose diagram* untuk memahami sistem tegasan yang bekerja (Ramsay dan Huber, 1987; Mandl, 2000). Kombinasi analisis diagram *rose* dan interpretasi pola kekar berdasarkan sistem *riedel* shear memungkinkan pemetaan dan penafsiran yang lebih akurat terhadap kondisi tegasan regional dan lokal. Diagram *rose* menyajikan bukti statistik dari data lapangan, sedangkan sistem *riedel* memberikan konteks mekanistik dan dinamis dari pembentukan struktur. Integrasi ini sangat berguna dalam studi struktur sesar, perencanaan eksplorasi migas atau panas bumi, serta pemodelan kestabilan massa batuan.



Gambar 2.11 Analisis Kekar Menggunakan *Strain Ellipsoid Riedel Shear*

2.4 Geomorfologi Tektonik

Evolusi tektonik Sundaland, termasuk Borneo, tidak dapat dilepaskan dari proses penempelan mikro *terrain* yang terbawa oleh lempeng samudra sejak akhir Mesozoikum, yang berujung pada pembentukan mozaik geologi yang kompleks di wilayah ini (Hall, 2013). Khusus di bagian utara Borneo, yaitu Sabah, dinamika tektonik mengalami perubahan signifikan sejak Miosen Tengah, ketika terjadi penghentian subduksi Laut Sulu. Peristiwa ini memicu kompresi regional berarah barat-baratlaut ke timur-tenggara, barat-baratlaut, timur-tenggara yang kemudian diakomodasi oleh sistem struktur utama seperti Sesar Crocker dan Sesar Mensaban. Sesar Crocker berperan sebagai sesar naik yang membentuk zona deformasi memanjang dari barat daya hingga utara Sabah, sedangkan Sesar Mensaban merupakan sesar geser mendatar yang berfungsi sebagai batas lateral deformasi. Keduanya menjadi elemen kunci dalam pengangkatan sabuk lipatan dan Sesar Crocker– Sesar Trusmadi yang mendominasi topografi Sabah barat hingga tengah (Tongkul, 1991). Akibat aktivitas sesar dan deformasi tersebut, terbentuklah berbagai fitur geomorfologi tektonik yang mencolok, seperti lembah struktural (*structural valleys*), bukit segitiga (*triangular facets*), punggung (*ridges*), serta sistem lipatan asimetris. Pesisir Marudu dan sekitarnya, proses tektonik menghasilkan teluk sempit dan runcing, yang merefleksikan arah dominan gaya kompresi dan struktur bawah permukaan yang mengontrol pembentukan cekungan sedimen Neogen. Fitur-fitur ini merupakan indikator penting dari aktivitas tektonik masa lalu, dan kini digunakan secara luas dalam analisis evolusi lanskap, pemodelan medan tegasan regional, (Hutchison, 2005).

2.4.1 Lembah (*Valley*)

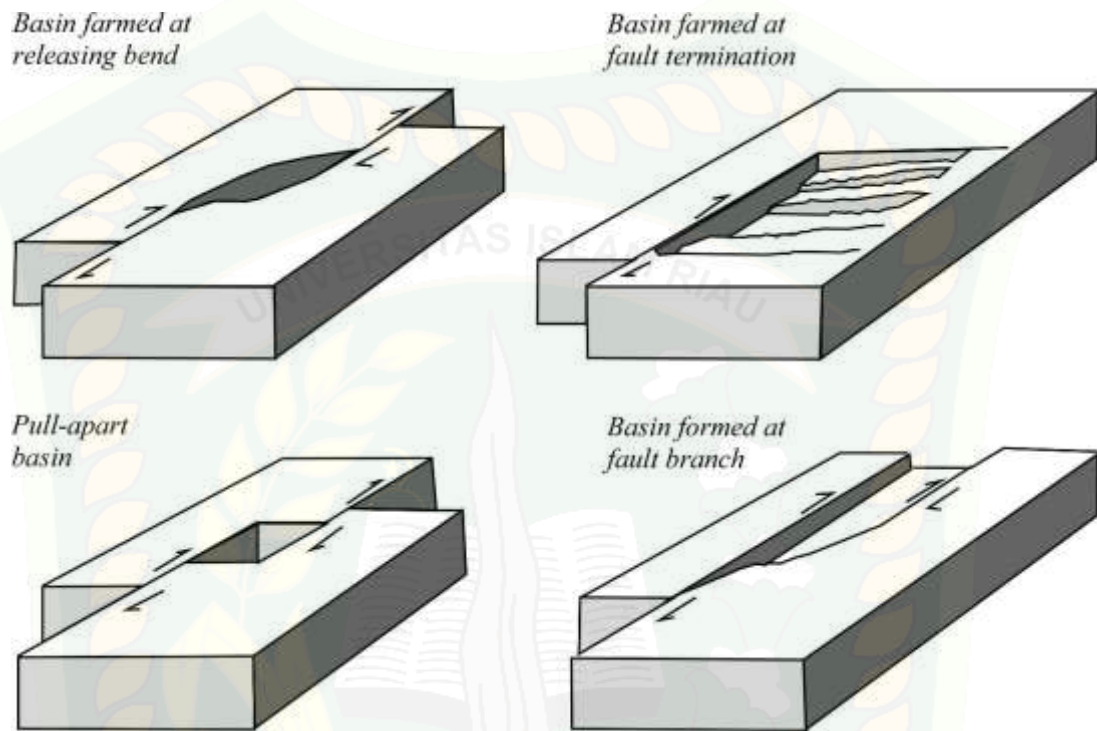
Bentuk lembah yang terbentuk akibat aktivitas tektonik sangat bergantung pada jenis sesar, geometri deformasi, serta dinamika pergerakan yang bekerja pada zona tersebut. Deformasi kerak akibat gaya tektonik tidak hanya menghasilkan sesar dan lipatan, tetapi juga membentuk cekungan (*basin*) dan lembah yang dikontrol langsung oleh konfigurasi sesar aktif. Beberapa tipe lembah utama yang berkaitan erat dengan geometri sesar di antaranya adalah *pull-apart basin*, *releasing bend basin*, *fault termination*

basin, dan *fault branch basin* (Sylvester, 1988; Christie- Blick dan Biddle, 1985).

- a) *Pull-apart basin*, terbentuk pada zona sesar mendatar (*strike-slip fault*) ketika dua segmen sesar yang berarah sejajar namun tidak lurus membentuk zona regangan lokal. Konfigurasi ini menghasilkan ruang terbuka (dilatasi) di antara dua blok sesar, yang kemudian menjadi area akomodasi sedimen dan fluida. Ciri khasnya adalah bentuk memanjang, geometri terkontrol oleh relung sesar (*step-over*), (Aydin dan Nur, 1982).
- b) *Releasing bend basin* merupakan lembah yang terbentuk pada belokan sesar (*bend*) di mana konfigurasi geometri menghasilkan regangan (*releasing*). Dalam sistem sesar mendatar, jika belokan membentuk sudut yang menyebabkan pelepasan gaya (misalnya pada sesar kiri-lateral yang membengkok ke kanan), maka zona tersebut akan mengalami pembukaan dan membentuk lembah atau cekungan. Lembah-lembah ini umumnya memanjang dan asimetris, serta menjadi area utama akumulasi sedimen Neogen di banyak wilayah tektonik aktif, (Crowell, 1974; Biddle dan Christie-Blick, 1985).
- c) *Fault termination basin*, lembah tipe ini terjadi di ujung (terminasi) suatu sesar aktif, terutama bila pergerakan sesar tidak diteruskan secara sempurna ke struktur lain. Zona terminasi tersebut mengalami deformasi lokal berupa subsiden atau pelipatan, yang memungkinkan terbentuknya basin sempit dan dangkal. Ciri morfologinya umumnya memanjang tegak lurus terhadap arah sesar dan terasosiasi dengan *uplift* lokal atau warping batuan, (Sylvester, 1988).
- d) *Fault branch basin*, lembah jenis ini terbentuk di daerah percabangan (*branching*) sesar, di mana satu sesar utama bercabang menjadi dua atau lebih sesar minor dengan arah dan geometri berbeda. Interaksi antar percabangan dapat menciptakan zona tarik-menarik (*extensional zones*) di antara sesar, sehingga terjadi peluruhan topografi dan pembentukan lembah. Geometri basin ini cenderung kompleks dan tidak simetris, serta sangat dipengaruhi oleh sudut percabangan dan arah gerak masing-

masing sesar, (Segall dan Pollard, 1980).

Adapun ilustrasi gambar jenis-jenis lembah ditunjukkan pada **Gambar 2.12** dan perbandingan jenis lembah tektonik ditunjukkan pada **Tabel 2.5**.



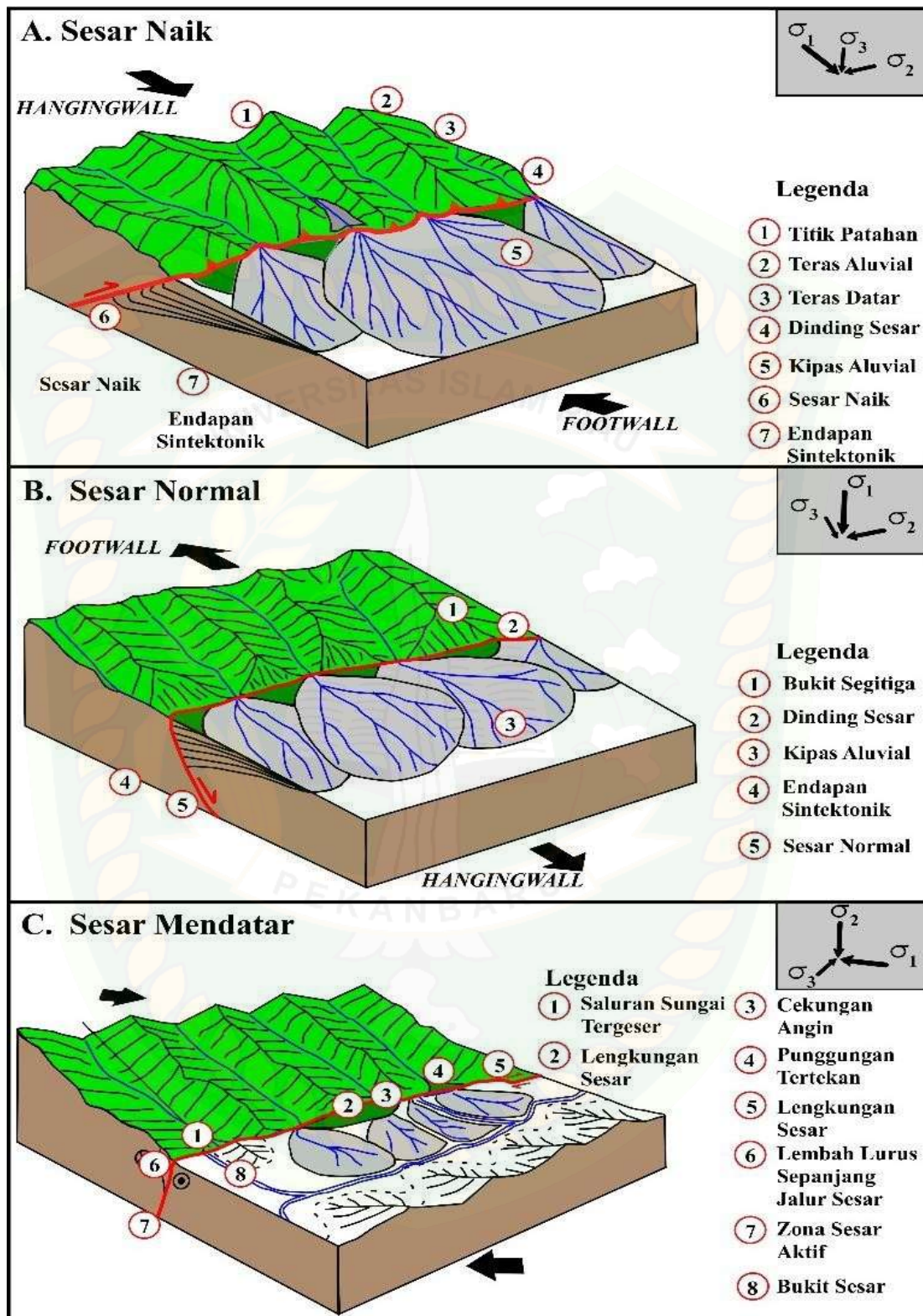
Gambar 2. 11 Klasifikasi jenis lembah Lembah releasing bend, fault termination, pull- apart basin, dan fault branch

Tabel 2. 5 Perbandingan jenis lembah tektonik

NO	JENIS LEMBAH TEKTONIK	MEKANISME PEMBENTUKAN	GEOMETRI UMUM	TIPE SESAR TERKAIT	CIRI MORFOLOGI	REFERENSI
1	<i>Pull-Apart Basin</i>	Regangan lokal antara dua segmen sesar mendatar pada zona step-over	Memanjang, bentuk segi empat / lonjong	<i>Strike-slip</i> (geser mendatar)	Cekungan memanjang dengan tepi sesar sejajar, sering menjadi zona sedimen aktif	Aydin & Nur (1982), Sylvester (1988)
2	<i>Releasing Bend Basin</i>	Pelepasan tegasan pada belokan sesar (releasing bend) menyebabkan regangan lokal	Memanjang, melengkung di sekitar belokan	<i>Strike-slip</i> dengan belokan ekstensional	Lembah melengkung di area tikungan sesar, arah memanjang mengikuti sesar utama	Biddle & Christie-Blick (1985), Crowell (1974)
3	<i>Fault Termination Basin</i>	Cekungan terbentuk di ujung sesar aktif karena tidak tersalurkan penuh ke struktur lanjutan	Cekungan tertutup atau setengah terbuka	<i>Strike-slip</i> atau <i>oblique-slip</i>	Sering berada di akhir jalur sesar, terasosiasi uplift di sekitarnya	Sylvester (1988), Segall & Pollard (1980)
4	<i>Fault Branch Basin</i>	Zona regangan terbentuk di antara cabang sesar akibat percabangan arah gerak yang berbeda	Tidak beraturan / kompleks	<i>Strike-slip</i> bercabang	Basin terbentuk antara dua atau lebih sesar aktif, geometri kompleks dan tak simetris	Segall & Pollard (1980), Christie-Blick & Biddle (1985)

2.4.2 Bukit Segitiga (*Triangular Facet*)

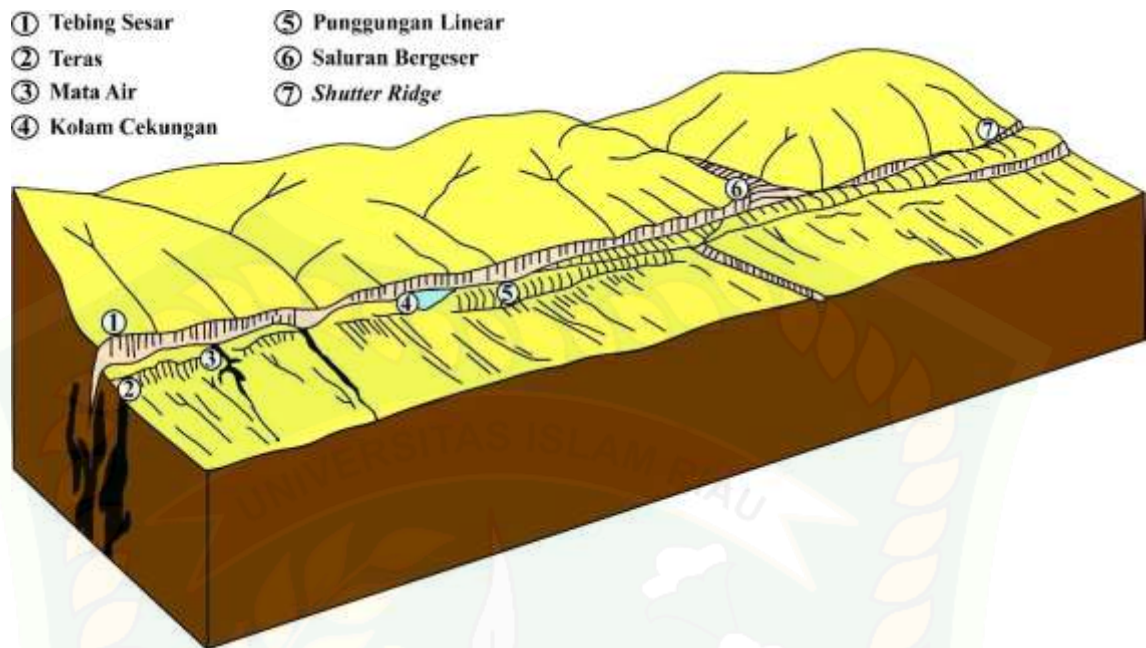
Kehadiran *triangular facet* atau bidang segitiga pada lereng-lereng sesar merupakan indikator morfologi yang penting untuk mengungkap parameter geometri sesar, terutama nilai kemiringan (*dip angle*) dari sesar yang belum terpetakan atau tidak terekspos langsung di permukaan. *Triangular facet* terbentuk di sepanjang lereng yang dipotong oleh sesar aktif, biasanya sebagai hasil kombinasi antara pengangkatan tektonik dan proses erosi lateral dapat dilihat pada **Gambar 2.13**. Karena *facet* ini sering berkembang sejajar dengan bidang sesar, sudut kemiringan lereng *facet* dapat diasumsikan sebagai pendekatan awal terhadap sudut kemiringan bidang sesar itu sendiri, (Keller dan Pinter, 2002; Burbank dan Anderson, 2011). Pemanfaatan *triangular facet* menjadi semakin signifikan dalam era pemetaan digital, ketika banyak segmen sesar tidak memiliki eksposur langsung atau tidak tercatat dalam peta geologi regional. Dalam konteks ini, platform pemetaan sesar berbasis digital seperti ArcGIS, hingga aplikasi berbasis *machine learning* dan *remote sensing* dapat menggunakan data topografi resolusi tinggi (DEM dan SRTM) untuk mengidentifikasi dan menghitung kemiringan *facet* secara otomatis. Dengan menggabungkan data morfometri seperti panjang lereng, tinggi relatif, dan sudut kemiringan, peneliti dapat memperkirakan orientasi bidang sesar, bahkan pada kawasan yang belum pernah dilakukan survei geologi langsung (Roering, dkk., 2007). Dengan demikian, *triangular facet* bukan hanya elemen visual dari morfologi lereng, tetapi juga alat diagnostik geomorfologi kuantitatif yang sangat berguna dalam estimasi geometri sesar, terutama di wilayah dengan keterbatasan data geologi. Pemanfaatannya melalui *platform* digital memperluas cakupan penelitian dan membuka peluang rekonstruksi struktur bawah permukaan dengan akurasi yang lebih tinggi, meskipun tanpa bukti geologi langsung di lapangan.



Gambar 2. 12 Ilustrasi geomorfologi fitur *Triangular Facet*

2.4.1 Punggungan

Dalam konteks geomorfologi tektonik, punggungan (*ridge*) memegang peranan penting sebagai indikator permukaan terhadap dinamika deformasi bawah permukaan, khususnya dalam hubungannya dengan sesar aktif, dapat dilihat pada **Gambar 2.14**. Pola dan orientasi punggungan memberikan informasi langsung mengenai arah tegasan utama yang bekerja di wilayah tersebut, serta jenis deformasi yang mendasarinya. Punggungan yang berkembang tegak lurus terhadap jalur sesar umumnya terbentuk akibat tegasan kompresi yang menyebabkan pengangkatan blok batuan secara vertikal, pembentukan antiklin, atau lipatan lainnya. Hal ini mencerminkan dominasi tegasan maksimum (σ_1) yang bekerja tegak lurus terhadap bidang sesar, dan biasanya berkaitan dengan mekanisme sesar naik atau lipatan. Sebaliknya, punggungan yang sejajar dengan arah sesar sering kali merupakan produk dari deformasi geser mendatar, di mana tekanan lateral membentuk struktur linier seperti *pressure ridges*, *shutter ridges*, atau *fault-parallel ridges*, yang berkembang seiring dengan pergeseran sesar mendatar aktif. Struktur-struktur ini mencerminkan arah tegasan utama horizontal (σ_1 atau σ_3) yang sejajar dengan gerakan sesar dan menjadi indikator penting dalam pemetaan medan tegasan regional. Oleh karena itu, analisis orientasi dan distribusi punggungan dalam hubungannya dengan struktur sesar tidak hanya membantu dalam mengenali jenis sesar dan arah pergerakannya, tetapi juga memberikan pemahaman mendalam terhadap sejarah dan dinamika tektonik suatu kawasan. Dengan kemajuan teknologi citra satelit dan pemrosesan model elevasi digital resolusi tinggi (DEM), interpretasi punggungan kini dapat dilakukan secara lebih akurat dan kuantitatif sebagai bagian dari studi struktur aktif dan mitigasi bencana geologi.



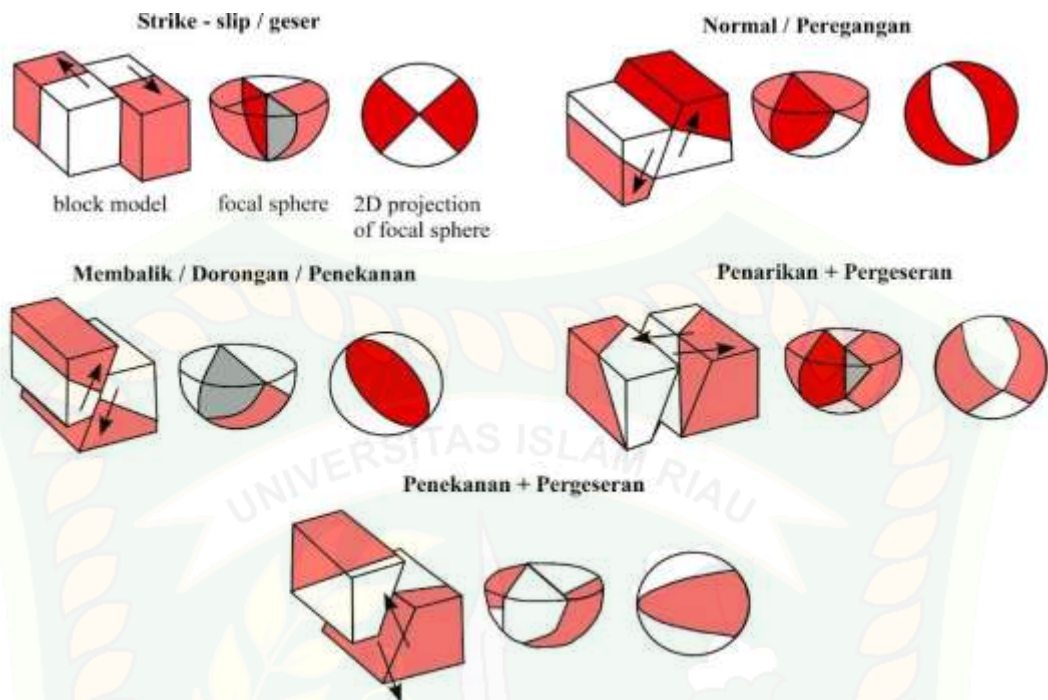
Gambar 2. 13 Ilustrasi Fitur Punggungan

2.5 Focal Mechanism Solution

Konvensi Aki dan Richards (1980) merupakan pendekatan standar internasional yang digunakan untuk menafsirkan mekanisme sumber gempa bumi serta orientasi bidang sesar, ditunjukkan pada **Gambar 2.15**. Konvensi ini menyajikan hubungan antara gaya seismik, arah *slip*, dan bidang sesar, yang divisualisasikan dalam bentuk bola fokus (*focal mechanism solution*). Bola fokus memberikan gambaran grafis mengenai jenis deformasi kerak bumi (normal, *reverse*, atau *strike-slip*) yang terjadi selama suatu peristiwa gempa bumi. Gambar yang Anda sertakan memperlihatkan visualisasi blok model dan proyeksi bola fokus 2D untuk berbagai jenis sesar, termasuk sesar geser (*strike-slip*), sesar normal (perenggangan), sesar naik (penekanan), serta kombinasi gerakan *oblique-slip* (geser + dorongan atau tarik). Setiap pola warna dalam bola fokus (hitam dan putih, atau dalam gambar ini merah dan putih) mewakili arah pergerakan relatif dan zona tekanan/tegangan pada bidang sesar. Melalui konvensi ini, penentuan jenis sesar dapat dilakukan berdasarkan bentuk dan orientasi pola warna dalam bola fokus. Misalnya:

- a. Sesar Geser (*Strike-slip*): bidang hitam dan putih bersisian secara vertikal atau horizontal simetris.
- b. Sesar Normal (*Normal fault*): bagian tengah berwarna putih (*tensional*), menunjukkan perluasan kerak.
- c. Sesar Naik (*Reverse/thrust fault*): bagian tengah berwarna merah atau hitam (kompresi), menunjukkan pergerakan ke atas.
- d. Sesar Oblik (*Oblique-slip*): kombinasi pola tegasan dan gerak geser, tampak dari asimetri bidang dalam bola fokus.

Gambar-gambar blok model di atas menguatkan hubungan spasial antara arah pergerakan relatif lempeng (panah), jenis tegasan dominan, dan representasi proyeksi bidang sesar dalam ruang tiga dimensi. Oleh karena itu, konvensi ini sangat penting dalam interpretasi struktur bawah permukaan menggunakan data seismik, serta dalam penilaian bahaya gempa bumi dan pemodelan zona patahan aktif, (Lay dan Wallace, 1995). Pemetaan struktural adalah metode paling penting untuk mengobservasi geologi struktur dan geometri bawah permukaan, (Parkinson, 1998; Shyu dkk., 2005). Pengamatan geologi struktur terperinci mampu membuktikan kewujudan deformasi dan kehadiran sesar, contohnya seperti sesar, kemiringan, dan lipatan. Keakuratan identifikasi sesar ditunjukkan oleh simbol yang bersesuaian, dimana garis tebal adalah sesar yang sudah pasti sedangkan sesar yang terkubur atau sulit untuk dilihat kewujudannya ditandai dengan akurat garis putus-putus. Hukum-V telah diaplikasikan pada penelitian ini dalam rangka untuk memprediksi dan memahami persimpangan antara lapisan sedimen dan sesar, terutama di permukaan yang kurang terekspos posisi kemiringannya. Arah kemiringan sesar dapat menentukan sisi blok turun dan blok naik, dari hal ini kemudian dilakukan pengukuran relatif dan penentuan jenis sesar. Sebagai contoh sesar normal menunjukkan kemiringan sesar menuju blok turun, sedangkan sesar naik menunjukkan kemiringan sesar menuju blok naik dan sesar mendatar biasanya menunjukkan kemiringan sesar secara vertikal atau horizontal.

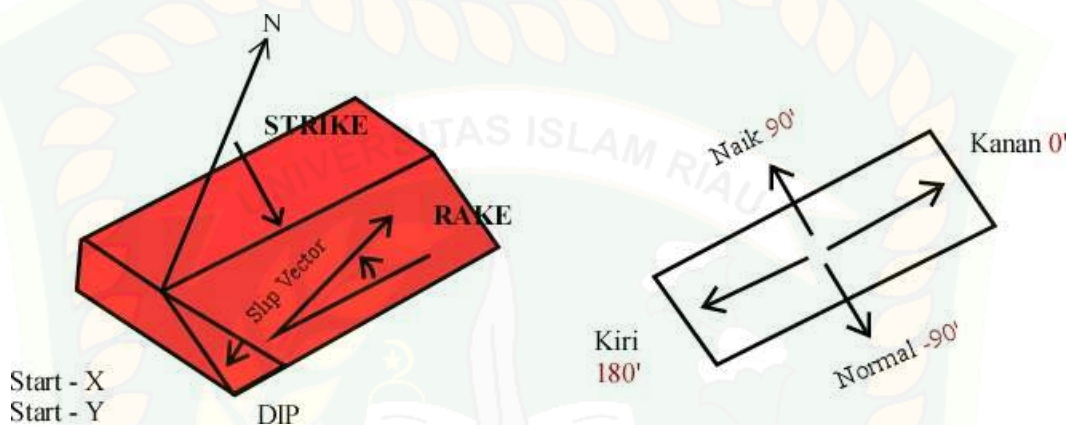


Gambar 2. 14 Menunjukkan Aki Konvensi Aki dan Richard yang digunakan untuk tafsiran bidang sesar

Representasi visual dari *Centroid Moment Tensor* (CMT) yang digunakan untuk menginterpretasikan mekanisme sumber gempa bumi, khususnya arah *slip* (*rake*) pada bidang sesar. CMT adalah hasil pengolahan data seismik yang memberikan informasi mengenai arah dan orientasi tegasan utama, serta mekanisme deformasi batuan di zona gempa. Salah satu parameter kunci dalam penafsiran ini adalah nilai *rake*, yaitu sudut yang menunjukkan arah slip relatif sepanjang bidang sesar terhadap arah *strike* (Aki dan Richards, 1980; Lay dan Wallace, 1995). Dalam konvensi yang ditunjukkan pada gambar, nilai *rake* diukur dari arah jurus (*strike*) ke arah *slip vector* dalam bidang sesar. Ilustrasikan sumbu koordinat bidang sesar (*strike*, *dip*, dan *rake*), serta arah slip yang relevan untuk masing-masing jenis sesar, ditunjukkan pada **Gambar 2.16**. Visualisasi ini penting dalam memahami hubungan spasial deformasi dan sangat berguna dalam studi geologi struktur dan seismologi. Dalam sistem CMT global, seperti yang dikembangkan oleh Harvard dan USGS, *rake* dihitung bersamaan dengan *strike* dan *dip* untuk menyusun solusi mekanisme gempa, dan ditampilkan sebagai “*beachball*” atau bola fokus. Pemahaman nilai *rake* menjadi sangat penting karena

dapat digunakan untuk:

- Mengklasifikasikan tipe gempa berdasarkan mekanisme sesar.
- Menafsirkan gaya tektonik dominan (kompresi, ekstensi, geser).
- Memetakan zona aktif tektonik berdasarkan data seismik regional.



Gambar 2. 15 Menunjukkan jenis *Centroid Moment Tensor* (CMT)

2.6 Gempabumi

Gempabumi dapat diklasifikasikan berdasarkan berbagai kriteria utama yang berkaitan dengan kedalaman, magnitudo, mekanisme sesar, lokasi tektonik, dan sumber pemicunya, klasifikasi gempabumi ditunjukkan pada **Tabel 2.6** Berdasarkan kedalaman hiposentrum, gempa dibagi menjadi tiga kategori: gempa dangkal (0–70 km), gempa menengah (70–300 km), dan gempa dalam (>300 km). Gempa dangkal umumnya paling merusak karena gelombang seismiknya menjangkau permukaan lebih cepat dan kuat, (Lay dan Wallace, 1995). Dari segi magnitudo, gempa bumi dikelompokkan dalam beberapa tingkat: mikro (<2.0), minor (2.0–3.9), ringan/light (4.0–4.9), sedang/moderate (5.0–5.9), kuat/strong (6.0–6.9), major (7.0–7.9), dan sangat kuat/great (≥ 8.0). Klasifikasi ini umumnya menggunakan skala *Moment magnitude* (M_w), yang dianggap lebih representatif daripada skala *Richter* untuk gempa besar karena menghitung energi total yang dilepaskan, (Hanks dan Kanamori, 1979). Berdasarkan mekanisme deformasi kerak bumi, gempa dapat dikategorikan menjadi gempa sesar naik (*thrust/reverse fault*), sesar normal (*normal fault*), dan sesar geser mendatar (*strike-slip fault*).

Mekanisme ini dapat diinterpretasikan melalui solusi bola fokus (*focal mechanism*) atau analisis *Centroid Moment Tensor (CMT)*, yang menunjukkan arah tegasan dan slip pada bidang sesar, (Aki dan Richards, 1980; Shearer, 2009).

Dilihat dari lokasi tektonik, gempa diklasifikasikan menjadi gempa subduksi (dibatas konvergen), gempa *intraplate* (dalam lempeng), gempa transform (dibatas geser), dan gempa *rift* (dibatas divergen). Gempa subduksi, seperti yang terjadi di zona Sunda, biasanya sangat kuat karena melibatkan interaksi antar lempeng samudra dan benua, (Stein dan Wysession, 2003; Scholz, 2002). Selain itu, berdasarkan sumber penyebabnya, gempa dibagi menjadi empat jenis utama: gempa tektonik (karena pergerakan sesar), gempa vulkanik (karena aktivitas magmatik), gempa runtuh (karena keruntuhan material batuan seperti gua atau tambang), dan gempa buatan (*induced earthquake*), misalnya akibat ledakan nuklir bawah tanah atau injeksi fluida dalam industri energi, (McNutt, 2005; Bolt, 1993).

Tabel 2. 6 Klasifikasi Gempabumi Berdasarkan Beberapa Kriteria

NO	KRITERIA	KATEGORI	DESKRIPSI	REFERENSI
1	Berdasarkan Kedalaman	- Gempa Dangkal (0–70 km) - Gempa Menengah (70–300 km) - Gempa Dalam (>300 km)	Berdasarkan kedalaman hiposentrum. Gempa dangkal cenderung menyebabkan kerusakan terbesar.	Lay & Wallace (1995), USGS (2023)
2	Berdasarkan Magnitudo	- Mikro (<2.0) - Minor (2.0–3.9) - Light (4.0–4.9) - Moderate (5.0–5.9) - Strong (6.0–6.9) - Major (7.0–7.9) - Great (=8.0)	Pengelompokan berdasarkan skala magnitudo (biasanya Mw- Moment Magnitude).	Hanks & Kanamori (1979), USGS (2023)
3	Berdasarkan Mekanisme	- Gempa Sesar Naik - Gempa Sesar Turun (Normal) - Gempa Sesar Mendatar (<i>Strike-slip</i>)	Berdasarkan orientasi dan arah pergerakan bidang sesar.	Aki & Richards (1980), Shearer (2009)
4	Berdasarkan Lokasi Tektonik	- Gempa Subduksi - Gempa <i>Intraplate</i> - Gempa Transform - Gempa <i>Rift</i>	Didasarkan pada posisi relatif gempa terhadap batas lempeng tektonik global.	Stein & Wysession (2003), Scholz (2002)
5	Berdasarkan Sumbernya	- Gempa Tektonik - Gempa Vulkanik - Gempa Runtuhan - Gempa Buatan (<i>Induced</i>)	Klasifikasi berdasarkan penyebab fisik: deformasi tektonik, aktivitas gunung api, tambang, atau nuklir.	McNutt (2005), Bolt (1993)

2.7 Penelitian Terdahulu

Kajian tektonik regional Borneo–Sabah menunjukkan bahwa wilayah ini terbentuk melalui interaksi kompleks mikroterran Gondwana, penutupan Paleo-Tethys, pembukaan Laut Cina Selatan, serta dinamika Lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Filipina yang memicu rotasi blok, kolisi, dan deformasi multiphase

sejak Kapur hingga Kuartar. Secara geologi regional, Borneo tersusun atas sedimen Kuartar, cekungan Paleogen–Neogen, kompleks ofiolit dan granit Kapur, serta batuan metamorf yang merekam sejarah subduksi, obduksi, dan tumbukan benua. Di Sabah, satuan seperti ofiolit, Formasi Crocker dan Trusmadi, serta sedimen pascakolisi membentuk kerangka stratigrafi utama, sementara struktur seperti Sesar Crocker, Telupid, dan Kudat mencerminkan deformasi Oligosen–Kuartar. Meskipun kerangka regional telah cukup mapan, keterkaitan langsung antara evolusi tektonik tersebut dengan respons deformasi lokal di wilayah Marudu–Pitas, khususnya dalam konteks struktur aktif dan batas mekanik kerak, masih belum dikaji secara spesifik dan terintegrasi.

Dari aspek struktur geologi dan geomorfologi tektonik, sistem sesar mendatar, naik, dan oblik di Borneo–Sabah telah dipetakan dan dikaitkan dengan rejim kompresi hingga transpresi regional. Analisis lipatan dan sesar menunjukkan kontrol deformasi regional yang kuat terhadap pembentukan struktur sekunder, sementara studi geomorfologi mengidentifikasi lembah struktural, punggung, triangular facet, dan kelurusan sungai sebagai indikator aktivitas tektonik muda. Namun demikian, di wilayah Marudu–Pitas belum tersedia inventaris geomorfologi tektonik berbasis Digital Elevation Model (DEM) resolusi tinggi yang mampu mengidentifikasi secara detail fitur-fitur morfologi seperti bukit segitiga, river offset, dan kelurusan topografi. Integrasi antara data stratigrafi, struktur aktif, dan analisis morfometri kuantitatif untuk menilai tingkat keaktifan sesar lokal juga masih sangat terbatas.

Dalam konteks seismotektonik dan batas mekanik kerak, analisis mekanisme sumber gempa di Asia Tenggara telah memanfaatkan focal mechanism solution dan Centroid Moment Tensor untuk menentukan tipe sesar dan orientasi tegasan utama, serta menunjukkan adanya aktivitas seismik intralempeng dan transisi tektonik di Sabah. Konsep brittle–ductile transition (BDT) juga telah digunakan untuk memperkirakan perubahan perilaku deformasi kerak, dengan estimasi umum kedalaman BDT di Sabah berkisar 12–18 km. Akan tetapi, belum terdapat analisis seismotektonik terintegrasi yang secara khusus menggabungkan katalog seismisitas tervalidasi, distribusi kedalaman gempa, kerangka struktur

lokal, serta estimasi BDT spesifik untuk wilayah Marudu–Pitas. Ketiadaan pendekatan multidisipliner tersebut menimbulkan kesenjangan pengetahuan yang signifikan dalam memahami karakter deformasi aktif, potensi sumber gempa lokal, dan evolusi tektonik terkini di daerah penelitian (Tabel 2.7).

Tabel 2. 7 Penelitian Terdahulu

Aspek Penelitian	Penelitian Terdahulu	Kesenjangan Pengetahuan
Tektonik Regional Borneo-Sabah	Evolusi tektonik Borneo dan Sabah telah dikaji melalui konsep akresi mikroterran Gondwana, penutupan Paleo-Tethys, pembukaan Laut Cina Selatan, serta interaksi Lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Filipina. Studi ini menekankan rotasi blok, kolisi, dan deformasi regional sejak Kapur hingga Kuarter (Burrett dkk., 1990; Pubellier dkk., 2003; Hall, 2012, 2013; Metcalfe, 2013; Zahirovic dkk., 2014).	Belum terdapat kajian yang secara spesifik mengaitkan evolusi tektonik regional tersebut dengan respons deformasi lokal di wilayah Marudu-Pitas, khususnya dalam kerangka struktur aktif dan batas mekanik kerak.
Geologi Regional Borneo	Pemetaan geologi regional menunjukkan Borneo tersusun oleh sedimen Kuarter, cekungan Paleogen-Neogen, melange subduksi, kompleks granitoid Kapur, ofiolit, dan batuan metamorf yang mencerminkan sejarah tektonik multiphase (Hutchison, 2005; Pubellier dkk., 2003; Hall, 2012).	Integrasi data stratigrafi regional dengan kontrol struktur aktif dan implikasinya terhadap deformasi kerak dangkal hingga menengah di Sabah utara masih terbatas.
Geologi Sabah	Kerangka geologi Sabah telah dibahas secara komprehensif melalui identifikasi satuan ofiolit, Formasi Crocker dan Trusmi, olistostrom Miosen, serta sedimen pasca-kolisional. Struktur utama seperti Sesar Crocker, Telupid, dan Kudat diinterpretasikan sebagai hasil deformasi Oligosen-Kuarter (Tongkul, 1991, 1997, 2017; Hutchison, 2005; Hall, 2009).	Belum banyak penelitian yang menghubungkan variasi litologi dan umur satuan batuan Sabah dengan perilaku mekanik kerak serta implikasinya terhadap transisi deformasi rapuh-duktil.
Struktur Geologi (Sesar dan Lipatan)	Sistem sesar utama di Borneo dan Sabah, termasuk sesar mendatar, naik, dan oblique, telah dipetakan dan dikaitkan dengan gaya kompresi dan transpresi regional (Pubellier dkk., 2003; Hutchison, 2004; Tongkul, 1997; Morley, 2016). Analisis lipatan dilakukan berdasarkan geometri dan klasifikasi klasik lipatan (Ramsay & Huber, 1987; Fossen, 2016).	Karakteristik geometri sesar dan lipatan di daerah Marudu-Pitas belum dianalisis secara terintegrasi dengan data geomorfologi resolusi tinggi untuk menilai tingkat keaktifan dan kontrol deformasi lokal.
Geomorfologi Tektonik	Studi geomorfologi tektonik di Sabah menyoroti peran sesar aktif dalam pembentukan lembah struktural, punggungan, triangular facet, dan pola kelurusan sungai sebagai indikator deformasi aktif (Tongkul, 1991; Hutchison, 2005; Keller & Pinter, 2002; Burbank & Anderson, 2011).	Inventarisasi geomorfologi tektonik berbasis DEM resolusi tinggi yang terfokus pada wilayah Marudu-Pitas masih belum tersedia, terutama untuk mengkuantifikasi hubungan morfologi dengan struktur aktif.
Seismotektonik dan Mekanisme Gempa	Mekanisme sumber gempa di kawasan Asia Tenggara dianalisis menggunakan focal mechanism solution dan Centroid Moment Tensor untuk mengidentifikasi tipe sesar dan arah tegasan (Aki & Richards, 1980; Lay & Wallace, 1995; Hall, 2013). Sabah mulai diakui sebagai wilayah dengan aktivitas seismik intraplate dan transisi tektonik (Kreemer dkk., 2014).	Belum terdapat analisis seismotektonik yang secara khusus memadukan mekanisme gempa, struktur sesar lokal, dan kerangka geologi Marudu-Pitas untuk memahami sumber dan karakter deformasi aktif.
Brittle-Ductile Transition (BDT)	Konsep BDT digunakan secara luas untuk memahami perubahan perilaku deformasi kerak berdasarkan suhu, litologi, dan gradien geotermal (Sibson, 1984; Hyndman dkk., 1997; Bürgmann & Dresen, 2008). Estimasi umum BDT di Sabah berada pada kisaran 12-18 km.	Penentuan kedalaman BDT yang spesifik untuk daerah Marudu-Pitas, dengan mempertimbangkan variasi litologi lokal dan sejarah tektonik, belum pernah dilakukan secara sistematis.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Tahap Persiapan

Tahap persiapan merupakan tahap awal dalam pelaksanaan penelitian ini. Kegiatan pada tahap ini diawali dengan penyusunan skripsi penelitian yang memuat latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, serta metode yang akan digunakan. Skripsi tersebut kemudian dipresentasikan dalam seminar hasil untuk memperoleh masukan, koreksi, dan persetujuan dari dosen pembimbing serta penguji. Selain itu, pada tahap persiapan dilakukan studi literatur terhadap jurnal ilmiah, dan publikasi terdahulu yang berkaitan dengan geomorfologi tektonik, seismotektonik, analisis struktur geologi, serta perhitungan potensi gempabumi berbasis *Moment magnitude* (M_w). Studi literatur ini bertujuan untuk memperkuat landasan teoritis, memahami kondisi geologi regional wilayah penelitian, serta menentukan pendekatan dan metode analisis yang sesuai. Tahap persiapan juga mencakup penguasaan dan penyiapan perangkat lunak pendukung yang akan digunakan dalam penelitian, antara lain ArcGIS untuk pengolahan data spasial dan pemetaan, GeoMapApp untuk analisis seismisitas dan *Centroid Moment Tensor*, FaultKin dan GeoRose untuk analisis struktur geologi dan medan tegasan, serta Canvas X untuk penyusunan dan penyempurnaan peta tematik. Pada tahap ini pula dilakukan penentuan wilayah penelitian, perencanaan kegiatan lapangan, serta penyiapan peralatan lapangan seperti kompas geologi, GPS, kamera, dan formulir pencatatan data guna mendukung kelancaran pengambilan data pada tahap selanjutnya.

3.2 Tahap Penelitian

Penelitian ini menggunakan dua jenis sumber data, yaitu data primer dan data sekunder. data primer diperoleh melalui kegiatan observasi langsung di lapangan untuk memverifikasi hasil interpretasi berbasis data sekunder serta mengidentifikasi bukti-bukti deformasi aktif. Data yang dikumpulkan meliputi foto geomorfologi, pengamatan terhadap struktur sesar (*fault*), *offset* singkapan, lipatan, kekar, gores-garis (*slickenside*), longsor, dan keberadaan *triangular facet* yang

merupakan indikator penting dalam analisis geomorfologi sesar aktif. Observasi lapangan ini juga digunakan untuk mendukung interpretasi arah medan tegasan dan evolusi struktur tektonik di kawasan penelitian (Bull, 1977; Wallace, 1978; McCalpin, 2009). Data sekunder diperoleh dari berbagai sumber terdokumentasi seperti peta geologi regional, citra satelit (misalnya SRTM), basis data seismisitas dari *Geomapapp*. Pengolahan data sekunder dilakukan di studio dengan memanfaatkan perangkat lunak seperti ArcGIS, untuk menghasilkan luaran berupa peta geomorfologi tektonik, peta seismisitas, dan peta skenario gempa bumi. Ketiga jenis peta ini digunakan untuk menganalisis keterkaitan antara morfologi permukaan dan aktivitas tektonik yang sedang berlangsung (Keller dan Pinter, 2002; Burbank dan Anderson, 2013).

3.3 Tahap Pengambilan Data

Tahap pengambilan data terdiri dari data sekunder dan data primer. Penjelasan detail pengumpulan data tersebut berada pada sub bab di bawah ini:

3.3.1 Tahap Pengambilan Data Sekunder

Data sekunder pada penelitian ini dibagi menjadi tiga yaitu data geomorfologi tektonik, data seismisitas dan data *Moment magnitude (Mw)*. Adapun tahap analisis pengolahan data sekunder menghasilkan luaran berupa peta geomorfologi tektonik, peta seismisitas dan peta skenario gempabumi (neotektonik). Dasar peta (*base map*) yang digunakan untuk pembuatan peta disesuaikan dengan keperluan dan resolusi dari beberapa sumber.

3.3.2 Tahap Pengambilan Data Primer

Tahapan penelitian ini mencakup kegiatan terintegrasi mulai dari pengumpulan data primer di lapangan melalui observasi langsung dan pengukuran struktur geologi seperti sesar, lipatan, dan kekar, hingga analisis data di studio yang melibatkan pemrosesan data primer dan sekunder, termasuk peta geologi, citra satelit, dan kajian literatur. Seluruh data kemudian diinterpretasikan secara menyeluruh untuk menghasilkan peta tematik dan analisis geomorfologi tektonik. Dokumentasi visual turut dilakukan secara sistematis guna memperkuat validitas data dan mendukung interpretasi ilmiah.

Pengambilan data di lapangan dimulai dengan identifikasi lokasi-lokasi strategis di wilayah Marudu hingga Pitas, Sabah, Malaysia, yang menunjukkan indikasi struktur geologi aktif. Setiap titik observasi ditentukan menggunakan GPS untuk menjamin akurasi spasial dan memudahkan integrasi ke dalam peta digital. Selanjutnya dilakukan pengamatan visual terhadap fitur-fitur struktur geologi seperti sesar naik, sesar mendatar, kekar tarik, kekar geser, dan rekahan, disertai dokumentasi fotografis dengan skala dan orientasi yang jelas. Pengukuran orientasi struktur seperti arah (*strike*) dan kemiringan (*dip*) bidang sesar, sumbu lipatan, dan pola kekar dilakukan secara sistematis menggunakan kompas geologi. Data hasil pengukuran dicatat dalam formulir lapangan kemudian diplot ke dalam peta dasar geologi untuk dianalisis lebih lanjut guna mengidentifikasi pola kelurusan, arah tegasan, dan zona deformasi utama. Selain itu, diamati pula fitur pendukung seperti cermin sesar, zona breksiasi, dan mineralisasi sekunder untuk membantu interpretasi arah gerakan sesar dan sejarah tektonik kawasan. Langkah-langkah ini secara menyeluruh bertujuan untuk menghasilkan data primer yang akurat sebagai dasar pemahaman terhadap dinamika tektonik regional dan potensi aktivitas seismik

3.3.3 Dokumentasi Lapangan

Dokumentasi visual dalam penelitian ini berperan sebagai sarana untuk merekam kondisi geologi secara nyata dan detail guna mendukung keabsahan data yang diperoleh di lapangan. Pengambilan gambar dilakukan secara sistematis menggunakan kamera digital beresolusi tinggi, dengan penekanan pada objek-objek penting seperti bidang sesar, zona lipatan, rekahan batuan, serta jejak aktivitas tektonik seperti cermin sesar dan zona breksiasi. Setiap foto disertai informasi tambahan berupa titik koordinat GPS, arah orientasi, dan skala agar memudahkan analisis lanjutan dan pemetaan. Pendokumentasian ini tidak hanya memperkaya data lapangan, tetapi juga menjadi referensi visual yang dapat digunakan untuk mengkaji ulang interpretasi struktur geologi serta memahami riwayat deformasi tektonik secara lebih menyeluruh.

3.4 Analisis Data Sekunder

Analisis data sekunder terdiri dari geomorfologi tektonik, seismisitas dan perhitungan *Moment magnitude* (M_w). Penjelasan detail mengenai analisis tersebut berada pada sub bab di bawah ini.

3.4.1 Geomorfologi Tektonik

Peta geomorfologi tektonik memerlukan resolusi yang tinggi oleh sebab itu penulis menggunakan citra satelit berupa *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) dengan besaran resolusi ~30 m (Mukul, dkk., 2017). SRTM ini diolah pada perangkat lunak ArcGIS kemudian akan menghasilkan peta topografi. Data SRTM ini ditransformasikan menjadi data raster dengan memberikan aturan sistem koordinat dengan pilihan *georeferencing* serta membuat klasifikasi topografi menjadi beberapa kelas. Selanjutnya peneliti melakukan observasi fitur geomorfologi tektonik berupa sesar, pembelokan sungai, bukit segitiga, punggung, lembah, dan antiklin. Selain itu data seismisitas di input ke dalam peta sehingga menghasilkan analisis yang komprehensif. Proses pembuatan peta geomorfologi tektonik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ArcMap sebagai salah satu modul dari ArcGIS. ArcMap digunakan karena kemampuannya dalam mengelola data geospasial, mengoverlay citra satelit dengan peta topografi dan geologi, serta melakukan digitasi manual terhadap fitur-fitur morfologi tektonik yang diamati. Aplikasi ini memungkinkan pengintegrasian antara data sekunder (seperti DEM, SRTM, dan citra Landsat) dengan hasil observasi data primer dari lapangan, sehingga menghasilkan peta yang representatif secara spasial (Chang, 2015; Burrough dan McDonnell, 2015). Dalam proses interpretasi, peneliti mengidentifikasi dan mendigitasi sejumlah fitur geomorfologi tektonik utama, antara lain:

- a) **Sesar pasti** (*confirmed fault*) adalah sesar yang telah dikenali secara langsung melalui bukti lapangan, seperti adanya gores garis (*slickenside*), offset pada singkapan batuan, pergeseran sungai, atau ciri deformasi struktural lain yang nyata. Dalam peta geologi maupun peta geomorfologi tektonik, sesar pasti biasanya disimbolkan menggunakan garis linear merah solid

(tebal dan kontinu), menandakan kepastian tinggi terhadap eksistensi dan lokasi jalur sesar tersebut (Burbank dan Anderson, 2011).

- b) **Sesar dugaan** (*inferred fault*) merupakan interpretasi dari kemungkinan keberadaan sesar berdasarkan indikasi morfologi permukaan yang belum tervalidasi secara langsung. Ciri-ciri ini bisa berupa pola aliran sungai yang tidak beraturan, lereng yang lurus secara tidak biasa, atau bentuk geomorfik seperti bukit segitiga dan depresi linier. Dalam simbolisasi peta, sesar dugaan biasanya digambarkan sebagai garis merah putus-putus untuk menunjukkan tingkat ketidakpastian dan perlunya verifikasi lapangan tambahan (McCalpin, 2009).
- c) **Punggungan** (*ridge axis*) punggungan biasanya disimbolkan dengan garis linear berwarna kuning, menandakan bahwa fitur tersebut memiliki bentuk topografi yang menonjol dan berkaitan langsung dengan aktivitas tektonik (Burbank dan Anderson, 2011). Punggungan sejajar sesar, yaitu punggungan yang berkembang sejajar dengan arah pergerakan sesar. Bentuk ini sering dihasilkan oleh gerakan mendatar atau kompresi lateral, dan dapat menunjukkan adanya asimetri tektonik pada sisi kiri dan kanan sesar (Bull, 1977). Punggungan tegak lurus sesar, yaitu punggungan yang terbentuk melintang terhadap jalur sesar, biasanya akibat pengangkatan vertikal pada zona sesar naik atau lipatan. Bentuk ini umum dijumpai pada daerah kompresional aktif, seperti di zona subduksi atau zona lipatan dan patahan (*fold-and-thrust belt*). Punggungan yang tegak lurus terhadap sesar biasanya terbentuk akibat gaya kompresi yang berarah tegak lurus terhadap jalur sesar, atau sebagai hasil dari reaktivasi struktur geologi lama yang sebelumnya terbentuk dalam rezim tegasan yang berbeda. Deformasi seperti ini menandakan adanya komponen tegasan utama maksimum (σ_1) yang berorientasi tegak lurus terhadap bidang sesar aktif. Dalam sistem tektonik kompresional, hal ini sering dijumpai pada zona lipatan dan sesar naik (*fold-and-thrust belts*), di mana lipatan dan punggungan berkembang sejajar dengan arah tegasan minimum (σ_3), dan tegak lurus terhadap arah

konvergensi (Davis dan Reynolds, 1996; Ramsay dan Huber, 1987).

- d) **Lipatan** biasanya ditandai dengan garis berwarna coklat yang merepresentasikan sumbu lipatan. Lipatan diklasifikasikan menjadi dua jenis utama, yaitu antiklin dan sinklin. Antiklin merupakan lipatan yang memiliki bentuk cembung ke atas dan biasanya menampakkan puncak atau punggung di permukaan. Sebaliknya, sinklin merupakan lipatan yang bentuknya cekung ke bawah dan kerap kali muncul sebagai lembah atau dataran yang lebih rendah dibanding sekitarnya. Dalam citra *hillshade*, lipatan antiklin umumnya tampak sebagai deretan punggung linear yang memanjang, mencerminkan bagian puncak dari suatu lipatan. Sedangkan sinklin cenderung muncul sebagai lembah atau alur yang memanjang, yang mengikuti bagian dasar dari lipatan. Pola berulang antara punggung dan lembah yang sejajar dalam citra *hillshade* menunjukkan adanya pengaruh deformasi tektonik, khususnya dari gaya kompresi regional yang membentuk struktur lipatan tersebut (Burbank dan Anderson, 2011).
- e) **Offset Sungai** merupakan salah satu indikator morfologis utama dari aktivitas tektonik, khususnya pada zona sesar aktif. *Offset* ini ditandai dengan pembelokan, perpindahan, atau dislokasi alur sungai yang terjadi ketika jalur sungai melintasi bidang sesar dan kemudian mengalami pergeseran akibat pergerakan lateral blok-blok batuan. Pada peta morfologi atau peta geologi, *offset* sungai biasanya digambarkan dengan warna biru, direpresentasikan sebagai garis yang mengikuti bentuk dan arah aliran sungai yang telah bergeser (Burbank dan Anderson, 2011).
- f) **Bukit Segitiga** (*triangular facet*) merupakan salah satu fitur geomorfologi struktural yang umum dijumpai pada lereng-lereng perbukitan atau pegunungan yang mengalami pengangkatan akibat aktivitas sesar. *Facet* ini terbentuk sebagai hasil proses erosi pada lereng sesar yang terangkat secara relatif dan kemudian membentuk permukaan datar atau miring dengan bentuk menyerupai segitiga. Keberadaan *triangular facet* sering kali mengindikasikan sesar aktif dengan komponen vertikal, seperti sesar naik

atau sesar geser-oblik (Wallace, 1978; Keller dan Pinter, 2002). Citra *hillshade*, *triangular facet* dapat dikenali sebagai bidang lereng miring yang halus, berbentuk segitiga, dan terpotong tajam oleh lembah-lembah erosi.

Pada citra *hillshade* resolusi tinggi, *facet* tampak sebagai segmen lereng yang tampak lebih lurus dan planar dibandingkan dengan lereng di sekitarnya, dan biasanya membentuk pola repetitif linear sepanjang kaki bukit. Citra ini memungkinkan identifikasi yang jelas, terutama ketika *facet* berkembang berurutan di sepanjang jalur sesar, menunjukkan segmentasi struktur sesar tersebut (Burbank dan Anderson, 2011; DePolo, 1991).

3.4.2 Analisis Seismisitas

Analisis seismisitas menggunakan perangkat lunak *Geomapapp* sebagai peta dasar (*base map*) *Global Multi-Resolution Topography* (GMRT). untuk memvisualisasikan data berupa *Centroid Moment Tensor* (CMT). CMT ini berbentuk simbol grafik berupa bola pantai yang mengindikasikan tipe sesar yang menghasilkan gempa bumi, diantaranya: Sesar geser, sesar normal, sesar naik dan bahkan kombinasi beberapa sesar (sesar oblik). Selain itu CMT juga memvisualisasikan beberapa parameter sesar/patahan diantaranya jurus, kemiringan, *rake*, kedalaman, jenis sesar, arah kemiringan serta tanggal terjadinya gempabumi di masa lalu. Hasil dari analisis seismisitas menghasilkan peta seismisitas yang menunjukkan parameter sesar.

Sesar mayor di daerah penelitian ditandai di atas peta dengan menggunakan garis merah tegas apabila sesar kelihatan dengan jelas, sedangkan yang tidak kelihatan dengan jelas ditandai dengan garis merah putus-putus. Selanjutnya setiap CMT yang berdekatan dengan garis sesar di daerah penelitian dilakukan analisis dengan menginput beberapa data berupa jurus, kemiringan, *rake* dan jenis sesar. Data-data tersebut yang ditampilkan pada *Geomapapp* disesuaikan dengan pola dan fitur geomorfologi tektonik. Tantangan yang dihadapi terkadang *Geomapapp* menampilkan CMT yang tidak sesuai dengan pola dan fitur geomorfologi tektonik di daerah penelitian, bahkan tidak sama sekali CMT tersebut ditampilkan pada sesar yang berdekatan. Sehingga penulis memberikan rekomendasi parameter sesar

menyesuaikan dengan fitur geomorfologi tektonik yang berada di daerah penelitian misalnya kewujudan triangular facet menunjukkan arah kemiringan sesar dan pembelokkan sungai menunjukkan pola sesar geser baik ke arah kanan (*dextral*) maupun ke kiri (*sinistral*), aksial punggung (*ridge axis*), lipatan dan perlapisan. Tidak lupa pula informasi berupa lembah dan penamaannya juga dilakukan. Data parameter sesar yang ditampilkan oleh geomapapp dan juga rekomendasi dari penulis diolah menggunakan perangkat lunak *FaultKin 8* (Marrett dan Allmendinger, 1990; Allmendinger dkk, 2012).

3.4.3 Area Retakan/Patahan

Area rekahan (A) merupakan produk dari panjang patahan (L) dan lebar (W) (Shyu dkk., 2005s). Dalam penelitian ini, kami menggunakan panjang sesar dengan berhati-hati menarik garis sesar pada perangkat lunak ArcGIS dan kemudian menggunakan meteran yang tersedia di aplikasi tersebut. Metode Ini akan memudahkan kita untuk mendapatkan nilai panjang sesar yang lebih akurat dan efisien. Walaupun secara teoritis tidak hanya sesar yang harus diestimasi, tetapi segmen sesar juga memberikan kontribusi yang besar dapat berkembang menjadi patahan/sesar utama Pada penelitian ini, kami membatasi *Moment Magnitude* (M_w) menyesuaikan dengan panjang sesar yang telah peneliti petakan.

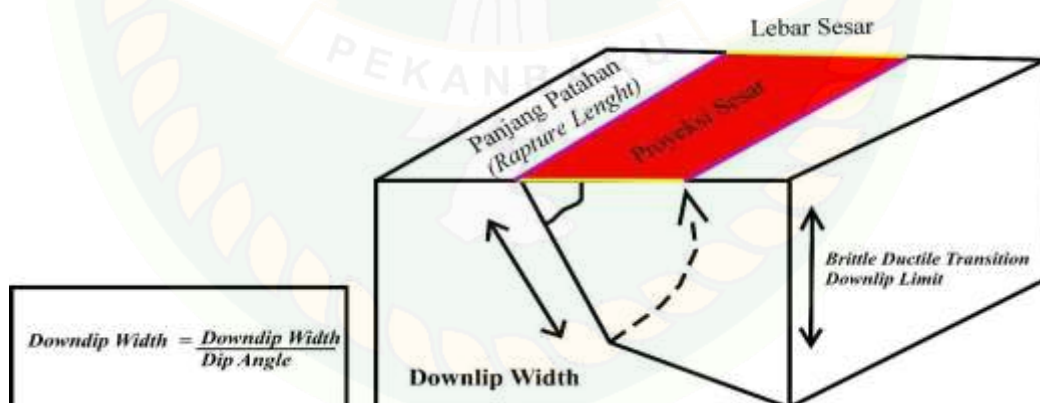
3.4.4 Perhitungan *Moment magnitude* (M_w) Gempabumi

Analisis *Moment magnitude* (M_w) menghasilkan peta skenario gempabumi (neotektonik). Analisis ini memerlukan input data parameter sesar diantaranya: panjang, lebar, *rake*, kedalaman, jurus, kemiringan dan *downdip limit*. Kemudian menggunakan formula yang telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya untuk menghitung lebar (W), luas area (A), *slip rate* (M_o), rata-rata pergerakan (D) dan hasil akhir berupa besaran potensi *Moment magnitude* (M_w) gempabumi. Hasil perhitungan ini kemudian dilukiskan pada peta dasar GMRT, dengan melukiskan sesar yang ditandai dengan garis berwarna merah dan proyeksi sesar dengan garis berwarna hitam. Sedangkan lebar sesar ditandai dengan garis berwarna kuning dan luas sesar ditandai dengan polygon warna-warni dalam bentuk tampalan (*rupture patch*). *Rupture patch* diberikan

nilai *Moment magnitude* (M_w) dan penamaan sesar serta simbol sesar yang telah dihitung dan ditentukan sebelumnya oleh penulis. Selain itu data CMT tetap diinput untuk memvisualisasikan orientasi pergerakan sesar. Aplikasi *Geomapapp* dan data satelit digunakan untuk menentukan geometri dan karakteristik sesar utama yang telah dipetakan oleh peneliti (Shah Sieh, 2013). Data ini digunakan untuk memprediksi besarnya *Moment magnitude* (M_w) gempa bumi yang berasal dari masing segmen sesar. Kemudian langkah selanjutnya menentukan geometri patahan seperti lebar dan besaran potensi *Moment magnitude* (M_w). Data yang diperlukan untuk memprediksi potensi *Moment magnitude* (M_w) gempa bumi diantaranya adalah dengan menentukan kemiringan sesar, *downdip limit*, serta lebar patahan, (Rohadi, 2009).

3.4.5 Sudut Kemiringan Sesar

Sudut kemiringan sesar yang digunakan untuk setiap segmen patahan diperoleh dari katalog *Centroid Moment Tensor* (CMT) yang tersedia dan mudah diakses di aplikasi *Geomapapp*, ditunjukkan ilustrasinya pada **Gambar 3.1**. Setelah mendapatkan sudut kemiringan, ambil nilai rata-rata dan masukkan ke dalam perhitungan. Persyaratan sudut kemiringan ini melebihi 30° (Shyu et al., 2005; Shah dan Sieh, 2013).



Gambar 3. 1 Menunjukkan bidang patahan diproyeksikan ke permukaan

3.4.6 Kedalaman Downdip Limit

Nilai *downdip limit* yang digunakan dalam penelitian ini adalah nilai transisi rapuh-ulet (*Brittle-Ductile Transition*) maksimum yang menghasilkan potensi gempa pada kedalaman sekitar 12-18 km (Scholz, 2002). Angka yang

digunakan tidak lebih dari 50 km, meskipun gempa bumi yang dalam melebihi angka ini juga telah terdeteksi (Burov, 2010; Monsalve dkk., 2006), maka kami memilih angka 18 menyesuaikan dengan batuan dasar di wilayah penelitian. Transisi rapuh-ulet (*Brittle-Ductile Transition*) terbesar di kerak atas mungkin terbatas pada kedalaman sekitar 12-18 km (Scholz, 2002) dan jarang melebihi 50 km, meskipun gempa bumi mantel dalam juga telah terdeteksi (Burov, 2010; Monsalve dkk., 2006).

3.4.7 Lebar Retakan/Patahan

Lebar patahan (*width of rupture*) merupakan angka hasil turunan dari kemiringan sesar dan nilai kedalaman transisi rapuh-ulet (*Brittle-Ductile Transition*) yang dimasukkan kedalam formula matematis. Setiap lebar patahan diproyeksikan ke muka bumi, kemudian diberikan tampalan/kotak berwarna warna berbeda untuk setiap segmen sesar yang melintasi (Shyu dkk, 2005).

$$A = L \times W \quad (\text{Rumus 7})$$

Keterangan :

A: Luas Patahan

L: Panjang jurus patahan W: Lebar *down dip* patahan

3.4.8 Slip Rate

Nilai rata-rata *slip/slip rate* (D) dihasilkan dari nilai *Moment Magnitude* (Mw) yang dihasilkan oleh patahan didapat dari turunan rumus Mo dan Mw (Lindsey dkk, 2021).

$$M_o \quad (\text{Rumus 1})$$

$$D = \frac{M_o}{\mu \times A}$$

Keterangan:

D : *slip rate*

Mo: *seismic moment*

M: modulus geser, ($3 \cdot 10^{11}$ dyne/cm²) (Hanks dan Kanamori, 1979)

A : luas sesar, km²

3.3.9 Moment Magnitude (Mw)

Moment Magnitude (Mw) dapat diperkirakan berdasarkan luas patahan (A, dalam km²) menggunakan rumus empiris (Wells dan Coppersmith 1994), yang berbeda tergantung jenis sesarnya:

Sesar Geser: $M_w = 3,98 + 1,02 \log A$ (Rumus 2)

Sesar Normal: $M_w = 3,93 + 1,02 \log A$ (Rumus 3)

Sesar Naik: $M_w = 4,33 + 0,90 \log A$ (Rumus 4)

Rumus ini menunjukkan bahwa semakin luas bidang patahan yang aktif, semakin besar magnitudo gempanya. Perbedaan konstanta antar jenis sesar mencerminkan efisiensi masing-masing dalam melepaskan energi selama gempa.

3.3.10 Seismic Moment (Mo)

Seismic Moment (Mo) adalah besaran gempa dan lebar patahan (Wells and Coppersmith, 1994). Rumus yang digunakan untuk menghitung *Seismic Moment* (Mo) adalah sebagai berikut.

$M_o = \mu WLD$ (Rumus 5)

Keterangan

Mo: *Seismic moment*

μ : modulus geser ($3 \cdot 10^{11}$ dyne/cm²), (Hanks and Kanamori, 1979) W: Lebar *down dip* sesar

L: Panjang sesar

D: rata-rata slip sesar (Wells and Coppersmith, 1994)

Seismic moment (M_o) memiliki hubungan dengan *Moment Magnitude* (M_w) dengan menggunakan rumus ini

$$M_w = 2/3 \log M_o - 10,737 \quad (\text{Rumus 6})$$

M_w : *Moment magnitude*

M_o : *Seismic Moment*

3.5 Analisis Data Sekunder

Analisis data primer dilakukan terhadap hasil observasi langsung di lapangan, meliputi identifikasi litologi serta struktur geologi seperti kekar, lipatan, dan sesar. Data primer tersebut kemudian diolah dan diintegrasikan dengan data sekunder melalui analisis di studio, yang mencakup peta geologi, citra satelit, serta studi literatur. Hasil penggabungan kedua jenis data ini selanjutnya dimanfaatkan untuk menyusun peta tematik dan melakukan analisis geomorfologi tektonik secara komprehensif.

3.6 Perangkat Lunak dan Aplikasi

Sumber data dalam penelitian ini berasal dari berbagai aplikasi dan data sekunder yang saling mendukung. IRIS *Earthquake* Browser digunakan untuk memperoleh informasi gempa seperti lokasi, kedalaman, dan magnitudo (M_w). GeoMapApp dan ArcGIS dimanfaatkan untuk visualisasi data geografis, batimetri, fitur tektonik aktif, centroid moment tensor, serta data geologi dan kejadian seismik. Untuk keperluan pemetaan tematik, digunakan Canvas X guna mendigitasi peta gempa sesuai kebutuhan analisis. Sementara itu, dokumentasi lapangan dilakukan dengan bantuan aplikasi Timestamp pada perangkat Android untuk merekam bukti visual geomorfologi beserta koordinatnya. Kombinasi berbagai sumber ini menghasilkan peta fitur gempa yang akurat dan informatif.

3.6.1 ArcGIS

Dalam kajian geomorfologi tektonik, perangkat lunak ArcGIS memainkan peran penting dalam analisis spasial dan visualisasi fitur struktural permukaan bumi. Proses dimulai dengan mengunduh data raster SRTM resolusi ~30 meter dari platform seperti JAXA atau USGS, yang

kemudian digabung menggunakan tool *Mosaic to New Raster* untuk membentuk citra topografi yang utuh. Setelahnya, data dipotong sesuai batas wilayah studi menggunakan tool *Clip*, dan sistem koordinat diatur menggunakan WGS 1984 UTM Zone 51N yang sesuai dengan lokasi penelitian, seperti wilayah Sabah. Data tersebut kemudian diolah menggunakan tool *Hillshade* dari *3D Analyst Tools* untuk menghasilkan bayangan topografi yang memungkinkan interpretasi visual morfologi permukaan. Berdasarkan hillshade, fitur-fitur struktural diinterpretasi, seperti sesar aktif (garis merah solid), sesar dugaan (merah putus-putus), lipatan (coklat), perlapisan (ungu), punggungan (kuning), triangular facet (hijau), dan offset sungai (biru), yang masing-masing menunjukkan indikasi deformasi tektonik yang berbeda. Penambahan data batimetri juga dilakukan untuk melengkapi gambaran morfologi kawasan pesisir dan laut dangkal. Kombinasi tahapan ini memungkinkan penggabungan data spasial dan geologi secara komprehensif, memberikan dasar yang kuat dalam interpretasi deformasi aktif dan mitigasi bencana geologi (Farr dkk., 2007; Burbank dan Anderson, 2011; Keller dan Pinter, 2002; Jenness, 2006).

3.6.2 GeoMapApp

GeoMapApp merupakan perangkat lunak berbasis desktop yang dirancang untuk analisis data geospasial dan geosains dalam bentuk peta interaktif, dan dalam penelitian ini digunakan untuk memvisualisasikan mekanisme fokal gempa dalam bentuk simbol beach ball yang merepresentasikan jenis dan orientasi sesar saat terjadi gempa bumi. Simbol tersebut menyajikan informasi penting seperti jurus (*strike*), kemiringan bidang sesar (*dip*), dan arah gerakan relatif (*rake*), yang sangat membantu dalam memahami dinamika sumber gempa (Ekström dkk., 2012). Tahapan penggunaannya dimulai dengan melakukan zoom pada wilayah penelitian hingga mencapai skala 1:10.000, lalu mengaktifkan menu *overlay* dan mencentang opsi *distance* untuk menampilkan skala, kemudian memilih *grid* dan mengaktifkan fitur *Centroid Moment Tensor (CMT)* pada *toolbar* portal hingga simbol-simbol beach ball muncul secara otomatis. Masing-masing

simbol memberikan dua solusi geometri sesar, dan peneliti memilih salah satu yang paling sesuai dengan kondisi geomorfologi tektonik di lapangan, seperti arah punggungan, sesar permukaan, atau pola deformasi lainnya. Namun, mengingat keterbatasan data geometri sesar di beberapa lokasi, peneliti juga memberikan nilai interpretatif terhadap parameter sesar berdasarkan ekspresi geomorfologi yang khas. Pendekatan ini memungkinkan integrasi antara data spasial dan observasi lapangan untuk memperkuat interpretasi struktur bawah permukaan di wilayah minim data seismik (Stein dan Wysession, 2003; Burbank dan Anderson, 2011). Dengan demikian, GeoMapApp berfungsi tidak hanya sebagai alat bantu visualisasi, tetapi juga sebagai perangkat penting dalam analisis kualitatif seismotektonik.

3.6.3 GeoRose

Georose merupakan perangkat lunak khusus yang dirancang untuk analisis dan visualisasi data orientasi struktur geologi, seperti sesar, kekar, dan lipatan, yang sangat penting dalam studi geologi struktur dan tektonik. Aplikasi ini memungkinkan penyajian data orientasi dalam bentuk diagram stereografis (*stereonet*) maupun diagram mawar (*rose diagram*) yang memberikan informasi visual terkait arah jurus, kemiringan, dan pola orientasi dari elemen struktural batuan. Diagram ini berperan penting dalam menginterpretasi arah tegasan (*stress field*), pola deformasi regional, dan sistem tektonik aktif yang berkembang di suatu wilayah (Lisle et al., 2011). GeoRose banyak digunakan karena antarmukanya yang sederhana namun fungsional, serta mampu mengolah data dalam jumlah besar secara efisien. Proses kerjanya meliputi:

- a) Input data orientasi struktur, baik secara manual maupun melalui file eksternal dengan format CSV atau TXT.
- b) Pemilihan jenis diagram sesuai kebutuhan analisis, seperti *rose diagram* untuk menganalisis distribusi arah jurus atau *stereonet* untuk menggambarkan orientasi bidang dalam ruang tiga dimensi.
- c) Pengaturan parameter visualisasi, termasuk interval kelas, warna garis,

serta rotasi arah utama

- d) Ekspor hasil visualisasi ke dalam format digital seperti gambar (PNG) atau dokumen (PDF) untuk kepentingan dokumentasi ilmiah dan publikasi.

Selain kemampuan visualisasi, GeoRose juga menyediakan fitur analisis statistik dasar terhadap data orientasi, seperti perhitungan arah dominan, hingga analisis polarisasi, sangat membantu dalam mengidentifikasi tren struktural utama dan arah tegasan dominan dalam suatu kawasan. Hal ini sangat bermanfaat dalam mengkorelasikan antara data lapangan dengan proses deformasi regional yang lebih luas. Keunggulan ini menjadikan GeoRose sebagai alat penting dalam tahap interpretasi data geologi struktur, baik untuk studi akademik, eksplorasi sumber daya alam, maupun pemetaan risiko geologi (Lisle dkk., 2011). Dengan demikian, penggunaan GeoRose tidak hanya mempermudah analisis data orientasi struktur, tetapi juga meningkatkan akurasi interpretasi tektonik secara keseluruhan.

3.6.4 FaultKin

FaultKin merupakan perangkat lunak yang dirancang khusus untuk menganalisis dan memvisualisasikan data struktur geologi, khususnya bidang sesar dan arah slip, guna memahami dinamika tegasan dan jenis mekanisme sesar di suatu wilayah. Dalam penelitian ini, *FaultKin* digunakan untuk memproses data geometri sesar yang terdiri dari jurus (*strike*), kemiringan (*dip*), dan arah slip (*rake*), yang kemudian diplot pada diagram stereografik menggunakan proyeksi bola bawah (*lower hemisphere projection*). Selanjutnya, perangkat lunak ini menerapkan metode *Bingham stress inversion* untuk menghitung orientasi tiga komponen tegasan utama, yaitu σ_1 (tegasan maksimum), σ_2 (tegasan menengah), dan σ_3 (tegasan minimum), yang selanjutnya diproyeksikan untuk menginterpretasi lingkungan tegasan regional dan arah dominan medan tegasan (Marrett dan Allmendinger, 1990; Allmendinger dkk., 2011). Hasil analisis ini memudahkan dalam menilai hubungan antara gerakan sesar dan arah tegasan, serta mengidentifikasi jenis

sesar dominan, seperti sesar normal, sesar naik, atau sesar geser. Sebagai tahap akhir, FaultKin menghasilkan simbol mekanisme fokal berbentuk beachball diagram berdasarkan orientasi bidang patahan dan vektor slip yang telah dianalisis, yang secara visual mengonfirmasi jenis dan arah pergerakan sesar. Visualisasi ini sangat membantu dalam menyelaraskan hasil pemetaan lapangan dengan analisis tegasan, menjadikan FaultKin sebagai alat penting dalam studi geologi struktur dan seismotektonik.

3.6.5 Canvas X

Canvas X merupakan perangkat lunak desain grafis teknis yang dikembangkan oleh ACD Systems, dirancang untuk memenuhi kebutuhan visualisasi dan dokumentasi ilmiah dalam berbagai bidang seperti teknik, arsitektur, geologi, dan geospasial. Dibandingkan dengan perangkat lunak grafis umum seperti Adobe Illustrator atau CorelDRAW, Canvas X menawarkan antarmuka yang lebih ringan dan efisien, namun tetap mendukung fitur-fitur profesional dalam pengolahan grafis berbasis vektor dan raster (ACD Systems, 2020). Kelebihan ini menjadikannya sangat cocok untuk digunakan dalam konteks ilmiah dan teknis, terutama untuk menyusun dokumen atau ilustrasi yang membutuhkan ketelitian geometrik dan presisi visual. Canvas X juga mendukung berbagai format file ilmiah dan teknis, seperti DXF, DWG, SVG, dan TIFF, sehingga memudahkan integrasi antara output dari perangkat lunak pemetaan seperti ArcGIS, QGIS, GeoMapApp, dan perangkat pemodelan geologi lainnya ke dalam satu media presentasi visual yang koheren dan siap digunakan untuk publikasi ilmiah maupun laporan teknis. Dalam konteks geospasial dan pemetaan tematik, Canvas X sering digunakan untuk melakukan tahap pascaproduksi peta, yaitu penyempurnaan dan pengeditan akhir terhadap hasil olahan peta dari perangkat lunak GIS. Fitur-fitur yang umum dimanfaatkan antara lain penambahan legenda dan skala, pengaturan layout halaman sesuai standar kartografi, pelabelan fitur spasial dengan simbolisasi ilmiah, serta peningkatan kualitas visual grafis untuk kebutuhan publikasi, baik dalam format digital maupun cetak resolusi tinggi. Dukungan terhadap format raster

dan vektor sekaligus memungkinkan pengguna untuk menggabungkan citra, grafik, dan teks ke dalam satu dokumen peta yang utuh, informatif, dan profesional. Kelebihan ini menjadikan Canvas X sebagai alat bantu penting dalam dunia akademik dan profesional, khususnya dalam penyajian hasil survei lapangan, peta geologi struktural, maupun output visual dari interpretasi data spasial dan seismotektonik (Wang dkk., 2021). Dengan kemampuannya dalam menyatukan elemen teknis dan estetika visual, Canvas X menjadi solusi ideal bagi peneliti dan praktisi yang membutuhkan akurasi tinggi dalam dokumentasi dan komunikasi data geospasial.

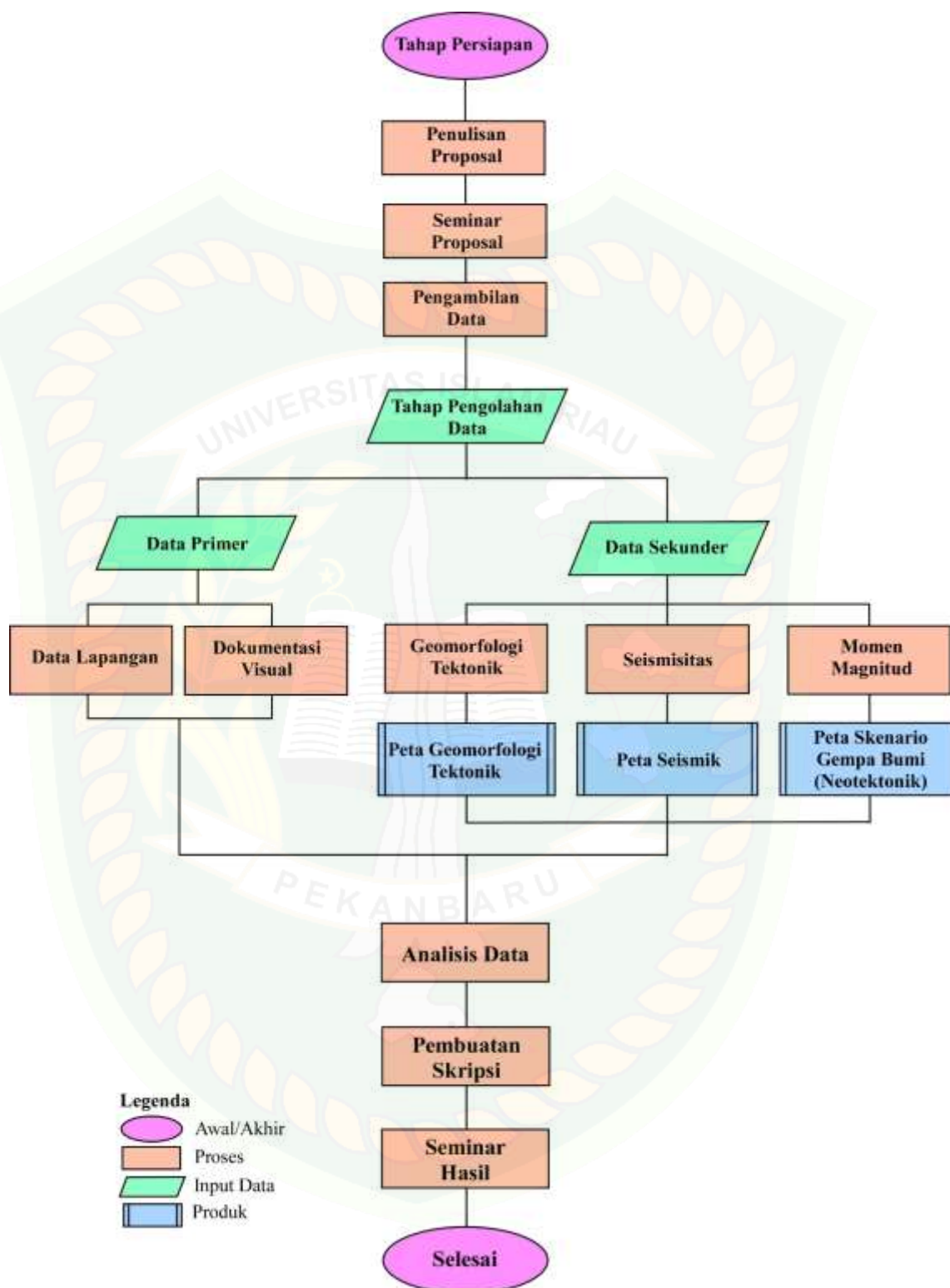
3.6.6 Timestamp

Aplikasi Timestamp merupakan perangkat lunak mobile yang dirancang khusus untuk mendukung kegiatan dokumentasi lapangan secara sistematis, akurat, dan terstruktur, terutama dalam bidang penelitian geologi, survei geomorfologi, dan pemetaan lingkungan. Aplikasi ini sangat berguna dalam mencatat data lapangan secara real-time karena dilengkapi dengan berbagai fitur otomatis yang merekam informasi penting, seperti koordinat GPS, waktu dan tanggal pengambilan data, arah azimuth (orientasi kamera atau pengamatan), ketinggian lokasi (*altitude*), serta penanda lokasi pada peta digital. Dengan fungsi geotagging ini, setiap foto atau catatan lapangan yang diambil secara otomatis diberi metadata spasial dan temporal, yang menjadi elemen penting dalam memastikan keabsahan dan keterlacakan data lapangan. Dalam konteks penelitian geologi dan pemetaan struktural, keberadaan aplikasi Timestamp sangat membantu dalam mendokumentasikan elemen-elemen penting seperti bidang sesar, lipatan, kekar, dan bukti deformasi permukaan dengan akurasi spasial tinggi. Data yang terekam dapat langsung diintegrasikan ke dalam sistem informasi geografis (SIG) untuk analisis lebih lanjut, sehingga mempercepat proses pemetaan tematik dan pengolahan data geospasial. Selain itu, penggunaan Timestamp juga meningkatkan efisiensi kerja lapangan karena mengurangi kesalahan pencatatan manual dan memastikan bahwa semua informasi lapangan tersimpan dengan format standar yang siap digunakan untuk

keperluan analisis, validasi, ataupun publikasi ilmiah. Dengan kemampuannya menggabungkan dokumentasi visual dan data spasial dalam satu platform, aplikasi ini menjadi alat pendukung yang sangat penting dalam penelitian berbasis observasi langsung di lapangan.

3.7 Alur Penelitian

Penelitian ini diawali dengan penyusunan skripsi yang berisi latar belakang, tujuan, rumusan masalah, dan metode penelitian, yang kemudian dipresentasikan dalam seminar skripsi untuk mendapatkan masukan dan persetujuan dari dosen pembimbing serta penguji. Setelah disetujui, tahapan dilanjutkan dengan penguasaan perangkat lunak pendukung seperti ArcGIS, GeoMapApp, *FaultKin*, *GeoRose*, dan Canvas X, yang digunakan dalam pengolahan dan visualisasi data. Proses pengolahan mencakup dua jenis data utama, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari kegiatan lapangan yang mencakup dokumentasi fitur geomorfologi tektonik, identifikasi sesar dan lipatan, pengambilan koordinat menggunakan aplikasi Timestamp, serta analisis bentuk lahan untuk mendukung pemetaan seismisitas dan penentuan *Moment Magnitude* (Mw). Sementara itu, data sekunder diperoleh dari sumber terbuka dan instansi terkait, seperti data gempa dari IRIS *Earthquake*, data SRTM, peta geologi, dan CMT, yang kemudian diolah menjadi peta tematik seperti peta geomorfologi tektonik, peta persebaran seismisitas, dan peta skenario gempa bumi. Seluruh data dianalisis secara menyeluruh untuk mengungkap dinamika deformasi dan potensi seismik di wilayah studi. Hasil temuan disusun dalam bentuk skripsi dan dipresentasikan dalam seminar hasil sebagai tahap akhir dari rangkaian penelitian ini. Alur penelitian ini disusun secara sistematis dan terstruktur guna menjamin keakuratan data, ketepatan analisis, serta keberhasilan dalam pencapaian tujuan penelitian (**Gambar 3.2**).



Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian

BAB IV

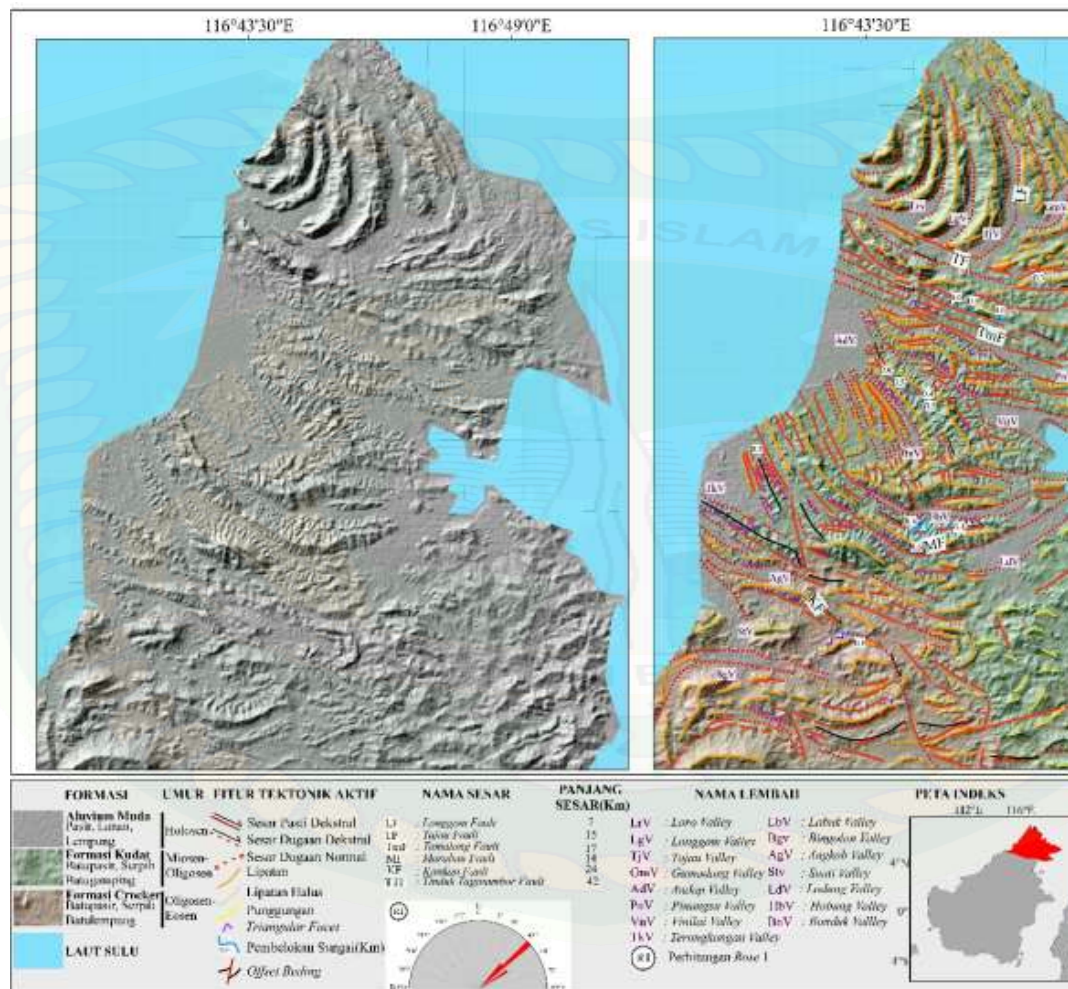
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Geomorfologi Tektonik

Analisis geomorfologi tektonik dilakukan untuk mengidentifikasi karakter bentang alam yang terbentuk akibat pengaruh aktivitas tektonik di wilayah penelitian. Kajian ini didasarkan pada observasi lapangan yang sistematis, interpretasi citra penginderaan jauh, serta analisis geomorfologi tektonik untuk mengenali indikasi deformasi seperti pembelokan sungai, punggung struktural, jejak sesar, bukit segitiga (*triangular facet*), dan lipatan. Parameter-parameter tersebut direkorelasi guna menilai tingkat keaktifan struktur. Tujuan utama penelitian ini adalah membedakan struktur tektonik tua dan muda berdasarkan karakteristik geomorfik yang berkembang. Struktur yang relatif muda umumnya dicirikan oleh morfologi yang masih tegas dan minim degradasi, sedangkan struktur yang lebih tua menunjukkan tingkat erosi yang lebih lanjut. Hasil analisis kemudian diintegrasikan dengan data seismisitas regional untuk memperkuat interpretasi struktur aktif dan menjadi dasar penyusunan peta skenario gempabumi. Luaran penelitian berupa peta geomorfologi tektonik, peta seismisitas dan peta skenario gempabumi ini dilakukan validasi bukti lapangan geologi. Kajian ini mencakup 9 daerah diantaranya: Tamalang, Kankan, Mangaris, Tandek, Matanggal, Kuppi, Manduring, Mempakat, dan Bengkoka, guna memperoleh gambaran dinamika tektonik regional secara komprehensif.

4.1.1 Tamalang

Daerah penelitian pada peta interpretasi struktur Daerah Tamalang menunjukkan kontrol tektonik yang sangat kompleks terhadap morfologi perbukitan dan pola kelurusan bentang alam. Terdapat 6 Sesar utama yang berkembang meliputi *Tinduk-Taginambor Fault* (TTF) sepanjang ± 42 km, *Kankan Fault* (KF) ± 24 km, *Marabau Fault* sepanjang ± 14 km, *Tamalang Fault* (TmF) sepanjang ± 17 km, *Tajau Fault* sepanjang ± 15 km, dan *Longgong Fault* sepanjang ± 7 km, ditunjukkan pada **Gambar 4.1**.

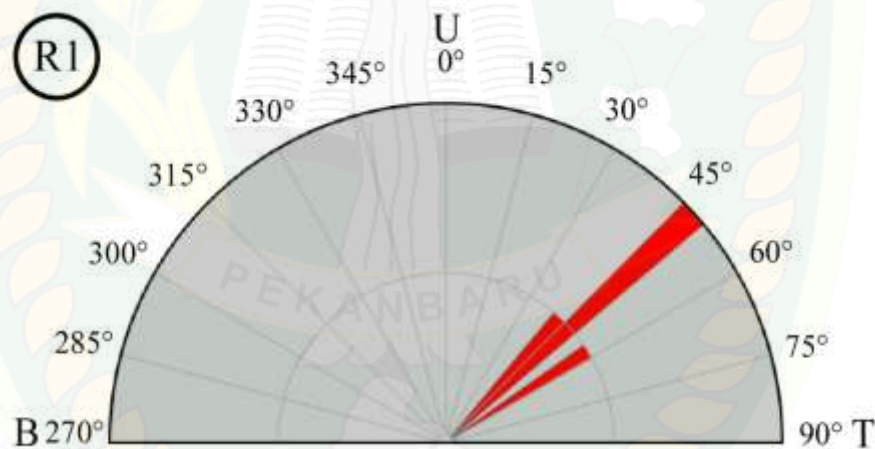


Gambar 4. 1 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Tamalang

Pada daerah penelitian dijumpai beberapa 15 lembah struktural yang teridentifikasi sangat beragam, di antaranya *Loro Valley* (LrV) dengan luas 1,2 km², *Longgom Valley* (LgV) dengan luas 1,8 km², *Tajau Valley* (TjV) dengan luas 5 km², *Gumadang Valley* (GmV) dengan luas 1,9 km², *Andap Valley* (AdV) dengan luas 7,5 km², *Pinangsu Valley* (PnV) dengan luas 2,12 km², *Vinilai Valley* (VnV) dengan luas 2 km², *Bonduk Valley* (BnV) dengan luas 0,8 km², *Hobung Valley* (HbV) dengan luas 2 km², *Lodung Valley* (LdV) dengan luas 4 km², *Labuk Valley* (LbV) dengan luas 1'5 km², *Terongkongon Valley* (TkV) dengan luas 10 km², *Bingolan Valley* (BgV) dengan luas 1,9 km², *Angkob Valley* (AgV) dengan luas 3 km², *Suati Valley* (StV) dengan luas 3,5 km² yang berkembang mengikuti zona sesar dan kelurusan lipatan utama. Lembah sempit LrV, LgV dan TjF dibentuk oleh pergerakan TF, diklasifikasikan sebagai *fault termination basin*. Lembah AdV, PnV dan VnV dibentuk oleh pergerakan TmF, diklasifikasikan sebagai lembah *releasing bend*. Lembah BnV, HbV dan LdV dibentuk oleh pergerakan MF, diklasifikasikan sebagai lembah *releasing bend*. Lembah TkV, BgV dan AgV dibentuk oleh pergerakan KF, diklasifikasikan sebagai lembah *releasing bend*.

Beberapa segmen sesar memperlihatkan fitur 4 *offset bedding* serta 10 pembelokan pembelokan sungai (*river offset*) yang signifikan. *Offset bedding* bergerak geser menganan dengan rata-rata pergerakan sejauh $\pm 0,7$ Km, hal ini mengindikasikan bahwa KF merupakan jenis sesar dekstral. Nilai rata-rata pembelokan sungai sejauh $\pm 0,5$ relatif ke arah kanan, hal ini mengindikasikan bahwa beberapa sesar diantaranya TmF, MF dan KF merupakan jenis sesar dektral. Kehadiran bukit segitiga hasil pergerakan TmF sejumlah 15 set dengan kemiringan ke arah utara, hal ini mengindikasikan kemiringan TmF. 23 set bukit segitiga hasil pergerakan MF dengan kemiringan ke arah selatan, hal ini mengindikasikan kemiringan MF. 5 set bukit segitiga hasil pergerakan KF dengan kemiringan berarah utara, hal ini mengindikasikan kemiringan KF. Keberadaan bukit segitiga di sepanjang beberapa gawir sesar yang menunjukkan arah kemringan sesar disebabkan oleh pengangkatan diferensial yang relatif muda.

Berdasarkan hasil analisis diagram rose (R1), orientasi punggung dan kelurusan struktur dominan berarah timurlaut–baratdaya hampir tegak lurus terhadap lintasan TTF, ditunjukkan pada **Gambar 4.2**. Pola ini konsisten dengan tren struktur utama di Daerah Tamalang, sehingga menegaskan bahwa morfologi wilayah secara signifikan dikontrol oleh sistem sesar geser dan lipatan yang berkembang pada satuan Formasi Kudat berumur Miosen–Oligosen serta Formasi Crocker berumur Oligosen–Eosen. Geologi di daerah ini dari tua ke muda di dominasi oleh Formasi Crocker, Formasi Kudat dan Aluvium Muda. Formasi Crocker tersusun atas litologi batuan sedimen berupa batupasir, serpih dan batulempung yang berumur Oligosen hingga Eosen. Formasi Kudat tersusun atas litologi sedimen berupa batupasir, serpih, batugamping yang berumur Miosen hingga Oligosen. Sedangkan Aluvium muda yang terdiri dari pasir, lanau dan lempung berumur Holosen.



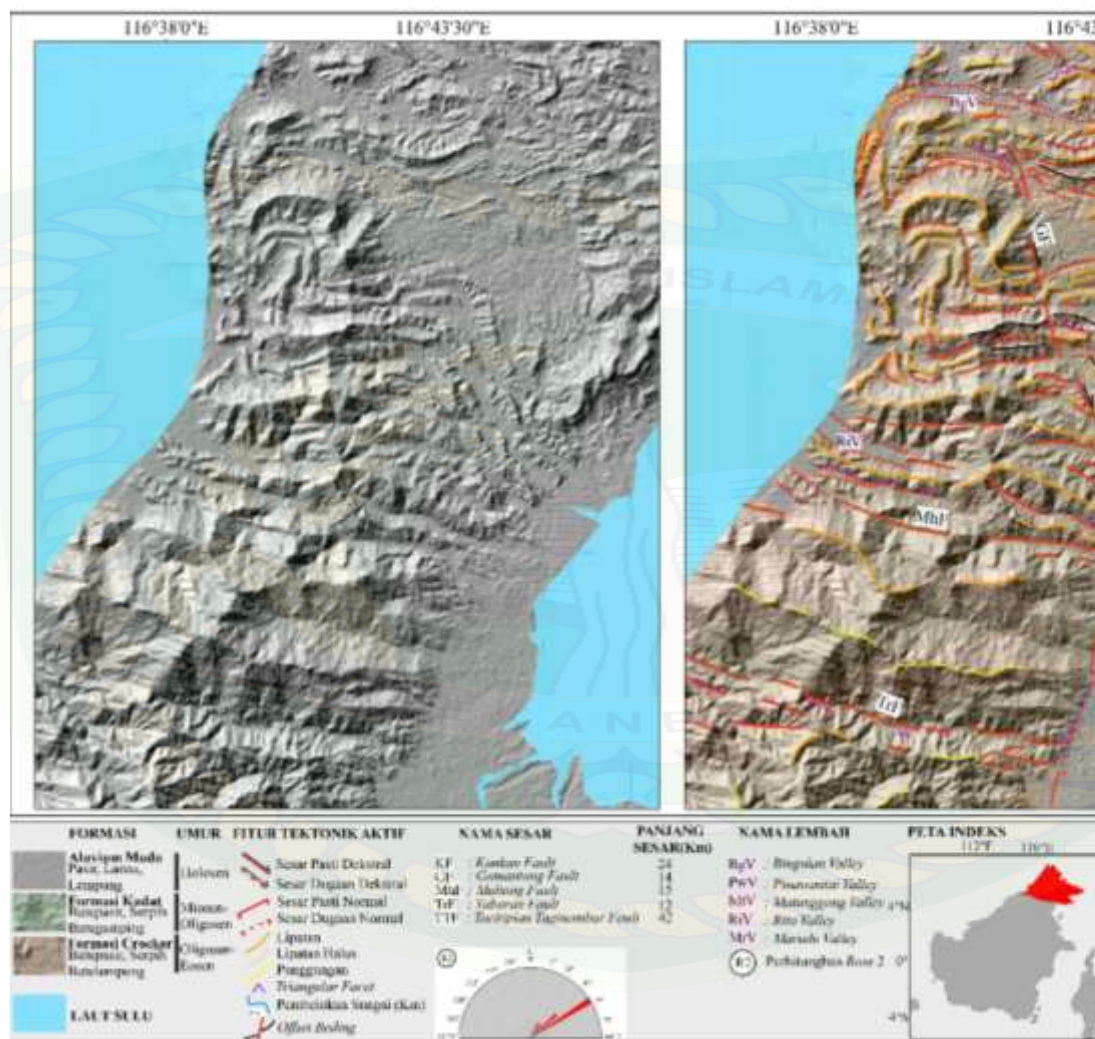
Gambar 4. 2 Analisis Diagram *Rose* (R1) Menunjukkan Arah Dominasi Punggungan Berarah Timurlaut-Baratdaya

4.1.2 Kankan

Daerah Kankan menunjukkan kontrol tektonik yang kuat terhadap geomorfologi wilayah. Terdapat 5 Sesar utama yang berkembang meliputi *Taritipan - Taginambor Fault* (TTF) ± 42 km, *Kankan Fault* (KF) ± 24 km, *Muhong Fault* (MhF) ± 15 km, *Gumantang Fault* (GF) ± 14 km, dan *Taburan Fault* (TrF) ± 12 km, ditunjukkan pada **Gambar 4.3**. Sesar-sesar ini mengontrol

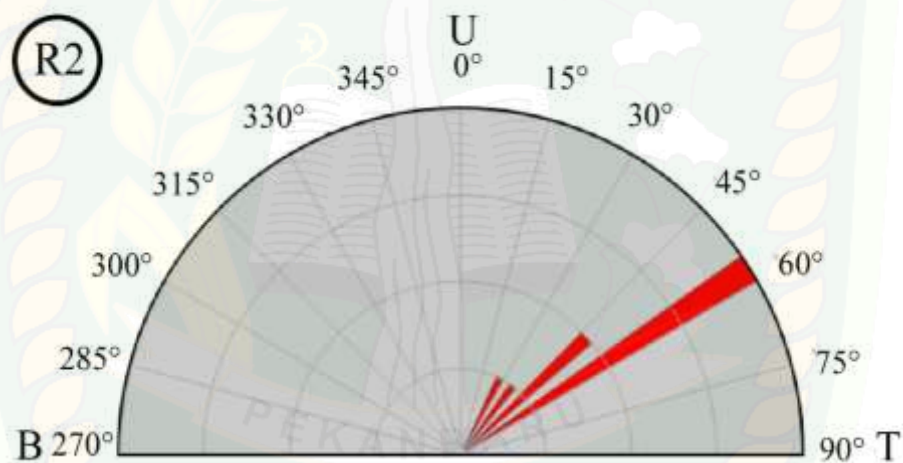
kelurusan punggung, pembentukan lembah, serta pembelokan aliran sungai. Terdapat 5 lembah struktural yang berkembang meliputi *Bingolan Valley* (BgV) dengan luas 1,9 km², *Pinawantai Valley* (PwV) dengan luas 0,6 km², *Matunggong Valley* (MtV) dengan luas 3,4 km², *Rita Valley* (RiV) dengan luas 2,8 km², dan *Marudu Valley* (MrV) dengan luas 437 km², yang umumnya mengikuti jalur sesar utama dan menunjukkan morfologi pelebaran lembah serta pengisian sedimen aluvial. Lembah sempit PwV dan MtV dibentuk oleh pergerakan KF. Lembah BgV, dibentuk oleh pergerakan GF. Lembah RiV dibentuk oleh pergerakan MhF. Lembah *Marudu Valley* (MrV) dibentuk oleh pergerakan TTF. Lembah PwV, MtV, BgV, RiV, MrV diklasifikasikan sebagai *releasing bend*.

Beberapa segmen sesar memperlihatkan fitur empat *offset bedding* serta 3 pembelokan sungai (*river offset*) yang signifikan. *Offset bedding* bergerak geser menganan dengan rata-rata pergerakan sejauh $\pm 0,7$ Km, hal ini mengindikasikan bahwa KF merupakan jenis sesar dekstral. Nilai rata-rata pembelokan sungai sejauh $\pm 0,5$ relatif ke arah kanan, hal ini menguatkan lagi bukti bahwa beberapa sesar diantaranya KF dan GF merupakan jenis sesar dekstral. Kehadiran bukit segitiga hasil pergerakan KF sejumlah 5 set dengan kemiringan ke arah barat, hal ini mengindikasikan kemiringan KF. 5 set bukit segitiga hasil pergerakan GF dengan kemiringan ke arah selatan, hal ini mengindikasikan kemiringan GF. Keberadaan bukit segitiga di sepanjang beberapa gawir sesar yang menunjukkan arah kemiringan sesar disebabkan oleh pengangkatan diferensial yang relatif muda.



Gambar 4. 3 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Kankan

Berdasarkan hasil perhitungan diagram *rose* (R2), arah punggung dominan berorientasi timurlaut–baratdaya, ditunjukkan pada **Gambar 4.4**. Pola ini searah dengan tren struktur utama regional, menegaskan bahwa morfologi Daerah Kankan dikontrol oleh sistem sesar aktif berarah Baratlaut-Tenggara dengan pengaruh deformasi geser dan ekstensional lokal. Geologi di daerah ini dari tua ke muda di dominasi oleh Formasi Crocker, Formasi Kudat dan Aluvium muda. Formasi Crocker tersusun atas litologi batuan sedimen berupa batupasir, serpih dan batulempung yang berumur Oligosen hingga Eosen. Formasi Kudat tersusun atas litologi sedimen berupa batupasir, serpih, batugamping yang berumur Miosen hingga Oligosen. Sedangkan Aluvium muda yang terdiri dari pasir, lanau dan lempung berumur Holosen.



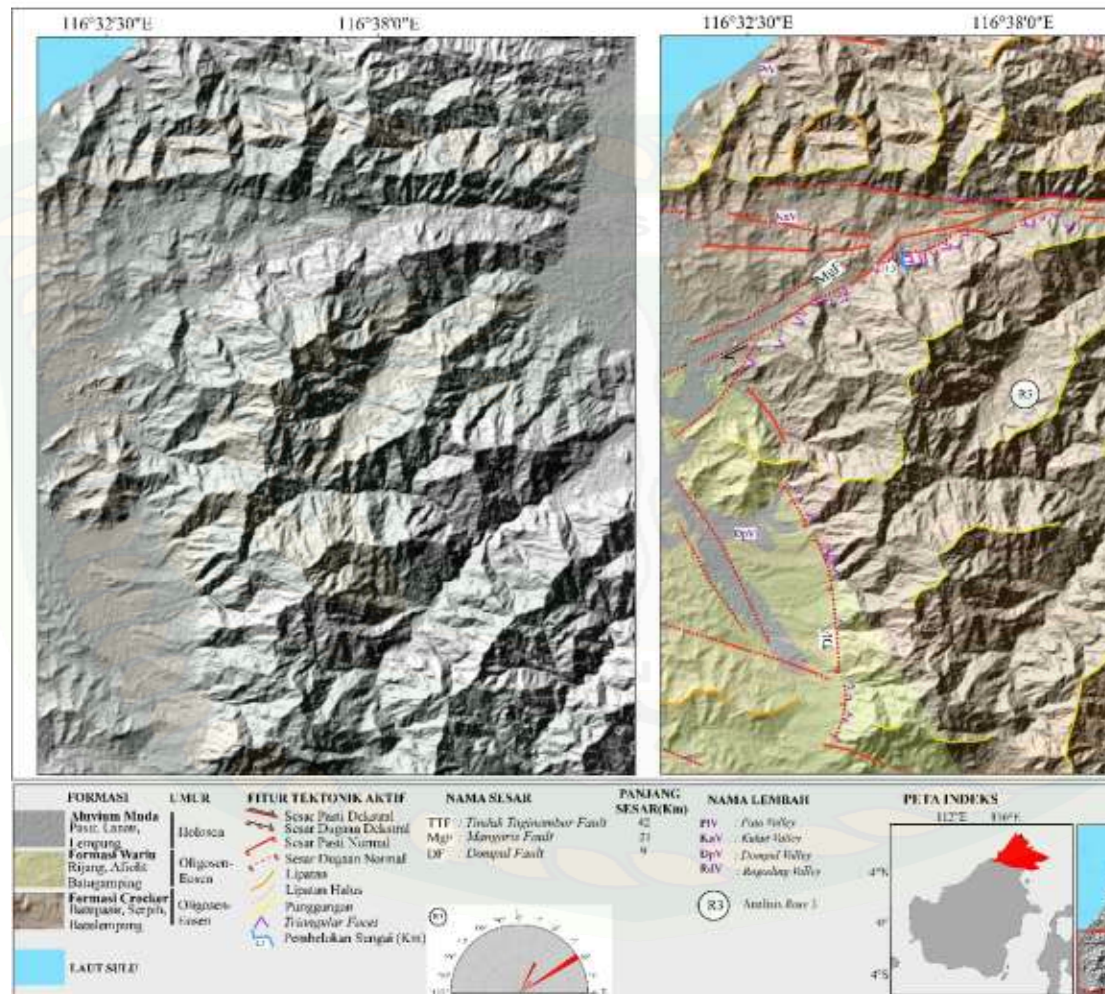
Gambar 4. 4 Analisis Diagram *Rose* (R2) Menunjukkan Arah Dominasi Punggungan Berarah Timurlaut-Baratdaya

4.1.3 Mangaris

Daerah penelitian pada peta interpretasi struktur Daerah Marudu menunjukkan kontrol tektonik yang kuat terhadap morfologi pegunungan yang curam dan pola kelurusan bentang alam yang tegas. Struktur utama yang berkembang meliputi *Tinduk - Taginambor Fault* (TTF) sepanjang ± 42 km, *Mangaris Fault* (MgF) sepanjang ± 21 km, dan *Dompul Fault* (DF) sepanjang ± 9 km, ditunjukkan pada **Gambar 4.5**. Keempat sistem sesar ini berperan dominan dalam membentuk orientasi punggung yang memanjang serta pola aliran Sungai yang dikontrol oleh struktur geologi.

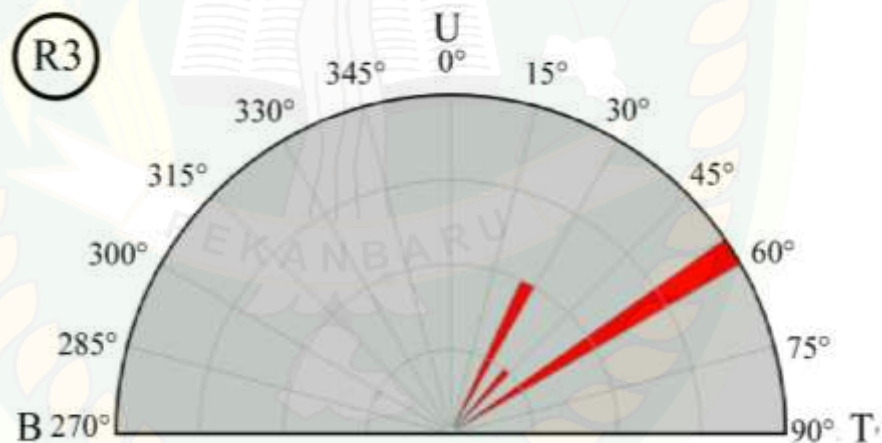
Terdapat 4 Lembah struktural yang teridentifikasi meliputi *Pata Valley* (PtV) dengan luas 0,6 km², *Kukut Valley* (KuV) dengan luas 1,2 km², *Dompul Valley* (DpV) dengan luas 5 km², dan *Rugading Valley* (RdV) dengan luas 2 km² yang berkembang mengikuti zona lemah akibat aktivitas sesar utama. Lembah sempit KuV dibentuk oleh pergerakan MgF. Lembah DpV, dibentuk oleh pergerakan DF. KuV dan DpV diklasifikasikan sebagai lembah *releasing bend*. PtV dan RdV terbentuk karna erosi dari ril punggung.

Beberapa segmen sesar memperlihatkan fitur 1 pembelokan sungai (*river offset*) yang signifikan. Nilai rata-rata pembelokan sungai sejauh $\pm 1,3$ relatif ke arah kanan, hal ini mengindikasikan bahwa sesar MgF merupakan jenis sesar dekstral. Kehadiran bukit segitiga hasil pergerakan MgF sejumlah 25 set dengan kemiringan ke arah barat laut, hal ini mengindikasikan kemiringan Mgf. Keberadaan bukit segitiga di sepanjang beberapa gawir sesar yang menunjukkan arah kemiringan sesar disebabkan oleh pengangkatan diferensial yang relatif muda.



Gambar 4. 5 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Mangaris

Berdasarkan hasil analisis diagram *rose* (R3), orientasi punggungan dan kelurusan struktur di daerah ini menunjukkan arah dominan timurlaut-baratdaya hampir tegak lurus terhadap lintasan MgF, ditunjukkan pada **Gambar 4.6**. Pola ini menegaskan bahwa morfologi wilayah Mengaris dikontrol secara ketat oleh sistem sesar geser (baik dekstral maupun sinistral) serta sesar normal yang memotong satuan Formasi Wariu (Oligosen-Eosen) dan Formasi Crocker (Oligosen-Eosen). Geologi di daerah ini dari tua ke muda di dominasi oleh Formasi Crocker, Formasi Wariu dan Aluvium muda. Formasi Crocker tersusun atas litologi batuan sedimen berupa batupasir, serpih dan batulempung yang berumur Oligosen hingga Eosen. Formasi Wariu tersusun atas litologi sedimen berupa rijang, ofiolit, dan batugamping yang berumur Oligosen hingga Eosen. Sedangkan Aluvium muda yang terdiri dari pasir, lanau dan lempung berumur Holosen.



Gambar 4. 6 Analisis Diagram Rose (R3) Menunjukkan Arah Dominasi Punggungan Berarah Timurlaut-Baratdaya

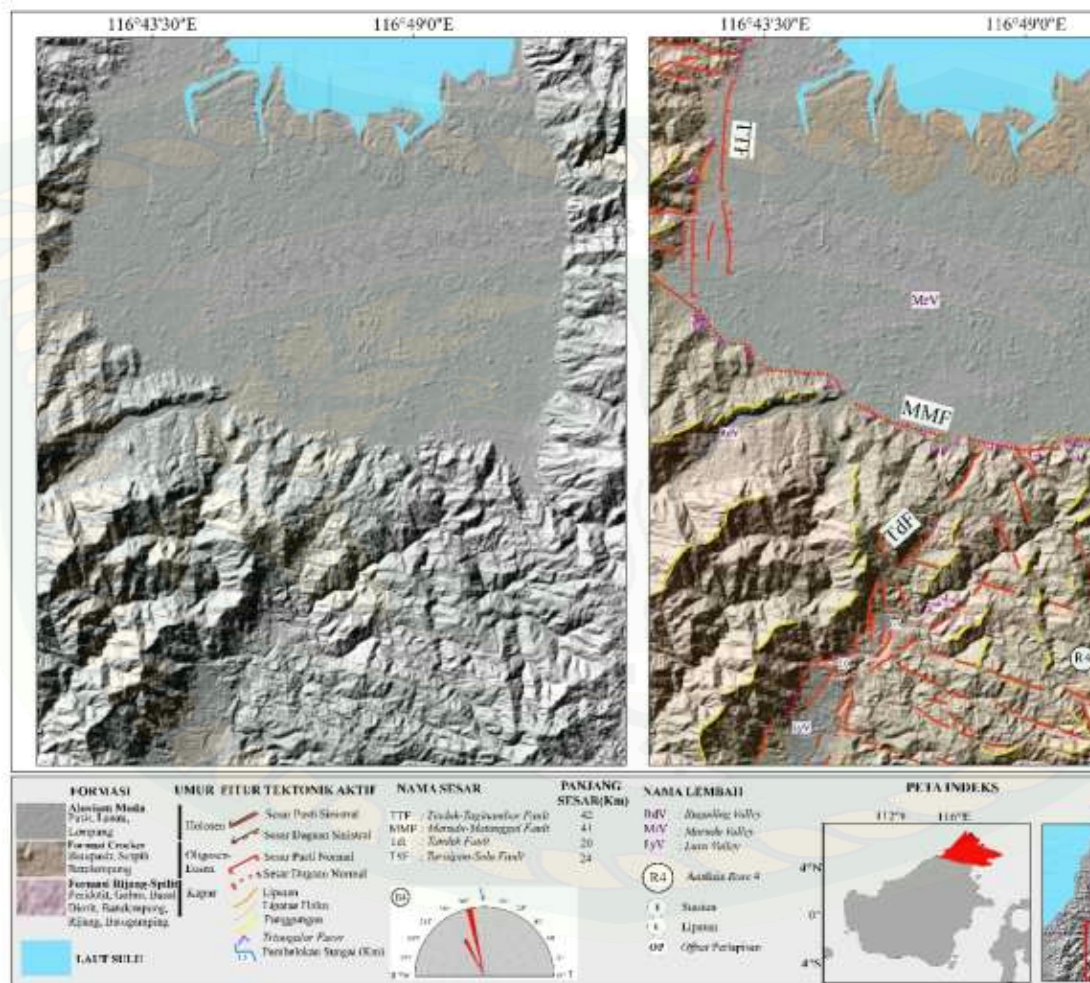
4.1.4 Tandek

Daerah penelitian pada peta interpretasi struktur Daerah Tandek menunjukkan kontrol tektonik yang kuat terhadap morfologi wilayah, terutama pada batas antara dataran pesisir dan perbukitan di bagian selatan. Terdapat 4 sesar utama yang berkembang meliputi *Tinduk - Taginambor Fault* (TTF) sepanjang ± 42 km, *Marudu - Matanggal Fault* (MMF) ± 41 km, *Tandek Fault*

(TdF) ± 20 km, dan *Taritipan - Sulu Fault* (TSF) ± 24 km, ditunjukkan pada **Gambar 4.7**.

Pada daerah penelitian dijumpai 3 lembah struktural diantaranya *Rugading Valley* (RdV) dengan luas 2 km², *Marudu Valley* (MrV) dengan luas 437 km², dan *Luyu Valley* (LyV) dengan luas 12 km². Lembah sempit LyV dibentuk oleh pergerakan TdF, diklasifikasikan sebagai *releasing bend*. Lembah MrV, dibentuk oleh pergerakan percabangan tiga sesar yaitu TTF, MMF, TSF, diklasifikasikan sebagai lembah *fault branch*.

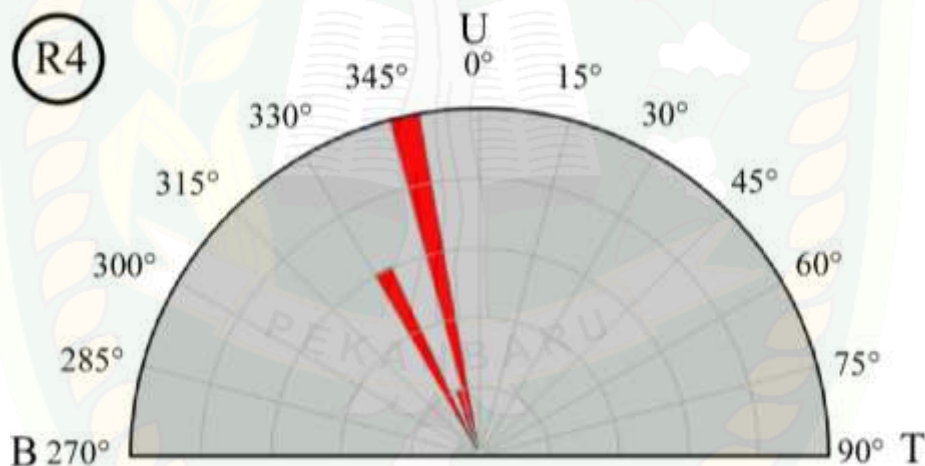
Beberapa segmen sesar memperlihatkan fitur tiga pembelokan sungai (*offset river*) yang signifikan dengan nilai rata-rata pembelokan sungai sejauh $\pm 0,7$ relatif ke arah kiri, hal ini mengindikasikan bahwa sesar TdF merupakan jenis sesar sinistral. Kehadiran bukit segitiga hasil pergerakan TdF sejumlah 2 set dengan kemiringan ke tenggara, hal ini mengindikasikan kemiringan TdF. Keberadaan bukit segitiga di sepanjang beberapa gawir sesar yang menunjukkan arah kemiringan sesar disebabkan oleh pengangkatan diferensial yang relatif muda.



Gambar 4. 7 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Tandek

Berdasarkan hasil analisis diagram *rose* (R4), orientasi punggungan dominan berarah baratlaut–tenggara, ditunjukkan pada **Gambar 4.8**. Pola ini searah dengan tren struktur utama regional, sehingga menegaskan bahwa morfologi Daerah Tandek dikontrol oleh sistem sesar berarah Baratlaut-Tenggara dengan komponen deformasi geser yang signifikan.

Geologi di daerah ini dari tua ke muda di dominasi oleh Formasi Rijang-Split, Formasi Crocker dan Aluvium muda. Formasi Rijang-Split tersusun atas litologi batuan berupa peridotit, gabro, basal, diorit, batulempung, rijang, dan batugamping yang berumur Kapur. Formasi Crocker tersusun atas litologi sedimen berupa batupasir, serpih, batulempung yang berumur Oligosen hingga Eosen. Sedangkan Aluvium muda yang terdiri dari pasir, lanau dan lempung berumur Holosen.



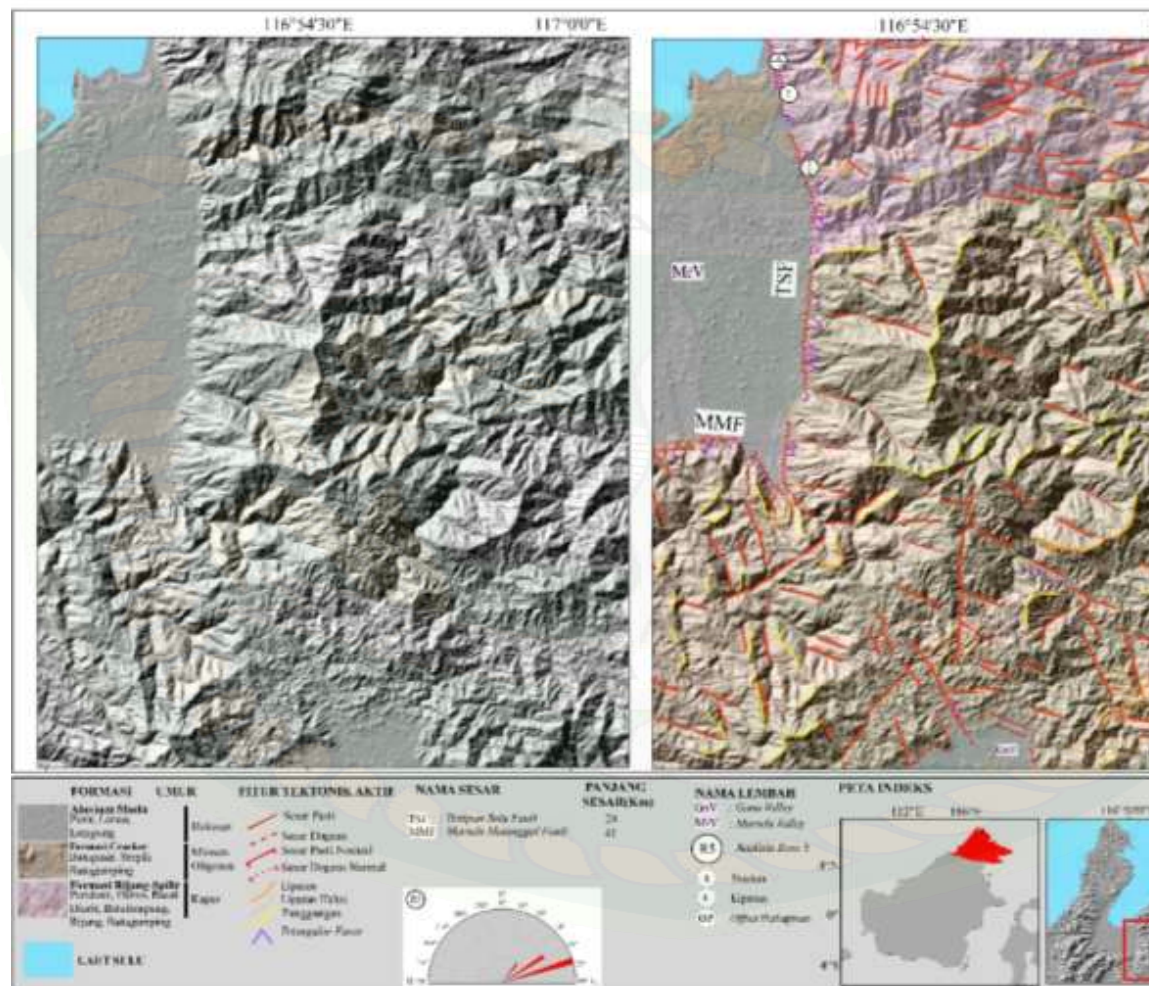
Gambar 4. 8 Analisis Diagram Rose (R4) Menunjukkan Arah Dominasi Punggungan Berarah Barat Laut – Tenggara

4.1.5 Matanggal

Daerah penelitian pada peta interpretasi struktur Daerah Matanggal memperlihatkan kontrol tektonik yang kuat terhadap morfologi perbukitan dan batas pesisir. Terdapat 2 sesar utama yang berkembang meliputi *Taritipan - Sulu Fault* (TSF) sepanjang ± 24 km dan *Marudu–Matanggal Fault* (MMF) ± 41 km, ditunjukkan pada **Gambar 4.9**.

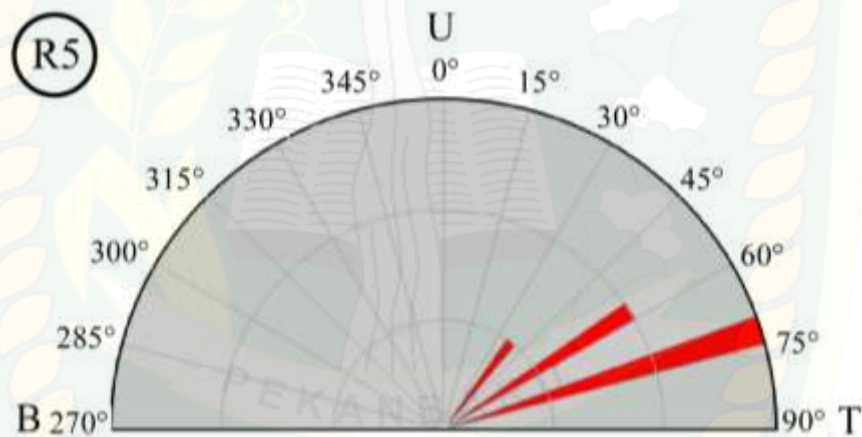
Pada daerah penelitian terdapat 2 lembah struktural yang teridentifikasi yang sangat beragam yaitu *Gana Valley* (GnV) dengan luas 21 km² dan *Marudu Valley* (MrV) dengan luas 437 km². MrV dibentuk oleh pergerakan MMF dan TSF, diklasifikasikan sebagai *fault branch bend*. *Gana Valley* dibentuk oleh pergerakan segmen MMF diklasifikasikan sebagai *releasing bend*.

Kehadiran bukit segitiga hasil pergerakan MMF sejumlah 11 set dengan kemiringan ke arah utara, hal ini mengindikasikan kemiringan MMF. 24 set bukit segitiga hasil pergerakan TSF dengan kemiringan ke arah barat, hal ini mengindikasikan kemiringan TSF. Keberadaan bukit segitiga di sepanjang beberapa gawir sesar yang menunjukkan arah kemiringan sesar disebabkan oleh pengangkatan diferensial yang relatif muda.



Gambar 4. 9 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Matanggal

Berdasarkan hasil analisis diagram *rose* (R5), orientasi punggungan dominan berarah timurlaut–baratdata, ditunjukkan pada **Gambar 4.10**. Pola ini searah dengan tren struktur utama regional, sehingga menegaskan bahwa morfologi Daerah Matanggal dikontrol oleh sistem sesar berarah Baratlaut-Tenggara dengan komponen deformasi geser yang signifikan serta pengaruh ekstensional lokal pada zona lembah. Geologi di daerah ini dari tua ke muda di dominasi oleh Formasi Rijang-Split, Formasi Crocker dan Aluvium muda. Formasi Rijang-Split tersusun atas litologi batuan berupa peridotit, gabro, basal, diorit, batulempung, rijang, dan batugamping yang berumur Kapur. Formasi Crocker tersusun atas litologi sedimen berupa batupasir, serpih, batulempung yang berumur Oligosen hingga Eosen. Sedangkan Aluvium muda yang terdiri dari pasir, lanau dan lempung berumur Holosen.



Gambar 4. 10 Analisis Diagram *Rose* (R2) Menunjukkan Arah Dominasi Punggungan Berarah Timurlaut-Baratdaya

4.1.6 Kuppi

Daerah penelitian pada peta interpretasi struktur Daerah Kuppi menunjukkan kontrol tektonik yang kuat terhadap morfologi perbukitan dan pola kelurusan bentang alam. Terdapat 3 sesar utama yang berkembang meliputi *Kuppi Fault* (KpF) sepanjang ± 18 km, *Sonsongan - Beluran Fault* (SBF) ± 19 km, dan *Ranggal Fault* (RF) ± 20 km ditunjukkan pada **Gambar 4.11**. Ketiga sesar ini berperan dalam mengontrol orientasi punggungan, pembentukan lembah, serta pembelokan aliran sungai.

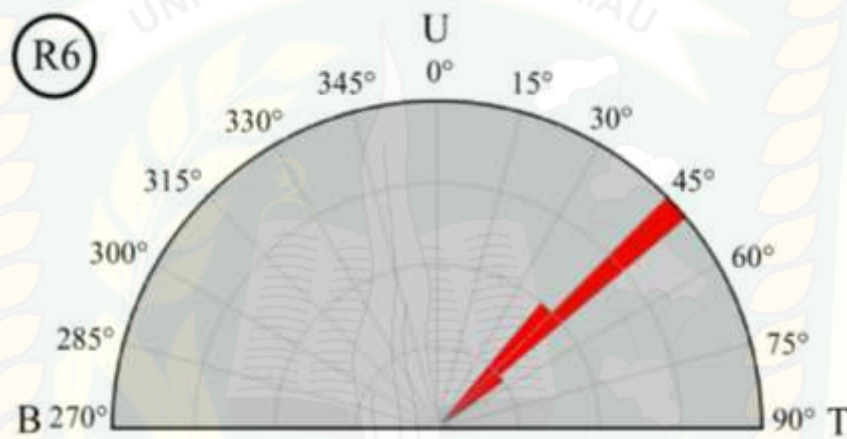
Lembah struktural yang teridentifikasi yaitu *Kawanan Valley* (KwV) dengan luas 2,5 km² yang berkembang mengikuti zona sesar utama, khususnya pada lintasan SF. Lembah sempit KwV dibentuk oleh pergerakan SF, diklasifikasikan sebagai *releasing bend*.

Beberapa segmen sesar memperlihatkan fitur 16 *offset bedding* serta 4 pembelokan pembelokan sungai (*river offset*) yang signifikan. *Offset bedding* bergerak geser menganan dengan rata-rata pergerakan sejauh $\pm 1,3$ Km, hal ini mengindikasikan bahwa RF merupakan jenis sesar dekstral. Nilai rata-rata pembelokan sungai sejauh $\pm 0,9$ relatif ke arah kanan, hal ini mengindikasikan bahwa beberapa sesar diantaranya KpF, SBF dan RF merupakan jenis sesar dekstral. Kehadiran bukit segitiga hasil pergerakan KpF sejumlah 4 set dengan kemiringan ke arah timurlaut, hal ini mengindikasikan kemiringan KpF. 19 set bukit segitiga hasil pergerakan SBF dengan kemiringan ke arah baratdaya, hal ini mengindikasikan kemiringan SBF. Keberadaan bukit segitiga di sepanjang beberapa gawir sesar yang menunjukkan arah kemiringan sesar disebabkan oleh pengangkatan diferensial yang relatif muda.



Gambar 4. 11 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Kuppi

Berdasarkan hasil analisis diagram rose (R6), orientasi punggungan dominan berarah timurlaut–baratdaya, ditunjukkan pada **Gambar 4.12**. Pola ini konsisten dengan tren struktur utama di Daerah Kuppi, sehingga menegaskan bahwa morfologi wilayah dikontrol oleh sistem sesar geser berarah Baratlaut-Tenggara yang berkembang pada satuan Formasi Kudat berumur Miosen–Oligosen. Geologi di daerah ini dari tua ke muda di dominasi oleh Formasi Crocker tersusun atas litologi sedimen berupa batupasir, serpih, batulempung yang berumur Oligosen hingga Eosen.



Gambar 4. 12 Analisis Diagram *Rose* (R6) Menunjukkan Arah Dominasi Punggungan Berarah Timurlaut-Baratdaya

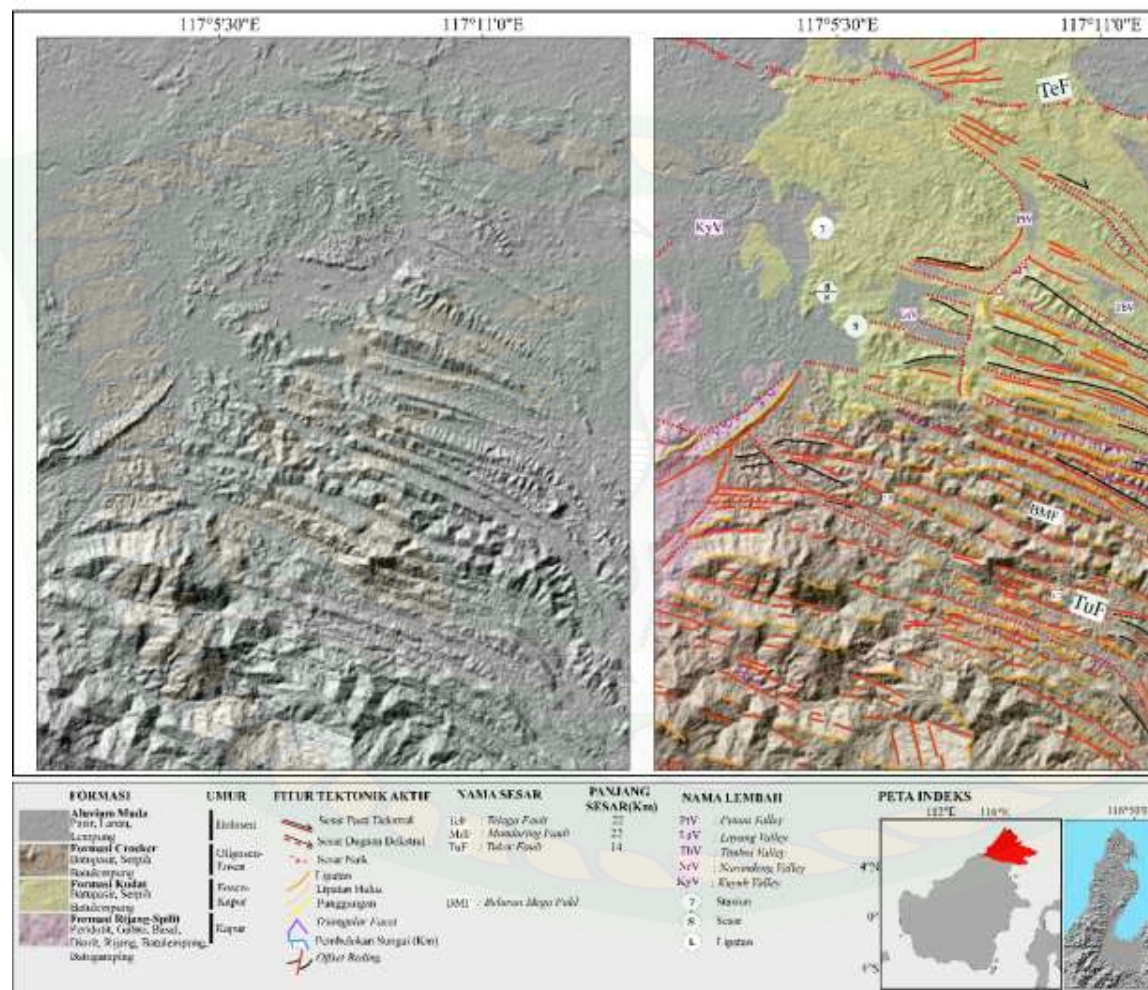
4.1.7 Manduring

Daerah penelitian pada peta interpretasi struktur Daerah Manduring menunjukkan kontrol tektonik yang intensif terhadap pola kelurusan bentang alam dan morfologi perbukitan yang sangat rapat. Terdapat tiga sesar utama yang berkembang didominasi oleh *Manduring Fault* (MdF) sepanjang ± 22 km, *Telaga Fault* (TeF) sepanjang ± 22 km, *Tukar Fault* (TuF) sepanjang ± 32 km, ditunjukkan pada **Gambar 4.13**. Sistem sesar ini menjadi pengontrol utama bagi rangkaian punggungan yang sejajar serta pola pengaliran sungai di wilayah tersebut. Terdapat lima lembah struktural yang teridentifikasi meliputi *Petani Valley* (PtV) dengan luas 2 km², *Layung Valley* (LaV) dengan luas 5 km², *Timboi Valley* (TbV) dengan luas 4 km²,

Narandong Valley (NrV) dengan luas 189 km², dan *Kuyuh Valley* (KyV) dengan luas 336 km² yang berkembang mengikuti jalur zona sesar dan kelurusan lipatan. Lembah sempit PtV, TbV dan NrV dibentuk oleh pergerakan MdF, diklasifikasikan sebagai *releasing bend*. KyV dan LaV terbentuk akibat pergerakan sesar TeF, diklasifikasikan sebagai lembah *termination fault*.

Sesar MdF memperlihatkan fitur 10 *offset bedding* serta 4 pembelokan sungai (*river offset*) yang signifikan. *Offset bedding* bergerak geser menganan dengan rata-rata pergerakan sejauh $\pm 0,8$ Km, hal ini mengindikasikan bahwa MdF merupakan jenis sesar dekstral. Nilai rata-rata pembelokan sungai sejauh $\pm 6,9$ km relatif ke arah kanan, hal ini mengindikasikan sesar TdF merupakan jenis sesar dekstral. Kehadiran bukit segitiga hasil pergerakan MdF sejumlah 1 set dengan kemiringan ke arah barat, hal ini mengindikasikan kemiringan MdF. Keberadaan bukit segitiga di sepanjang beberapa gawir sesar yang menunjukkan arah kemiringan sesar disebabkan oleh pengangkatan diferensial yang relatif muda. Terdapat lipatan mega yaitu *Beluran Mega Fold* (BMF) yang disebabkan oleh pergerakan *Tukar Fault* (TuF) sehingga membentuk sayap kiri lipatan berarah baratlut – tenggara. Kemudian lipatan BMF ini dipotong oleh pergerakan sesar MdF yang berarah utara selatan, terletak di bagian timur dengan indikasi 10 *offset bedding*.

Geologi di daerah ini dari tua ke muda di dominasi oleh Formasi Rijang-Split, Formasi Kudat, Formasi Crocker dan Aluvium Muda. Formasi Rijang-Split tersusun atas litologi batuan Vulkanik berupa peridotit, gabro, basal, diorit, batulempung, rijang, dan batugamping yang berumur Kapur. Formasi Kudat tersusun atas litologi sedimen berupa batupasir, serpih dan batulempung yang berumur Eosen hingga Kapur. Formasi Crocker tersusun atas litologi sedimen berupa batupasir, serpih, batulempung yang berumur Oligosen hingga Eosen. Sedangkan Aluvium muda yang terdiri dari pasir, lanau dan lempung berumur Holosen.

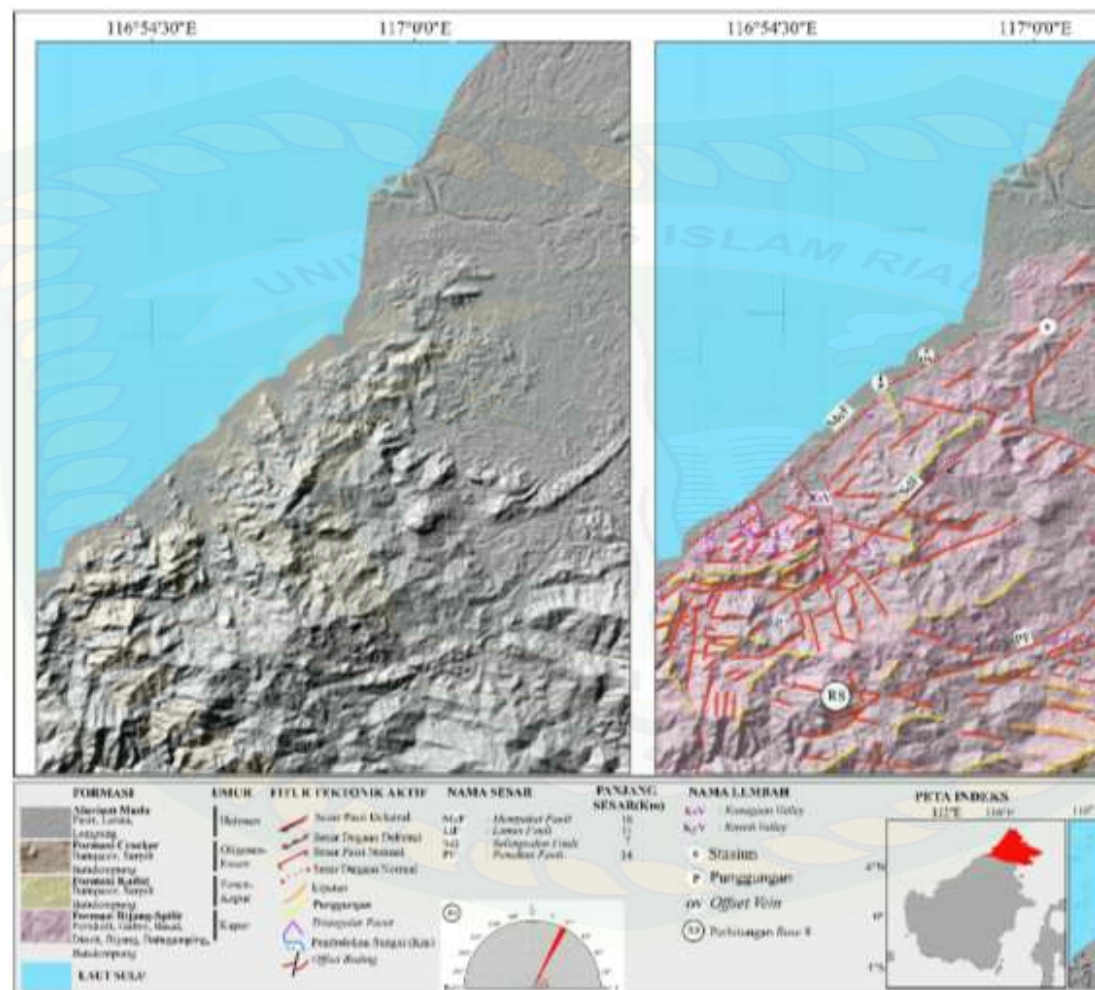


Gambar 4. 13 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Manduring

4.1.8 Mempakat

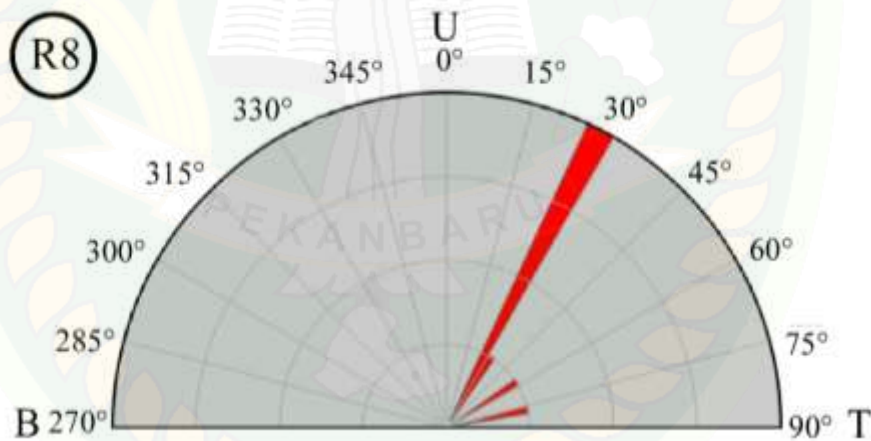
Daerah penelitian pada peta interpretasi struktur Daerah Mempakat menunjukkan kontrol tektonik yang kuat terhadap morfologi perbukitan dan pola kelurusan bentang alam. Terdapat 4 sesar utama yang berkembang didominasi oleh *Mempakat Fault* (MeF) sepanjang ± 18 km, *Limau Fault* (LiF) sepanjang ± 11 km, *Salimpodon Fault* (SF) sepanjang ± 7 km dan *Panakan Fault* (PF) sepanjang ± 14 km, ditunjukkan pada **Gambar 4.14**. Sistem sesar ini berperan penting dalam mengontrol orientasi punggungan, pembentukan lembah struktural, serta pola pengaliran sungai di sepanjang pesisir Laut Sulu. Lembah struktural yang teridentifikasi yaitu *Kasagaan Valley* (KsV) dengan luas $4,5 \text{ km}^2$ dan *Kuyuh Valley* (KyV) dengan luas 336 km^2 yang berkembang mengikuti zona sesar utama. KsV terbentuk karna pergerakan sesar MeF, diklasifikasikan sebagai lembah *releasing bend*. KyV terbentuk karna pergerakan sesar MeF dan SdF, diklasifikasikan sebagai lembah *fault termination*.

Beberapa segmen sesar memperlihatkan fitur 2 *offset bedding* serta 1 pembelokan pembelokan sungai (*river offset*) yang signifikan. *Offset bedding* bergerak geser menganan dengan rata-rata pergerakan sejauh $\pm 1,0$ Km, hal ini mengindikasikan bahwa SdF merupakan jenis sesar dekstral. Nilai rata-rata pembelokan sungai sejauh $\pm 0,8$ relatif ke arah kanan, hal ini mengindikasikan bahwa beberapa sesar diantaranya SdF, LiF dan PF merupakan jenis sesar dekstral. Kehadiran bukit segitiga hasil pergerakan SdF sejumlah 8 set dengan kemiringan ke arah baratlaut, hal ini mengindikasikan kemiringan SdF. 6 set bukit segitiga hasil pergerakan LiF dengan kemiringan ke arah barat, hal ini mengindikasikan kemiringan LiF. 3 set bukit segitiga hasil pergerakan PF dengan kemiringan berarah baratlaut, hal ini mengindikasikan kemiringan PF. Keberadaan bukit segitiga di sepanjang beberapa gawir sesar yang menunjukkan arah kemiringan sesar disebabkan oleh pengangkatan diferensial yang relatif muda.



Gambar 4. 14 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Mempakat

Berdasarkan hasil analisis diagram *rose* (R8), orientasi punggungan dominan berarah timurlaut-baratdaya ditunjukkan pada **Gambar 4.15**. Pola ini konsisten dengan tren struktur utama di Daerah Mempakat, sehingga menegaskan bahwa morfologi wilayah dikontrol oleh sistem sesar geser berarah timurlaut-baratdaya yang berkembang pada satuan Formasi Kudat berumur Eosen–Kapur dan Formasi Crocker berumur Oligosen–Eosen. Geologi di daerah ini dari tua ke muda di dominasi oleh Formasi Rijang-Spilit, Formasi Kudat, Formasi Crocker dan Aluvium muda. Formasi Rijang-Spilit tersusun atas litologi batuan Vulkanik berupa peridotit, gabro, basal, diorit, batulempung, rijang, dan batugamping yang berumur Kapur. Formasi Kudat tersusun atas litologi sedimen berupa batupasir, serpih dan batulempung yang berumur Eosen hingga Kapur. Formasi Crocker tersusun atas litologi sedimen berupa batupasir, serpih, batulempung yang berumur Oligosen hingga Eosen. Sedangkan Aluvium muda yang terdiri dari pasir, lanau dan lempung berumur Holosen



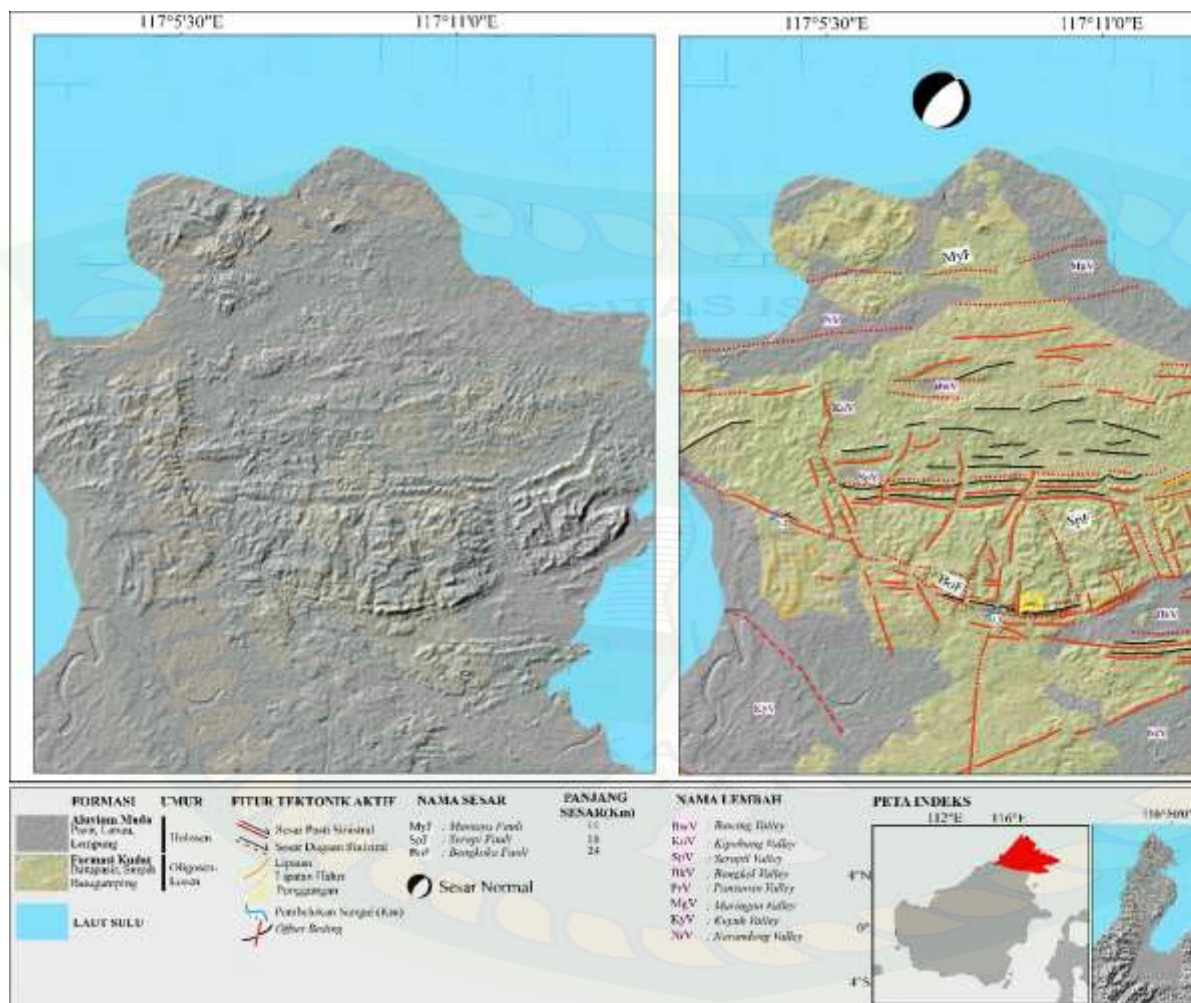
Gambar 4. 15 Analisis Diagram *Rose* (R8) Menunjukkan Arah Dominasi Punggungan Berarah Timurlaut-Baratdaya

4.1.9 Bengkoka

Daerah penelitian pada peta interpretasi struktur Daerah Bengkoka menunjukkan kontrol tektonik yang sangat kuat terhadap morfologi perbukitan dan pola kelurusan bentang alam di Semenanjung Bengkoka. Terdapat 3 sesar utama yang berkembang meliputi *Bengkoka Fault* (BoF)

sepanjang ± 24 km, *Mantaya Fault* (MyF) ± 11 km, dan *Serupi Fault* (SpF) ± 10 km, ditunjukkan pada **Gambar 4.16**. Pada daerah penelitian terdapat 8 lembah di antaranya *Maringan Valley* (MgV) dengan luas 28 km², *Pansuran Valley* (PrV) dengan luas 48 km², *Bawing Valley* (BwV) dengan luas 0,4 km², *Kipuhung Valley* (KuV) dengan luas 0,5 km², *Serupil Valley* (SpV) dengan luas 6 km², dan *Bongkol Valley* (BkV) dengan luas 27 km², *Kuyuh Valley* (KyV) dengan luas 336 km², *Narandong Valley* (NrV) dengan lebar dengan luas 189 km². Lembah PrV dan MgV dibentuk oleh pergerakan MyF, diklasifikasikan sebagai *fault branch*. Lembah KyV dan BkV, dibentuk oleh pergerakan BoF, diklasifikasikan sebagai lembah *fault branch*.

Beberapa segmen sesar memperlihatkan fitur sebelas *offset bedding* serta 3 pembelokan pembelokan sungai (*river offset*) yang signifikan. *Offset bedding* bergerak geser mengiri dengan rata-rata pergerakan sejauh $\pm 0,7$ Km, hal ini mengindikasikan bahwa BoF merupakan jenis sesar sinistral. Nilai rata-rata pembelokan sungai sejauh $\pm 0,4$ relatif ke arah kiri, hal ini mengindikasikan bahwa beberapa sesar diantaranya BoF, SpF dan MyF merupakan jenis sesar sinistral. Geologi di daerah ini dari tua ke muda di dominasi oleh Formasi Kudat, dan Aluvium muda. Formasi Kudat tersusun atas litologi sedimen berupa batupasir, serpih dan batulempung yang berumur Eosen hingga Kapur. Sedangkan Aluvium muda yang terdiri dari pasir, lanau dan lempung berumur Holosen



Gambar 4. 16 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Bengkulu

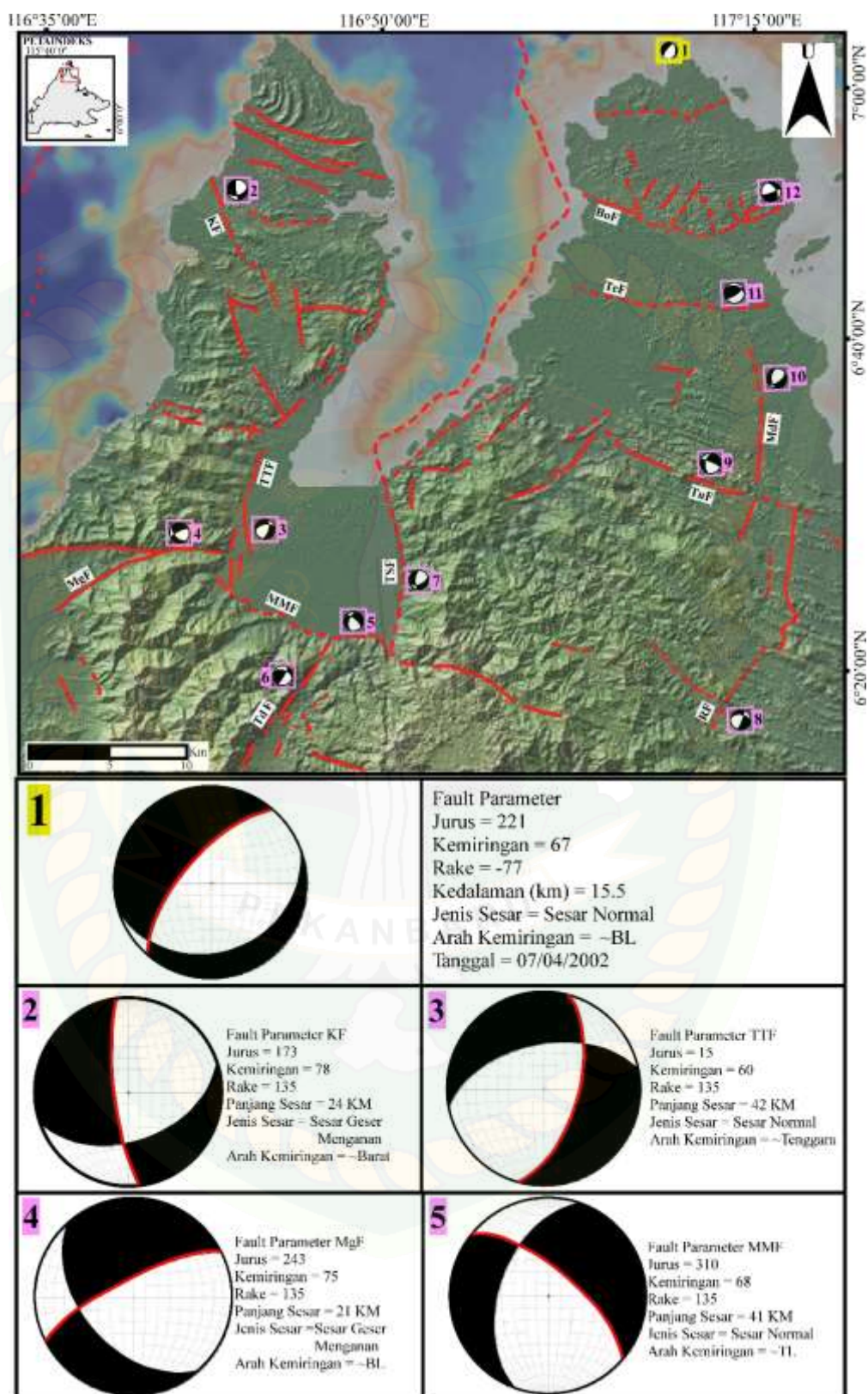
4.2 Seismisitas

Analisis seismisitas pada daerah penelitian ditentukan dengan menganalisis sesar utama yang memiliki panjang >20 km, agar lebih representatif. Untuk sesar yang memiliki panjang <20 km penulis sortir pada analisis seismisitas, tetapi tetap diberikan penamaan pada peta geomorfologi tektonik, hal ini untuk memudahkan pada analisis selanjutnya yaitu skenario gempabumi. Daerah penelitian sebagian besar memiliki data seismisitas yang cukup minim yaitu hanya satu saja *Centroid Moment Tensor* yang direkomendasikan oleh aplikasi *geomapapp* sebagai penyedia data seismik seluruh dunia. Oleh karena itu penulis merekomendasikan sejumlah 11 *Centroid Moment Tensor* yang belum pernah ada sebelumnya, diantaranya mewakili Sesar Kankan (KF), Sesar Tinduk-Taginambor (TTF), Sesar Mangaris (MgF), Sesar Marudu-Matanggal (MMF), Sesar Tandek (TdF), Sesar Taritipan-Sulu (TSF), Sesar Ranggal (RF), Sesar Tukar (TuF), Sesar Manduring (MdF), Sesar Telaga (TeF), dan sesar Bengkoka (BoF). Penulis memberikan rekomendasi nilai CMT dengan mempertimbangkan fitur-fitur tektonik aktif yang ada pada daerah penelitian seperti pembelokan sungai, arah orientasi dominan punggungan, bukit segitiga (*triangular facet*), lipatan dan *offset bedding*. Observasi pola pergerakan sesar yang lebih akurat memungkinkan penulis memprediksi besaran *Moment magnitude* (M_w) dengan lebih akurat.

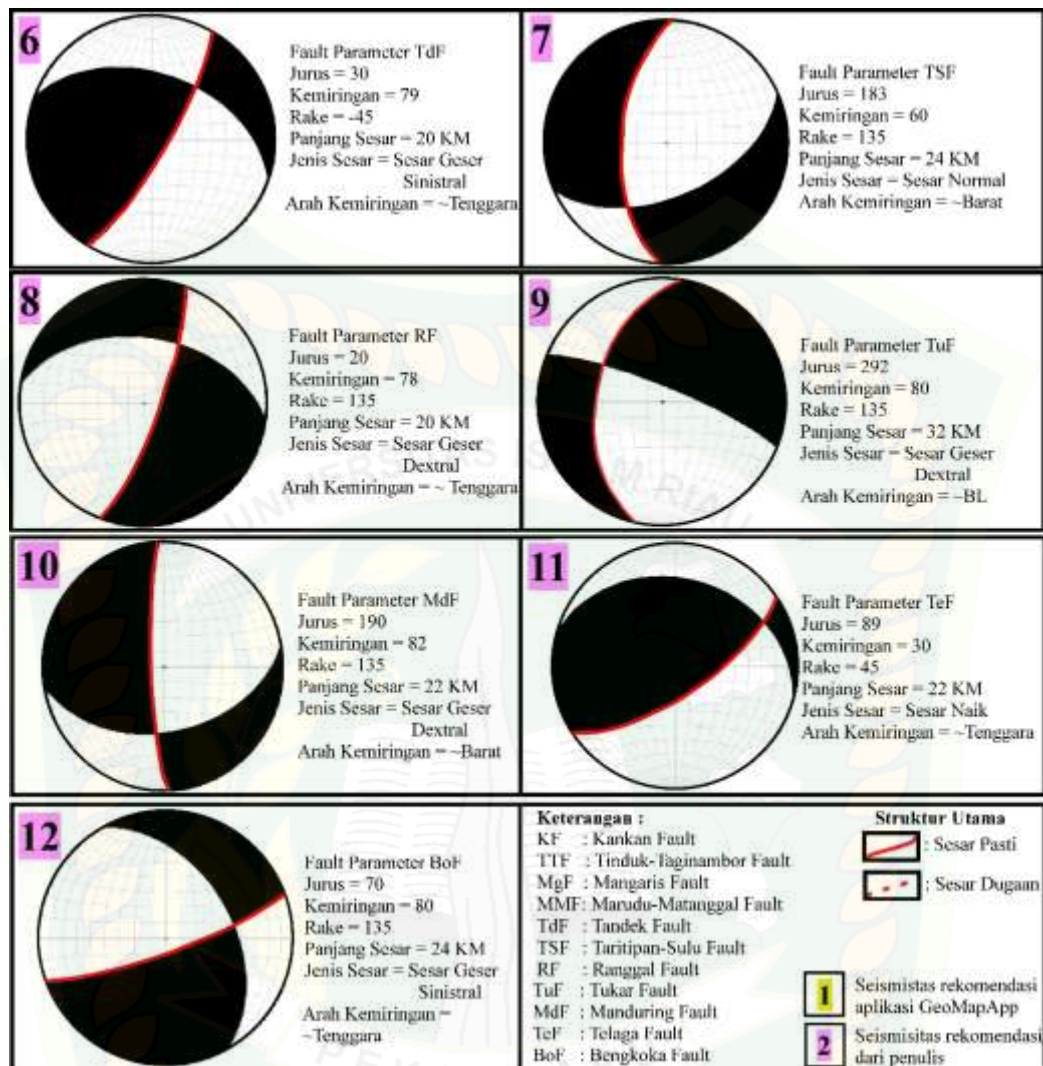
Satu buah nilai seismisitas (*Centroid Moment Tensor / beachball*) yang direkomendasikan *GeoMapapp* mewakili parameter Mantayang Fault (MyF) dengan arah jurus dan kemiringan $U221^\circ T/67^\circ$, kemiringan ke arah ~baratlaut ditunjukkan pada **Gambar 4.17, No 1**. Sesar Kankan (KF) memiliki arah geometri sesar barat. Nilai seismisitas (*beachball*) KF tidak direkomendasikan *GeoMapAap*, sehingga penulis memberikan nilai rekomendasi jurus dan kemiringannya yaitu $U173^\circ T/78^\circ$, kemiringan ke arah ~barat, ditunjukkan pada **Gambar 4.17, No 2**. Sesar Tinduk-Taginambor (TTF) memiliki arah geometri sesar timur. Nilai seismisitas (*beachball*) TTF tidak direkomendasikan *GeoMapAap*, sehingga penulis memberikan nilai rekomendasi jurus dan kemiringannya yaitu $U15^\circ T/60^\circ$, arah kemiringan ke arah ~tenggara ditunjukkan pada **Gambar 4.17, No 3**. Sesar Mangaris (MgF) memiliki arah geometri sesar baratlaut. Nilai seismisitas

(*beachball*) MgF tidak di rekomendasikan GeoMapAap, sehingga penulis memberikan nilai rekomendasi jurus dan kemiringannya yaitu $U243^{\circ}T/75^{\circ}$, kemiringan ke arah ~baratlaut, ditunjukkan pada **Gambar 4.17, No 4**. Sesar Marudu-Matanggal (MMF) memiliki arah geometri sesar timurlaut. Nilai seismisitas (*beachball*) MMF tidak di rekomendasikan GeoMapAap, sehingga penulis memberikan nilai rekomendasi jurus dan kemiringannya yaitu $U310^{\circ}T/68^{\circ}$, kemiringan ke arah ~timurlaut, ditunjukkan pada **Gambar 4.17, No 5**.

Sesar Tandek (TdF) memiliki arah geometri sesar tenggara. Nilai seismisitas (*beachball*) TdF tidak di rekomendasikan GeoMapAap, sehingga penulis memberikan nilai rekomendasi jurus dan kemiringannya yaitu $U30^{\circ}T/79^{\circ}$, kemiringan ke arah ~tenggara, ditunjukkan pada **Gambar 4.18, No 6**. Sesar Taritipian-Sulu (TSF) memiliki arah geometri sesar barat. Nilai seismisitas (*beachball*) TSF tidak di rekomendasikan GeoMapAap, sehingga penulis memberikan nilai rekomendasi jurus dan kemiringannya yaitu $U183^{\circ}T/60^{\circ}$, kemiringan ke arah ~barat, ditunjukkan pada **Gambar 4.18, No 7**. Sesar Ranggal (RF) memiliki arah geometri sesar tenggara. Nilai seismisitas (*beachball*) RF tidak di rekomendasikan GeoMapAap, sehingga penulis memberikan nilai rekomendasi jurus dan kemiringannya yaitu $U20^{\circ}T/78^{\circ}$, kemiringan ke arah ~tenggara, ditunjukkan pada **Gambar 4.18, No 8**. Sesar Tukar (TuF) memiliki arah geometri sesar baratlaut. Nilai seismisitas (*beachball*) TF tidak di rekomendasikan GeoMapAap, sehingga penulis memberikan nilai rekomendasi jurus dan kemiringannya yaitu $U292^{\circ}T/80^{\circ}$, kemiringan ke arah ~baratlaut, ditunjukkan pada **Gambar 4.18, No 9**. Sesar Manduring (MdF) memiliki arah geometri sesar barat. Nilai seismisitas (*beachball*) MdF tidak di rekomendasikan GeoMapAap, sehingga penulis memberikan nilai rekomendasi jurus dan kemiringannya yaitu $U190^{\circ}T/82^{\circ}$, kemiringan ke arah ~barat, ditunjukkan **Gambar 4.18, No 10**.



Gambar 4. 17 Peta Seismisitas Daerah Penelitian



Gambar 4. 18 Nilai Seismisitas Sesar Utama Daerah Penelitian

Sesar Telaga (TeF) memiliki arah geometri sesar tenggara. Nilai seimisitas (Beachball) TeF tidak di rekomendasikan GeoMapAap, sehingga penulis memberikan nilai rekomendasi jurus dan kemiringannya yaitu $U89^{\circ}T/30^{\circ}$ kemiringan ke arah ~tenggara, ditunjukkan **Gambar 4.18, No 11**. Nilai seismisitas ini tegak lurus terhadap arah lintasan sesar yang berdekatan iaitu Sesar Bengkoka (BoF). Sesar BoF berdasarkan geomorfologi tektonik memiliki arah geometri sesar Tenggara, sehingga penulis memberikan nilai rekomendasi jurus dan kemiringannya yaitu $U70^{\circ}T/80^{\circ}$ kemiringan ke arah ~tenggara, ditunjukkan **Gambar 4.18, No 12**.

4.3 Skenario Gempabumi

Peta skenario pada penelitian ini menyajikan informasi mengenai patahan aktif beserta potensi besaran *Moment magnitude* (M_w), yang divisualisasikan melalui penampang patahan (*rupture patch*) berbentuk persegi panjang mengikuti Panjang sesar dengan garis warna merah, lebar sesar diberikan simbol warna kuning, sedangkan proyeksi sesar ditandai dengan garis berwarna hitam. Daerah penelitian terdapat sebelas sesar utama (panjang sesar >20 km) yang pergerakannya menyebabkan gempabumi di masa yang akan datang diantaranya: *Kankan Fault* (KF), *Tinduk-Taginambor Fault* (TTF), *Mangaris Fault* (MgF), *Marudu-Matanggal Fault* (MMF), *Tandek Fault* (TdF), *Taritipan-Sulu Fault* (TSF), *Ranggal Fault* (RF), *Tukar Fault* (TuF), *Manduring Fault* (MdF), *Telaga Fault* (TeF), *Bengkoka Fault* (BoF), ditunjukkan pada **Gambar 4.19**.

Kankan Fault (KF) merupakan sesar dengan panjang geometri sesar 24 Km, arah jurus baratlaut – tenggara dan *rake* 135. Sudut kemiringan sesar ini adalah 78° ke arah barat, dengan kedalaman 5,1 Km, sesar ini di identifikasikan sebagai sesar geser menganan (*dekstral*). Berpotensi menyebabkan gempa dengan besaran *Moment magnitude* (M_w) mencapai 6 M_w di masa depan yang diklasifikasikan sebagai gempa kuat. Hingga saat ini, prediksi *Moment magnitude* belum terimplementasikan pada sesar ini di aplikasi seismik, sehingga penelitian ini diperlukan guna meningkatkan akurasi estimasi serta memperkuat pembaruan data M_w pada katalog seismik terbaru.

Tinduk - Taginambor Fault (TTF) merupakan sesar dengan panjang geometri sesar 42 Km, arah jurus timurlaut – baratdaya dan *rake* 135. Sudut kemiringan sesar ini adalah 60° ke arah tenggara, dengan kedalaman 5,7 km, sesar ini di identifikasikan sebagai sesar geser normal. Berpotensi menyebabkan gempa dengan besaran *Moment magnitude* (M_w) mencapai 6,4 M_w di masa depan yang diklasifikasikan sebagai gempa kuat

Mangaris Fault (MgF) merupakan sesar dengan Panjang geometri sesar 21 Km, arah jurus timurlaut – baratdaya dan *rake* 135. Sudut kemiringan sesar ini adalah 75° ke arah baratlaut, dengan kedalaman 5,1 km, sesar ini di identifikasikan sebagai sesar geser menganan (*dekstral*). Berpotensi menyebabkan gempa dengan

besaran *Moment magnitude* (Mw) mencapai 6,1 Mw di masa depan yang diklasifikasikan sebagai gempa kuat

Marudu - Matanggal Fault (MMF) merupakan sesar dengan panjang geometri sesar 41 Km, arah jurus baratlaut – tenggara dan *rake* 135. Sudut kemiringan sesar ini adalah 68° ke arah timurlaut, dengan kedalaman 5,3 km, sesar ini di identifikasikan sebagai sesar geser normal. Berpotensi menyebabkan gempa dengan besaran *Moment magnitude* (Mw) mencapai 6,3 Mw di masa depan yang diklasifikasikan sebagai gempa kuat

Tritipan - Sulu Fault (TSF) merupakan sesar dengan panjang geometri sesar 24 Km, arah jurus utara – selatan dan *rake* 135. Sudut kemiringan sesar ini adalah 60° ke arah barat, dengan kedalaman 5,7 km, sesar ini di identifikasikan sebagai sesar normal. Berpotensi menyebabkan gempa dengan besaran *Moment Magnitude* (Mw) mencapai 5,9 Mw di masa depan yang diklasifikasikan sebagai gempa sedang

Tandek Fault (TdF) merupakan sesar dengan Panjang geometri sesar 20 Km, arah jurus timurlaut – baratdaya dan *rake* -45. Sudut kemiringan sesar ini adalah 79° ke arah tenggara, dengan kedalaman 5 Km, sesar ini di identifikasikan sebagai sesar geser mengiri (*sinistral*). Berpotensi menyebabkan gempa dengan besaran *Moment magnitude* (Mw) mencapai 6 Mw di masa depan yang diklasifikasikan sebagai gempa kuat

Ranggal Fault (RF) merupakan sesar dengan panjang geometri sesar 20 Km, arah jurus timurlaut – baratdaya dan *rake* 135. Sudut kemiringan sesar ini adalah 78° ke arah tenggara, dengan kedalaman 5,1 Km, sesar ini di identifikasikan sebagai sesar geser menganan (*Dekstral*). Berpotensi menyebabkan gempa dengan besaran *Moment magnitude* (Mw) mencapai 6 Mw di masa depan yang diklasifikasikan sebagai gempa kuat

Tukar Fault (TuF) merupakan sesar dengan Panjang geometri sesar 32 Km, arah jurus baratlaut – tenggara dan *rake* 135. Sudut kemiringan sesar ini adalah 80° ke arah baratlaut, dengan kedalaman 5 km, sesar ini di identifikasikan sebagai sesar geser menganan (*dekstral*). Berpotensi menyebabkan gempa dengan besaran *Moment magnitude* (Mw) mencapai 6,2 Mw di masa depan yang diklasifikasikan sebagai gempa kuat

Manduring Fault (MdF) merupakan sesar dengan panjang geometri sesar 22 Km, arah jurus utara – selatan dan *rake* 135. Sudut kemiringan sesar ini Adalah 82° ke arah barat, dengan kedalaman 5 km, sesar ini di identifikasikan sebagai sesar geser menganan (*dekstral*). Berpotensi menyebabkan gempa dengan besaran *Moment Magnitude* (Mw) mencapai 6 Mw di masa depan yang diklasifikasikan sebagai gempa kuat

Telaga Fault (TeF) merupakan sesar dengan panjang geometri sesar 22 Km, arah jurus baratlaut – tenggara dan *rake* 45. Sudut kemiringan sesar ini Adalah 30° ke arah tenggara, dengan kedalaman 10 km, sesar ini di identifikasikan sebagai sesar naik. Berpotensi menyebabkan gempa dengan besaran *Moment magnitude* (Mw) mencapai 5,7 Mw di masa depan yang diklasifikasikan sebagai gempa sedang.

Bengkoka Fault (BoF) merupakan sesar dengan panjang geometri sesar 24 Km, arah jurus barat – timur dan *rake* 135. Sudut kemiringan sesar ini Adalah 80° ke arah tenggara, dengan kedalaman 5 km, sesar ini di identifikasikan sebagai sesar geser mengiri (*sinistral*). Berpotensi menyebabkan gempa dengan besaran *Moment magnitude* (Mw) mencapai 6,1 Mw di masa depan yang diklasifikasikan sebagai gempa kuat

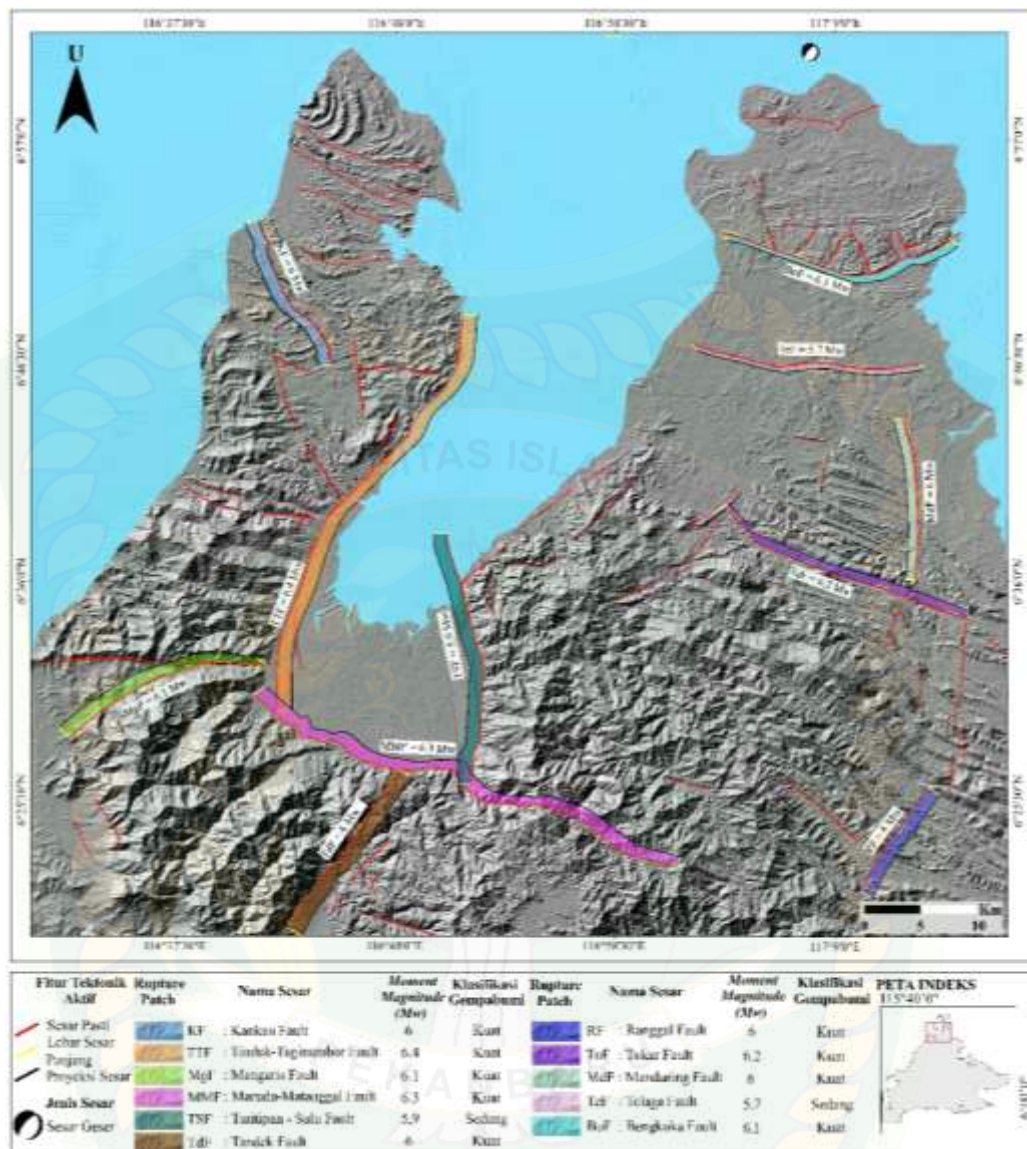
Gempabumi terbesar yang pernah terjadi beberapa dekade disebabkan oleh *Bengkoka Fault* yaitu pada 7 april 2002 dengan kekuatan 5,1 Mw. Perhitungan prediksi *Moment magnitude* gempabumi yang dihasilkan oleh penulis nilainya hampir berdekatan dengan besaran Mw peristiwa terakhir. Hal ini menunjukkan bahwa prediksi besaran gempabumi oleh penulis dapat diandalkan. Keseluruhan nilai parameter gempabumi yang dihasilkan oleh sesar utama daerah penelitian ditunjukkan pada **Tabel 4.1**.

Tabel 4.1 Nilai Parameter Gempabumi dan Klasifikasi Sesar Daerah Penelitian

Nama Sesar	L	Jenis Sesar (D)	Downdip Limit	W	A	Mw	Mo	D	Klasifikasi Gempabumi
	(a)	(b)	(c)	(h)	(d)	(e)	(f)	(g)	(i)
Kankan Fault (KF)	5,1	Dekstral	5	5	119	6	6	1,6	Kuat
Tinduk - Taginambor Fault (TTF)	5,7	Normal	5	5,7	239	6,4	6,3	8,8	Kuat
Mangaris Fault (MgF)	5,1	Dekstral	5	6,4	130	6,1	6	1,5	Kuat
Marudu - Matanggal Fault (MMF)	5,3	Normal	5	5	207	6,3	6,2	1	Kuat
Taritipan - Sulu Fault (TSF)	5,7	Normal	5	5	90	5,9	5,9	2,1	Sedang
Tandek Fault (TdF)	5	Sinistral	5	6,4	104	6	5,9	1,9	Kuat
Ranggal Fault (RF)	5,1	Dekstral	5	5	102	6	5,9	1,9	Kuat
Tukar Fault (TuF)	5	Dekstral	5	4,9	160	6,2	6,1	1,2	Kuat
Manduring Fault (MdF)	5	Dekstral	5	4,9	111	6	6	1,8	Kuat
Telaga Fault (TeF)	10	Naik	5	2,5	56	5,7	5,7	3,3	Sedang
Bengkoka Fault (BoF)	5	Sinistral	5	4,9	121	6,1	6	1,6	Kuat

Catatan :

- Panjang patahan (L), Km
- D: sesar dekstral, S: sesar sinistral N: Sesar normal, T: Sesar Naik
- $W = \text{Downdip Limit} / \sin \text{dip patahan}$, Km
- $A = L \times W$, Km²
- Moment magnitude* dihitung menggunakan persamaan:
Sesar geser $M_w = 3,98 + 1,02 \log A$
Sesar normal $M_w = 3,93 + 1,02 \log A$
Sesar naik $M_w = 4,33 + 0,90 \log A$
- Seismic moment* (Mo) dihitung menggunakan persamaan:
 $M_w = 2/3 \log Mo - 10,737$, satuan Nm
- Slip rate* (D) dari masing-masing patahan
- Lebar patahan (W)
- Klasifikasi gempabumi: kecil (3-3,9 Mw), ringan (4-4,9 Mw), sedang (5-5,9 Mw), kuat (6- 6,9 Mw), besar (7-7,9 Mw), dahsyat (8-8,9 Mw)



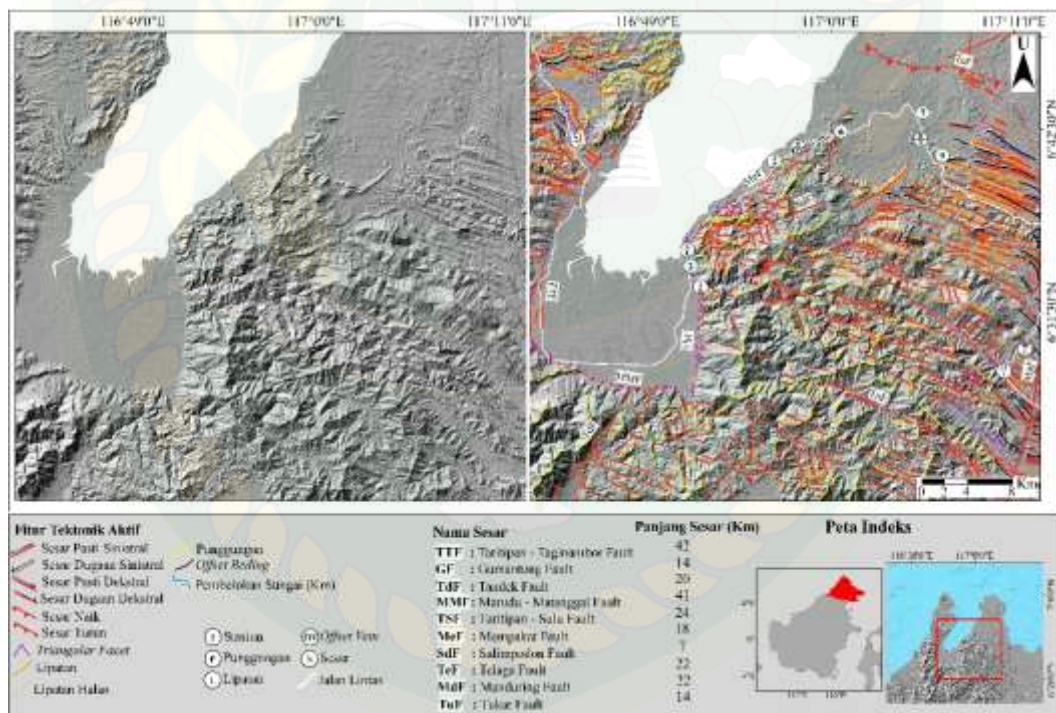
Gambar 4. 19 Peta Skenario Gempabumi Daerah Penelitian

4.4 Bukti Deformasi di Lapangan

Daerah penelitian ditemukan beberapa bukti lapangan yang menunjukkan adanya deformasi tektonik, seperti punggungan, lipatan, bukit segitiga (*triangular facet*), serta *offset* perlapisan batuan. Persebaran bukti-bukti deformasi permukaan tersebut ditampilkan secara keseluruhan pada peta stasiun pengamatan dan sebaran bukti lapangan **Gambar 4.20**. Peta tersebut memperlihatkan secara lebih rinci lokasi-lokasi bukti geomorfologi tektonik yang berkembang di sepanjang *Tandek Fault* (TF), *Taritipan – Sulu Fault* (TSF), *Mempakat Fault* (MeF), *Tukar Fault* (TuF), dan *Manduring Fault* (MdF). Beberapa titik pengamatan pada *Marudu –*

Matanggal Fault (MMF), *Taritipan - Sulu Fault*, dan *Tukar Fault* (TuF) dipilih sebagai lokasi observasi karena memiliki akses yang relatif mudah dijangkau melalui jalan lintas yang terdapat di wilayah penelitian.

Adapun detail bukti lapangan geomorfologi tektonik pada *Tandek Fault* (TdF) yang dihitung orientasi selatan dari 0 - 4 Km dijumpai *triangular facet*, *Taritipan – Sulu Fault* (TSF) yang dihitung dari orientasi barat laut dari 0,3 Km dijumpai singkapan lipatan, offset perlapisan, *Mempakat Fault* (MeF) yang dihitung dari orientasi baratlaut dari 0 – 3 Km dijumpai punggungan, *offset* perlapisan, *offset vein*, patahan, lipatan. Pada *Tukar Fault* (TuF) yang dihitung dari orientasi dijumpai offset sungai dengan panjang *offset* rata rata 0,6 km, *Manduring Fault* (MdF) yang dihitung dari orientasi tenggara dari 0,4 km dijumpai longsor dan lipatan. Penjelasan rinci terkait fitur – fitur geomorfologi tektonik tersebut dijelaskan pada sub bab di bawah ini.

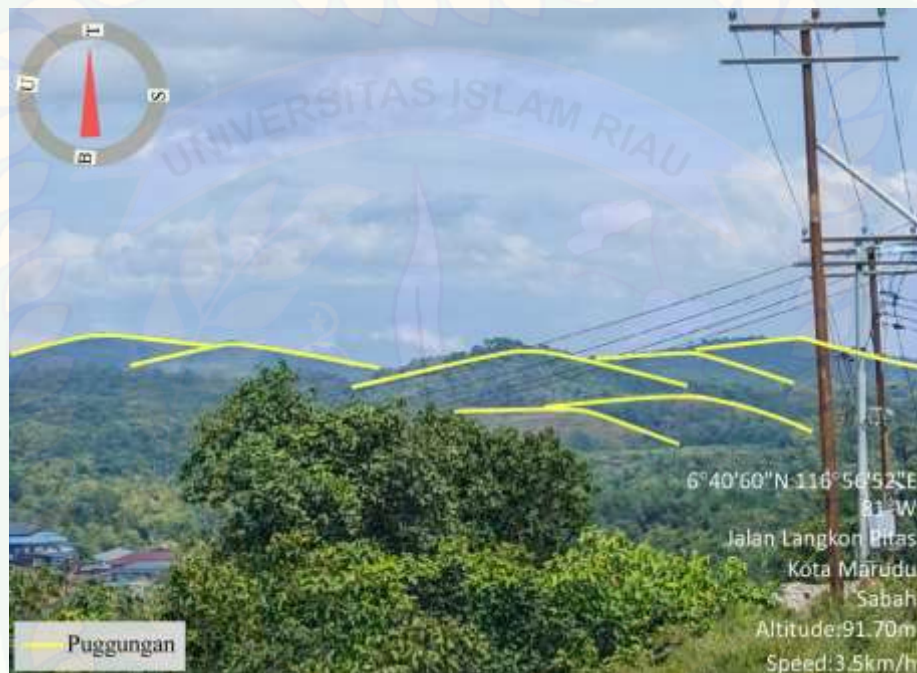


Gambar 4. 20 Peta Bukti Lapangan dan Stasiun Lapangan

4.4.1 Punggungan

Daerah penelitian ditemukan morfologi punggungan yang terletak di wilayah Pitas dapat dilihat pada **Gambar 4.21** Perbukitan dengan elevasi

relatif tinggi tersebut memiliki arah aksial punggungan yang cenderung berorientasi ke selatan. Pada foto lapangan, punggungan ini ditandai dengan garis berwarna kuning. Keberadaan geomorfologi punggungan yang berkembang searah dengan *Mempakat Fault* (MeF) di daerah penelitian mengindikasikan bahwa bentang alam tersebut kemungkinan terbentuk akibat proses pengangkatan tektonik yang dikontrol oleh aktivitas sesar.



Gambar 4. 21 Foto Lapangan Menunjukkan Punggungan Daerah Penelitian

4.4.2 Bukit Segitiga

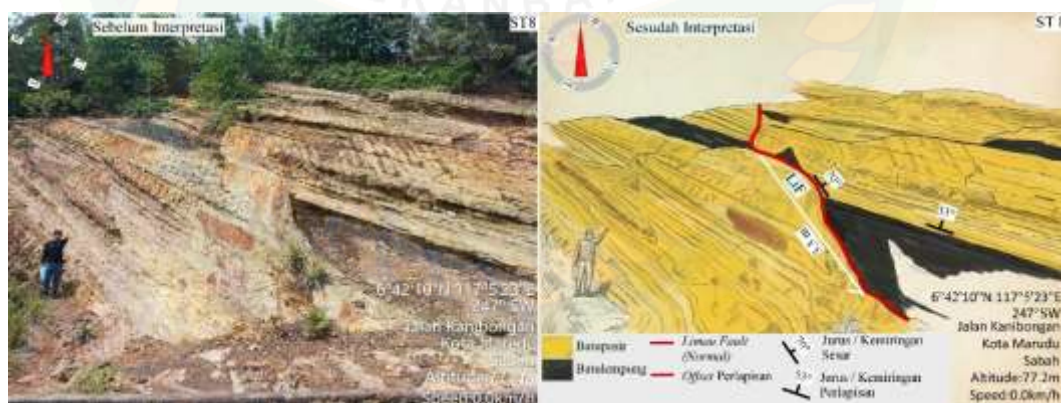
Daerah Marudu dijumpai bukit segitiga (*triangular facet*) di daerah Parak Marak, dengan arah kemiringan bukit segitiga yang berarah tenggara dapat dilihat pada **Gambar 4.22**. Sedangkan pada peta geomorfologi tektonik berarah selatan, hal ini mengindikasikan bukti lapangan tersebut adalah kemiringan proyeksi dari bukit segitiga yang semestinya, ditandai dengan garis warna hijau, ditandai dengan simbol TF pada foto lapangan, dapat dilihat pada Gambar 4.17. Bukit segitiga ini terbentuk akibat pergerakan *Tandek Fault* (TdF) yang merupakan sesar geser sinistral dengan arah pergerakan timurlaut – baratdaya, pergerakan sesar ini membentuk zona lemah sehingga perbukitan di sekitarnya tererosi dan membentuk lanskap bukit segitiga.



Gambar 4. 22 Foto Bukit Segitiga (Triangular facet) daerah penelitian.

4.4.3 Sesar

Pada Stasiun 8 daerah Kanibongan terdapat singkapan dengan dimensi panjang 14 m dan tinggi 4 m yang merupakan singkapan batupasir sisipan batulampung dapat dilihat pada **Gambar 4.23**, dan terdapat perlapisan batuan yang tersesarkan dengan nilai bacaan $N320^{\circ}E/70^{\circ}$ dengan offset sesar pada perlapisan sejauh 3,3 m yang kemungkinan digerakkan oleh *Limau Fault* (LiF) dengan arah pergerakan sesar timurlaut – baratdaya. Bukti lapangan ini membantu terhadap interpretasi jenis sesar LiF Adalah normal, yang sebelumnya pada analisis geomorfologi tektonik sulit menentukan jenis sesar karena ketidakhadiran *offset* sungai.



Gambar 4. 23 Foto Singkapan 8 Yang Menunjukkan Sesar

4.4.4 Lipatan

Stasiun 1A daerah Tagudon terdapat singkapan dengan dimensi panjang 6 km dan tinggi 3 km yang merupakan singkapan batupasir sisipan batulempung dapat dilihat pada **Gambar 4.24**, dijumpai lipatan dengan nilai jurus dan kemiringan sayap kanan $N273^{\circ}E/40^{\circ}$ dan sayap kiri $N320^{\circ}E/70^{\circ}$ dengan nilai *interlimb* 83° , nilai *dip of axial surface* $N293^{\circ}E/60^{\circ}$ dan *plunge* $30^{\circ}/N70^{\circ}E$ yang mana pada klasifikasi fluety, 1974 diberikan nama *plunging inclined fold*.

Pada stasiun 1B daerah Tagudon terdapat singkapan dengan dimensi panjang 10 km dan tinggi 4 km yang merupakan singkapan batulempung sisipan rijang dapat dilihat pada **Gambar 4.25**, dijumpai lipatan dengan nilai jurus dan kemiringan sayap kanan $N310^{\circ}E/70^{\circ}$ dan sayap kiri $N45^{\circ}E/60^{\circ}$ dengan nilai *interlimb* 72° , nilai *dip of axial surface* $N180^{\circ}E/81^{\circ}$ dan *plunge* $10^{\circ}/N69^{\circ}E$ yang mana pada klasifikasi fluety, 1974 diberikan nama *open upright horizontal fold*.

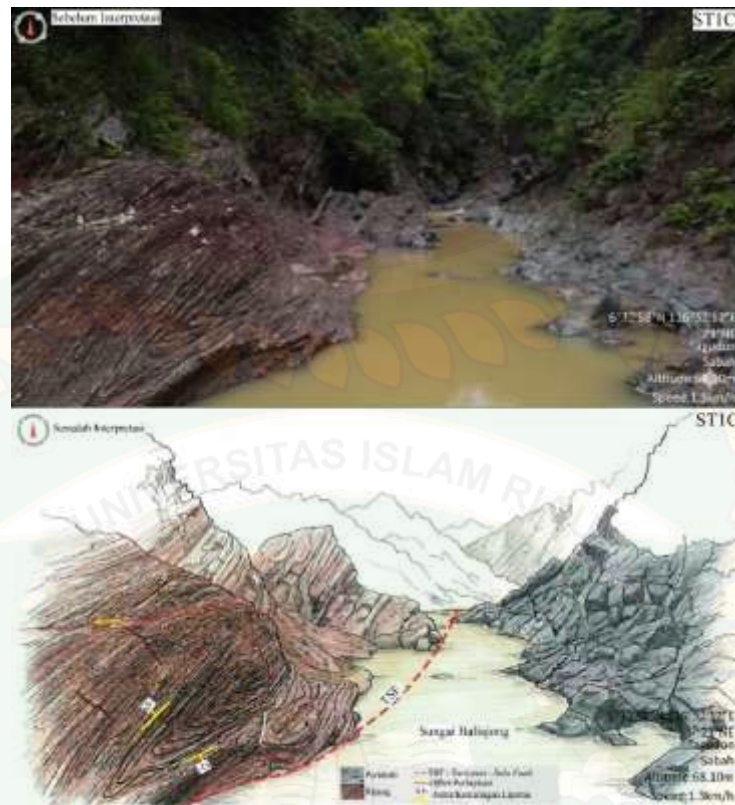
Pada stasiun 1C daerah tagudon terdapat singkapan dengan dimensi panjang 12 km dan tinggi 3 km yang merupakan singkapan peridotit dan rijang dapat dilihat pada **Gambar 4.26**, dijumpai lipatan dengan nilai jurus dan kemiringan sayap kanan $N198^{\circ}E/52^{\circ}$ dan sayap kiri $N10^{\circ}E/65^{\circ}$ dengan nilai *interlimb* 32° , nilai *dip of axial surface* $N270^{\circ}E/60^{\circ}$ dan *plunge* $60^{\circ}/N38^{\circ}E$ yang mana pada klasifikasi fluety, 1974 diberikan nama *close reclined steeply plunging fold*.



Gambar 4. 24 Foto Singkapan Stasiun 1A Yang Menunjukkan Adanya Lipatan



Gambar 4. 25 Singkapan Stasiun 1B Yang Menunjukkan Adanya Lipatan



Gambar 4. 26 Foto Singkapan Stasiun 1C Yang Menunjukkan Adanya Lipatan

Singkapan pada Stasiun 3 daerah Taritipan terdapat singkapan dengan dimensi panjang 7 km dan tinggi 2 km yang merupakan singkapan batulempung sisipan pasir dapat dilihat pada **Gambar 4.27**, dijumpai lipatan dengan nilai jurus dan kemiringan sayap kanan $N280^{\circ}E/60^{\circ}$ dan sayap kiri $N197^{\circ}E/20^{\circ}$ dengan nilai interlimb 71° , nilai dip of axial surface $N200^{\circ}E/80^{\circ}$ dan plunge $30^{\circ}/N70^{\circ}E$ yang mana pada klasifikasi fluety, 1974 diberikan nama open reclined fold.

Pada Stasiun 10 daerah Manduring terdapat singkapan dengan dimensi panjang 5 km dan tinggi 1,5 km yang merupakan singkapan batupasir sisipan lempung dapat dilihat pada **Gambar 4.28**, dijumpai lipatan dengan nilai jurus dan kemiringan sayap kanan $N13^{\circ}E/30^{\circ}$ dan sayap kiri $N350^{\circ}E/70^{\circ}$ dengan nilai interlimb 83° , nilai dip of axial surface $N187^{\circ}E/86^{\circ}$ dan plunge $7^{\circ}/N47^{\circ}E$ yang mana pada klasifikasi fluety, 1974 diberikan nama *open upright horizontal fold*.

Pada stasiun 11 daerah Manduring terdapat singkapan dengan dimensi panjang 8 km dan tinggi 3 km yang merupakan singkapan batupasir sisipan lempung dapat dilihat pada **Gambar 4.29**, dijumpai lipatan dengan nilai jurus dan kemiringan sayap kanan N140°E/30° dan sayap kiri N110°E/30° dengan nilai interlimb 87°, nilai dip of axial surface N128°E/55° dan plunge 30°/N87°E yang mana pada klasifikasi fluety, 1974 diberikan nama *open moderately inclined plunging fold*.



Gambar 4. 27 Foto Singkapan Stasiun 3 Yang Menunjukkan Adanya Lipatan



Gambar 4. 28 Foto Singkapan Stasiun 10 Yang Menunjukkan Adanya Lipatan



Gambar 4. 29 Foto Singkapan Stasiun 11 Yang Menunjukkan Adanya Lipatan

4.4.5 Offset Perlapisan

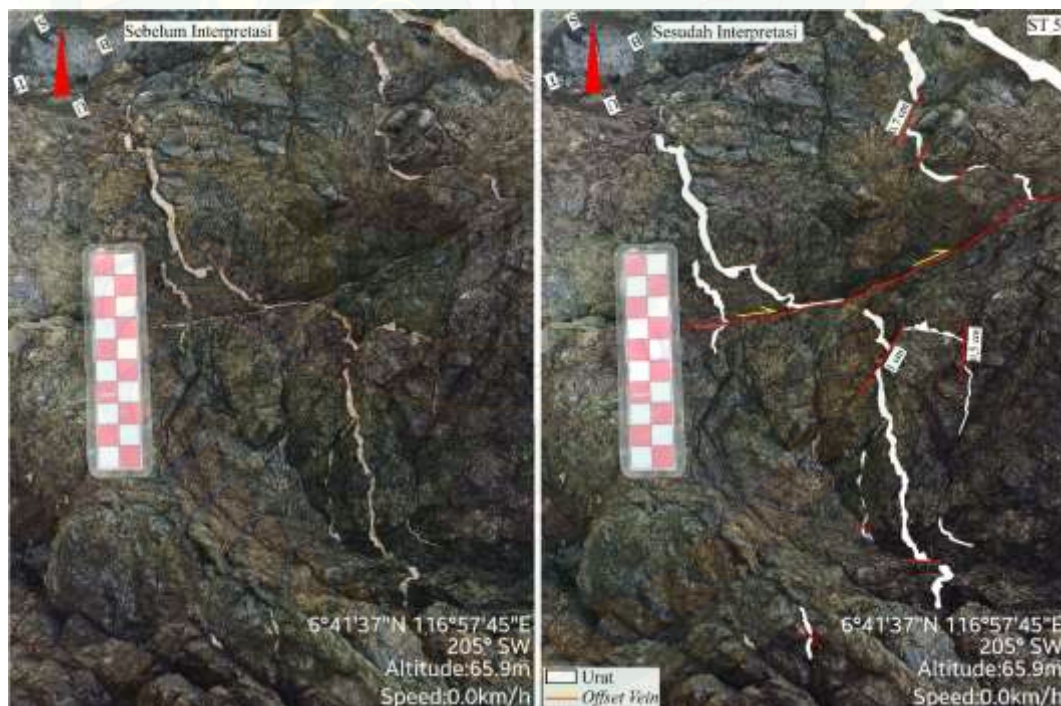
Dijumpai *offset* perlapisan sepanjang 30,8 dan 4 cm dengan arah relatif mengiri (*sinistral*) pada suatu singkapan stasiun 3 batuan di daerah Pitas, offset ini diidentifikasi sebagai salah satu bentuk deformasi permukaan akibat aktivitas tektonik yang terbentuk saat pembentukan *Taritipan Sulu Fault* (TSF) pada bagian utara Borneo. Singkapan ini memiliki dimensi lebar 6 m dan tinggi 2 m, merupakan singkapan batupasir dengan sisipan tipis lempung, dapat dilihat pada **Gambar 4.30**.



Gambar 4. 30 Foto Singkapan Stasiun 3 yang menunjukkan adanya Offset Perlapisan

4.4.6 Offset Vein

Pada Stasiun 5 yang berada di daerah Pitas dijumpai *offset vein* dengan rata-rata pergeseran sebesar 0,3 cm dengan arah relatif menganan (*dekstral*) yang diinterpretasikan sebagai salah satu bukti adanya aktivitas pergerakan *Mempakat Fault* (MeF) dapat dilihat pada **Gambar 4.31**. Pergeseran pada urat (*vein*) tersebut menunjukkan bahwa batuan di lokasi ini telah mengalami deformasi akibat gaya tektonik yang bekerja secara mendatar, sehingga menyebabkan terjadinya pergeseran relatif antar bagian batuan dan mengindikasikan adanya pengaruh aktivitas tektonik yang masih bekerja di daerah penelitian. Pada stasiun 1.D terdapat singkapan dengan dimensi panjang 2 km dan tinggi 1 km yang merupakan offset urat kuarsa dengan rata-rata pergeseran sebesar 9,5 cm dapat dilihat pada **Gambar 4.32**.



Gambar 4. 31 Foto Singkapan Stasiun 5 Yang Menunjukkan adanya *Offset Vein*



Gambar 4. 32 Foto Singkapan 1.D Yang Menunjukkan Adanya *Offset Vein*

4.4.7 Longsor

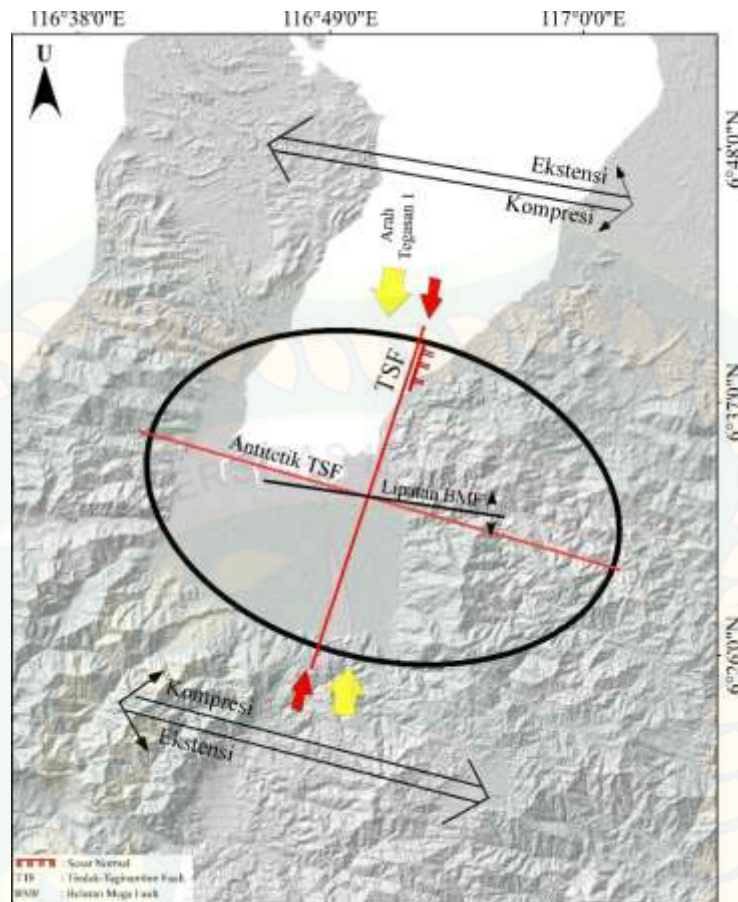
Daerah Manduring dijumpai adanya longsor yang diakibatkan oleh pergerakan sesar. Longsor yang terjadi pada singkapan bukit dengan tinggi 3 m dan lebar 2 m. Arah longsor ke baratdaya ini disebabkan oleh pergeseran *Manduring Fault* (MdF) yang mengarah utara - selatan, kemudian pada foto longsor ini terdapat adanya simbol L1, ditunjukkan **Gambar 4.33**.



Gambar 4. 33 Foto Bukti Lapangan Longsor Pada Stasiun 10

4.5 Pemodelan *Strain Elipsoid Riedl Shear*

Pemodelan *Strain Elipsoid Riedl Shear* pada area penelitian menunjukkan sistem tektonik yang kompleks, ditunjukkan pada **Gambar 4.34**. Analisis ini menggambarkan tegasan utama maksimum bekerja dengan orientasi utara-selatan. Tegasan utama mengakibatkan pembentukan *Beluran Mega Fold (BMF)*, sebuah struktur lipatan mega dengan poros sumbu yang membujur dari barat ke timur. Berdasarkan prinsip mekanika batuan, posisi sumbu lipatan BMF yang tegak lurus terhadap arah tegasan utama membuktikan adanya fase kompresi kuat yang memendekkan kerak bumi pada jalur utara-selatan. Di sisi lain, mekanisme ekstensi yang bekerja secara lateral memicu terbentuknya *Taritipan-Sulu Fault (TSF)* sebagai struktur ekstensional utama. TSF berkembang dengan lintasan utara-selatan, sejajar dengan arah tegasan utama, dan diidentifikasi sebagai sesar normal dengan kemiringan bidang (*dip*) ke arah barat. Keberadaan antitetik TSF yang memotong jalur utama dengan orientasi Barat Laut-Tenggara berfungsi sebagai struktur pendukung untuk mengakomodasi deformasi massa batuan. Secara keseluruhan, integrasi antara sesar normal TSF yang sejajar dengan tegasan utama dan lipatan BMF yang tegak lurus terhadapnya membentuk sebuah model *strain ellipsoid* yang menunjukkan bahwa wilayah ini mengalami kombinasi gaya tekan dan regangan yang saling tegak lurus dalam satu sistem deformasi regional. Pola distribusi zona kompresi dan ekstensi didalam *elipsoid* menggambarkan diferensiasi regim deformasi deformasi akibat gaya geser lateral. Secara keseluruhan, konfigurasi struktur tersebut menunjukkan bahwa deformasi berkembang melalui mekanisme pergeseran simpel (*simpel shear*) yang menghasilkan kombinasi pergeseran simpel komposit dan kompresi murni (*composite simple shear and compressive pure shear*).



Gambar 4. 34 Pemodelan Sesar TTF Pada Daerah Penelitian Menggunakan Strain Elipsoid Riedl Shear

4.6 Pemodelan 3D

Pemodelan 3D deformasi daerah penelitian terbagi menjadi 3 daerah yaitu Kudat, Marudu dan Pitas. Penjelasan detail mengenai deformasi tersebut berada pada sub bab di bawah ini :

4.6.1 Kudat

Berdasarkan model tiga dimensi tersebut, terlihat interaksi dinamika struktural yang jelas antara dua sistem sesar utama, yakni *Kankan Fault* (KF) dan *Taritipan-Sulu Fault* (TTF), ditunjukkan pada **Gambar 4.35** Sesar KF diidentifikasi sebagai sesar geser dekstral, di mana pergerakan horizontalnya secara aktif memotong rangkaian perbukitan dan lapisan batuan yang terdiri dari batupasir, batulempung, serta serpih. Aktivitas tektonik pada zona sesar KF ini mengakibatkan terjadinya penggerusan dan deformasi batuan di

sepanjang jalur sesarnya, yang kemudian tereksitasi oleh proses eksogenik membentuk geomorfologi berupa beberapa lembah sempit yang memanjang secara linear.

Sementara itu, pada bagian timur model, terdapat Sesar TTF yang memiliki mekanisme sebagai sesar normal. Pergerakan vertikal pada sesar ini menyebabkan penurunan blok batuan (*downthrown block*) yang signifikan, sehingga menciptakan ruang akomodasi yang luas di permukaan. Proses penurunan tektonik ini menjadi faktor pengontrol utama terbentuknya depresi topografi yang luas, yang secara geografis dikenal sebagai Lembah Marudu. Kombinasi antara sesar geser KF yang membentuk lembah-lembah sempit dan sesar normal TTF yang membentuk Lembah Marudu menunjukkan bahwa wilayah ini merupakan zona deformasi yang intens, di mana struktur geologi mengontrol penuh pembentukan bentang alamnya.



Gambar 4. 35 Pemodelan 3D Deformasi Daerah Kudat

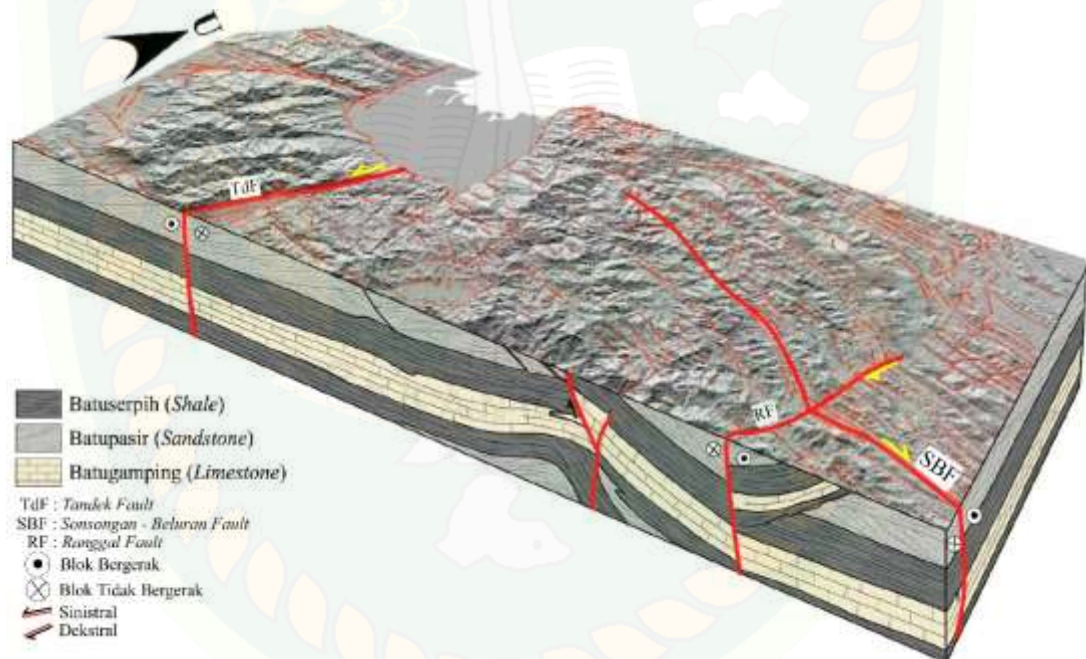
4.6.2 Marudu

Berdasarkan model tiga dimensi Daerah Marudu ditunjukkan pada **Gambar 4.36**, terlihat jelas pengaruh kontrol struktur geologi terhadap pembentukan bentang alam dan diskontinuitas lapisan batuan yang terdiri dari batuserpih, batupasir, dan batugamping. Sesar TdF (*Tandek Fault*) diidentifikasi memiliki mekanisme pergerakan oblik, yang merupakan kombinasi antara sesar *sinistral* (mengiri) dan sesar normal. Interaksi pergerakan ini, terutama pada area tekuk sesar, menciptakan mekanisme *releasing bend* yang memicu tarikan lokal dan penurunan blok, sehingga membentuk morfologi lembah sempit LyV (*Luyu Valley*) yang memanjang di sepanjang jalur sesar tersebut.

Di bagian tengah hingga tenggara, terdapat Sesar RF (*Ranggal Fault*) yang secara signifikan memotong struktur utama *Beluran Mega Fold*. Aktivitas sesar ini mengakibatkan terjadinya pergeseran lapisan batuan yang sangat jelas terlihat pada penampang melintang berupa *offset bedding*, di mana unit batugamping dan batuserpih mengalami pemutusan jalur pengendapan akibat dislokasi tektonik. Sementara itu, Sesar SBF yang bergerak secara *dekstral* (menganan) memainkan peran penting dalam konfigurasi geometri regional dengan membentuk dan mengontrol perkembangan sayap kiri lipatan *Beluran Mega Fold*. Secara keseluruhan, integrasi pergerakan dari ketiga sesar ini menunjukkan adanya rezim tektonik dinamis yang tidak hanya membentuk lembah-lembah sempit melalui mekanisme tarikan, tetapi juga mereformasi struktur lipatan raksasa dan lapisan sedimen di wilayah tersebut.

Pembentukan MdV (*Marudu Valley*) atau Lembah Marudu menunjukkan fenomena geomorfologi yang paling menonjol karena dimensinya yang sangat luas dibandingkan lembah-lembah di sekitarnya. Keluasan lembah ini tidak hanya disebabkan oleh satu mekanisme tunggal, melainkan hasil dari interaksi tektonik kompleks berupa kombinasi antara pergeseran simpel komposit (*composite simple shear*) dan kompresi murni (*compressive pure shear*). Mekanisme pergeseran simpel komposit yang

melibatkan sesar-sesar geser utama di sekitarnya (seperti pergerakan dekstral MdF dan sinistral KF) menciptakan zona rotasi dan tarikan lateral yang signifikan, yang memicu terjadinya peregangan kerak bumi secara regional. Di saat yang bersamaan, gaya kompresi murni yang bekerja pada sumbu utama mengakibatkan pemendekan dan pelenturan pada blok batuan di sekitarnya, namun pada zona transisi di pusat Lembah Marudu, interaksi ini justru memicu penurunan blok (*subsidence*) yang masif. Sinergi antara rotasi akibat geseran lateral dan penekanan vertikal-horizontal ini menciptakan ruang akomodasi yang sangat besar, sehingga mampu membentuk depresi luas yang memotong berbagai unit litologi mulai dari batuserpih hingga batugamping, dan menjadikan MdV sebagai pusat pengendapan serta fitur topografi terendah yang dominan di wilayah tersebut.



Gambar 4. 36 Pemodelan 3D Deformasi Daerah Marudu

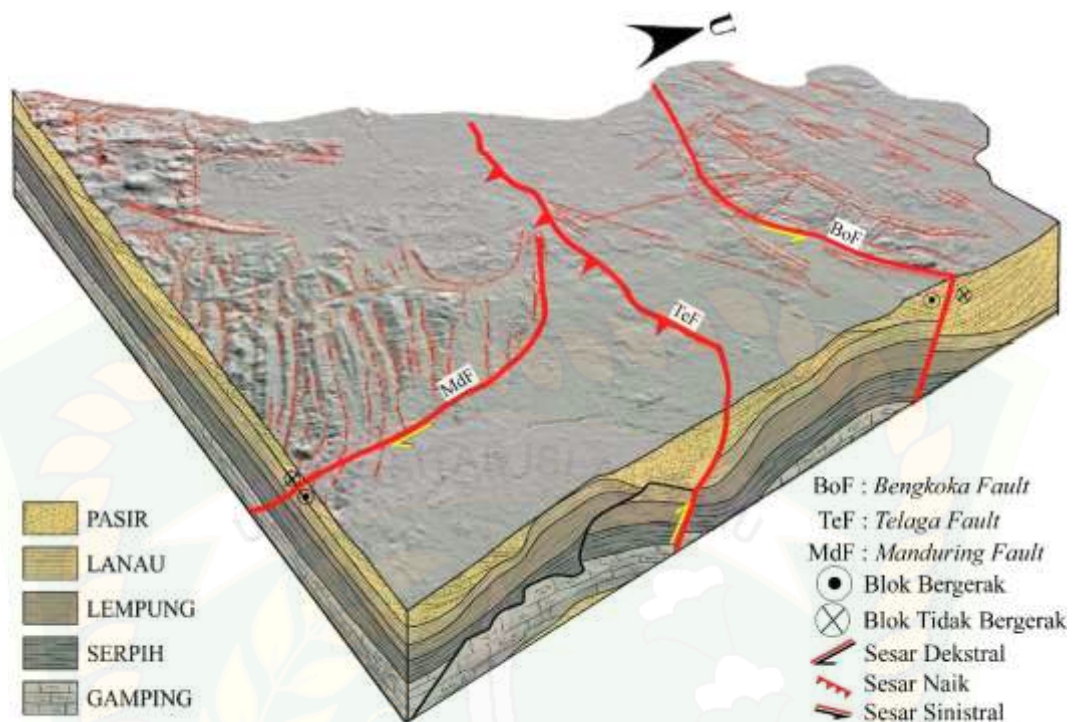
4.6.3 Pitas

Berdasarkan model tiga dimensi pada sisi kanan ini, terlihat interaksi tektonik yang sangat dinamis antara tiga sistem sesar utama yang mengontrol pembentukan morfologi lembah di wilayah tersebut. Sesar BoF (*Bengkoka Fault*) diidentifikasi bergerak secara oblik, yang mengombinasikan

komponen *sinistral* (geser mengiri) dan normal dapat dilihat pada **Gambar 4.37**. Pergerakan kompleks ini memicu terjadinya penipisan kerak dan penurunan blok batuan secara luas, yang pada akhirnya membentuk dua depresi topografi utama berupa lembah lebar, yaitu KyV (*Kuyuh Valley*) dan BkV (*Bengkoka Valley*). Struktur ini memotong suksesi sedimen yang terdiri dari lapisan pasir, lanau, lempung, serpih, hingga gamping, menciptakan ruang akomodasi yang signifikan di permukaan.

Di bagian tengah, terdapat Sesar TeF (*Telaga Fault*) yang didominasi oleh mekanisme sesar naik (*thrust fault*). Aktivitas kompresional pada sesar ini mengakibatkan pengangkatan blok batuan yang disertai dengan pembentukan lembah-lembah sempit, yaitu PtV (*Petani Valley*), LaV (*Layung Valley*), dan TbV (*Timboi Valley*). Selain manifestasi geomorfologi, pergerakan naik ini juga secara jelas menyebabkan terjadinya *offset bedding* atau pergeseran lapisan batuan yang terlihat pada penampang melintang, di mana unit-unit litologi mengalami diskontinuitas akibat dorongan tektonik.

Sementara itu, Sesar MdF (*Manduring Fault*) berkembang dengan mekanisme geser dekstral (menganan) yang sangat kuat. Sesar ini secara struktural memotong poros *Beluran Mega Fold*, menunjukkan bahwa aktivitas sesar MdF terjadi setelah atau bersamaan dengan fase pelipatan regional. Pada zona tekuk sesar, terbentuk mekanisme *releasing bend* yang mengakibatkan terjadinya tarikan lokal (*localized extension*), sehingga membentuk lembah sempit KwV (*Kawanan Valley*). Secara keseluruhan, kombinasi pergerakan oblik BoF, sesar naik TeF, dan sesar dekstral MdF ini mencerminkan rezim tektonik *transtensional* dan *transpressional* yang secara aktif mengukir variasi bentang alam dari lembah lebar hingga lembah sempit di wilayah tersebut.



Gambar 4. 37 Pemodelan 3D Deformasi Daerah Pitas

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan beberapa aspek seperti geomorfologi tektonik, seismisitas, skenario gempa bumi dan bukti deformasi di lapangan guna menjawab rumusan masalah.

5.1.1 Geomorfologi Tektonik

Geomorfologi tektonik di daerah penelitian dibagi menjadi 9 daerah yaitu: Tamalang, Kankan, Mangaris, Tandek, Matanggal, Kuppi, Manduring, Mempakat, Bengkoka. Pada daerah penelitian dijumpai 11 sesar utama yaitu : *Kankan Fault* (KF), *Tinduk – Taginambor Fault* (TTF), *Mangaris Fault* (MgF), *Marudu – Matanggal Fault* (MMF), *Tandek Fault* (TdF), *Taritipan – Sulu Fault* (TSF), *Ranggal Fault* (RF), *Tukar Fault* (TuF), *Manduring Fault* (MdF), *Telaga Fault* (TeF), dan *Bengkoka Fault* (BoF).

Terdapat 45 lembah di daerah penelitian. Beberapa diantara lembah tersebut terdapat 12 lembah besar yang padat penduduk yang terbentuk akibat pergerakan sesar utama diantaranya : *Andap Valley* (AdV), *Terongkongan Valley* (TkV), *Lodung Valley* (LdV), *Dompul Valley* (DpV), *Marudu Valley* (MrV), *Luyu Valley* (Luyu Valley), *Gana Valley* (GnV), *Kuyuh Valley* (KyV), *Narandong Valley* (NrV), *Bongkul Valley* (BkV), *Maringan Valley* (MgV), *Pansuran Valley* (PrV). Daerah ini dianggap penting untuk mendapatkan edukasi mitigasi bencana gempa bumi guna meminimalisir jumlah korban di masa depan. Dari hasil data geomorfologi tektonik di daerah penelitian dapat disimpulkan bahwasannya rezim tektonik daerah penelitian didominasi sesar geser menganan (*dekstral*) dengan arah lintasan relatif barat laut – tenggara.

5.1.2 Seismisitas

Daerah penelitian beberapa sesar tidak diberikan nilai rekomendasi *Centroid Moment Tensor* (CMT) oleh aplikasi *GeoMapapp* yang diinterpretasikan melalui *beachball*, bahkan ada beberapa nilai yang tidak

sesuai dengan keadaan geomorfologi tektonik yang dilintasi oleh sesar utama. Oleh karena itu penulis memberikan nilai rekomendasi pada setiap sesar utama di daerah penelitian berupa jurus (*strike*) dan kemiringan (*dip*). *Kankan Fault* (KF) $U173^{\circ}T/78^{\circ}$, *Tinduk – Taginambor Fault* (TTF) $U15^{\circ}T/60^{\circ}$, *Mangaris Fault* (MgF) $U243^{\circ}T/75^{\circ}$, *Marudu – Matanggal Fault* (MMF) $U310^{\circ}T/68^{\circ}$, *Tandek Fault* (TdF) $U30^{\circ}T/79^{\circ}$, *Taritipan – Sulu Fault* (TSF) $U183^{\circ}T/60^{\circ}$, *Ranggal Fault* (RF) $U20^{\circ}T/78^{\circ}$, *Tukar Fault* (TuF) $U292^{\circ}T/80^{\circ}$, *Manduring Fault* (MdF) $U190^{\circ}T/82^{\circ}$, *Telaga Fault* (TeF) $U89^{\circ}T/30^{\circ}$, dan *Bengkoka Fault* (BoF) $U70^{\circ}T/80^{\circ}$.

5.1.3 Skenario Gempabumi

Pada daerah penelitian diperkirakan dapat terjadi gempabumi kuat dengan nilai *Moment magnitude* (M_w) berkisar 5,7 hingga 6,4 M_w pada masa yang akan mendatang. Gempabumi ini disebabkan oleh pergerakan *Kankan Fault* (KF) 6 M_w , *Tinduk – Taginambor Fault* (TTF) 6,4 M_w , *Mangaris Fault* (MgF) 6,1 M_w , *Marudu – Matanggal Fault* (MMF) 6,3 M_w , *Tandek Fault* (TdF) 6 M_w , *Taritipan – Sulu Fault* (TSF) 5,9 M_w , *Ranggal Fault* (RF) 6 M_w , *Tukar Fault* (TuF) 6,2 M_w , *Manduring Fault* (MdF) 6 M_w , *Telaga Fault* (TeF) 5,7 M_w , dan *Bengkoka Fault* (BoF) 6,1 M_w .

5.1.4 Bukti Deformasi Lapangan

Pada daerah penelitian dijumpai beberapa bukti terkait deformasi permukaan akibat aktifitas tektonik seperti punggungan yang dijumpai di daerah Pitas yang membentang dari utara-selatan. Bukit Segitiga (*Triangular Facet*) dengan arah kemiringan berarah utara – selatan dijumpai di daerah Marudu. Terdapat sesar pada stasiun 8 daerah Kanibongan terdapat singkapan dengan dimensi panjang 14 m dan tinggi 4 m dengan nilai bacaan $N320^{\circ}E/70^{\circ}$ dengan offset sesar pada perlapisan sejauh 3,3 m.

Lipatan pada daerah penelitian dijumpai pada stasiun 1, 3, 10, dan 11 pada stasiun 1A merupakan jenis lipatan *open plunging inclined fold*, stasiun 1B merupakan jenis lipatan *open upright horizontal fold*, stasiun 1C merupakan jenis lipatan *close reclined steeply plunging fold*, stasiun 3 merupakan jenis lipatan *open reclined fold*, stasiun 10 merupakan jenis

lipatan *open upright horizontal fold*, dan stasiun 11 merupakan jenis lipatan *open moderately inclined plunging fold*.

Offset perlapisan pada singkapan batuan dijumpai pada stasiun 3 yang mana stasiun ini memiliki dimensi lebar 6 m dan tinggi 2 m, *offset* perlapisan ini memiliki ukuran panjang 30,8 cm dan 4 cm dengan arah relatif mengiri (*sinistral*). *Offset vein* pada singkapan terdapat di stasiun 5 dan 1D yang berada di daerah Pitas dijumpai *offset vein* dengan rata-rata pergeseran sebesar 0,3 cm dengan arah relatif menganan (*dekstral*). Dan pada stasiun 1D terdapat singkapan dengan dimensi panjang 2 km dan tinggi 1 km yang merupakan *offset* urat kuarsa dengan rata-rata pergeseran sebesar 9,5 cm. Terdapat longsor di daerah Manduring pada singkapan bukit dengan tinggi 3 m dan lebar 2 m. Arah longsor ke baratdaya ini disebabkan oleh pergeseran *Manduring Fault* (MdF) yang mengarah utara – selatan.

5.2 Saran

Potensi gempa bumi di masa mendatang diperkirakan berada pada kisaran magnitudo 5,4 hingga 6,4 Mw, yang termasuk dalam kategori gempa sedang hingga kuat. Peristiwa ini berpotensi memberikan dampak langsung pada sejumlah lembah dengan tingkat kepadatan penduduk yang tinggi, seperti *Andap Valley* (AdV), *Terongkongan Valley* (TkV), *Lodung Valley* (LdV), *Dompul Valley* (DpV), *Marudu Valley* (MrV), *Luyu Valley* (LyV), *Gana Valley* (GnV), *Kuyuh Valley* (KyV), *Narandong Valley* (NrV), *Bongkul Valley* (BkV), *Maringan Valley* (MgV), dan *Pansuran Valley* (PrV). Kondisi tersebut menuntut adanya langkah mitigasi yang terencana dan segera dari pemerintah setempat guna meminimalkan risiko korban jiwa serta kerugian material. Upaya mitigasi yang diperlukan meliputi peningkatan edukasi kebencanaan kepada masyarakat terkait gempa bumi, penerapan strategi perlindungan diri saat terjadi gempa, pembangunan infrastruktur dan bangunan yang memenuhi standar tahan gempa, serta penyediaan dan pengelolaan jalur evakuasi dan distribusi bantuan yang memadai serta mudah diakses.

Penelitian ini penting untuk dipublikasikan sebagai artikel ilmiah karena dapat menjadi sumber informasi sekaligus dasar pertimbangan bagi para pengambil kebijakan. Produk yang dihasilkan, seperti peta geomorfologi tektonik, peta

seismisitas, dan peta skenario gempabumi di wilayah ini, sebelumnya belum pernah disusun maupun dikaji secara komprehensif. Oleh sebab itu, penelitian lanjutan dengan pendekatan serupa sangat diperlukan guna meningkatkan kesiapsiagaan masyarakat dan pemerintah terhadap potensi gempa di masa yang akan datang. Selain itu, sejumlah nilai *Centroid Moment Tensor* (CMT) yang sebelumnya belum direkomendasikan oleh *GeoMapApp* telah dievaluasi ulang dan direkomendasikan kembali oleh penulis. Temuan ini menegaskan pentingnya proses verifikasi, revisi, dan standarisasi data kegempaan secara kolaboratif antarinstansi dan peneliti kebumian, dengan mengintegrasikan analisis geomorfologi tektonik dan data seismik instrumental.

DAFTAR PUSTAKA

- Aki, K., dan Richards, P. G. (1980). *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. W. H. Freeman.
- Allmendinger, R. W., Cardozo, N., dan Fisher, D. M. (2012). *Structural geology algorithms: Vectors and tensors*. Cambridge University Press.
- Aydin, A., dan Nur, A. (1982). Evolution of pull-apart basins and their scale independence. *Tectonics*, 1(1), 91–105. <https://doi.org/10.1029/TC001i001p00091>
- Balaguru, A., Nichols, G. J., dan Hall, R. (2003). The Crocker Fan, north-west Borneo: Implications for the palaeogeographic evolution of Borneo. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(8), 847–864. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(03\)00036-2](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00036-2)
- Biddle, K. T., dan Christie-Blick, N. (1985). Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation. *SEPM Special Publication No. 37*. Bolt, B. A. (1993). *Earthquakes* (4th ed.). W. H. Freeman.
- Bull, W. B. (1977). The alluvial-fan environment. *Progress in Physical Geography*, 1(2), 222–270. <https://doi.org/10.1177/030913337700100202>
- Burbank, D. W., dan Anderson, R. S. (2011). *Tectonic Geomorphology* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Burbidge, D. R. (2004). Thin-plate neotectonic models of Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B12). <https://doi.org/10.1029/2003JB002925>
- Bürgmann, R., dan Dresen, G. (2008). Rheology of the lower crust and upper mantle: Evidence from rock mechanics, geodesy, and field observations. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 36, 531–567. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.36.031207.124326>
- Burov, E. (2010). Rheology and strength of the lithosphere. *Marine and Petroleum Geology*, 27(3), 619–632. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.05.008>
- Burrett, C., Duhig, N., Stait, B., dan Whitaker, M. (1990). Plate tectonic history of the southeast Asian region. *Geological Society of Australia Special Publication*, 16,

355–372.

- Burrough, P. A., dan McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Cattin, R., dan Avouac, J. P. (2000). Modeling mountain building and the seismic cycle in the Himalaya of Nepal. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B6), 13389–13407. <https://doi.org/10.1029/2000JB900032>
- Chang, K. T. (2015). *Introduction to Geographic Information Systems* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Cholz, C. H. (2002). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Christie-Blick, N., dan Biddle, K. T. (1985). Deformation and basin formation along strike-slip faults. In K. T. Biddle dan N. Christie-Blick (Eds.), *Strike-Slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation* (Vol. 37, pp. 1–34). Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM) Special Publication.
- Clennell, M. B. (1991). *The origin and evolution of the melange zones in northern Borneo*. Ph.D. thesis, University of London.
- Clennell, M. B. (1996). Diachronous evolution of the Baram Delta province, northwest Borneo: Implications for the hydrocarbon potential of deep-water clastics. *Marine and Petroleum Geology*, 13(8), 857–879. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(96\)00038-3](https://doi.org/10.1016/0264-8172(96)00038-3)
- Cottam, M. A., Hall, R., Sperber, C. J., Armstrong, R. A., dan Suggate, S. M. (2013). Neogene stratigraphic architecture and basin evolution of Sabah, north Borneo. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76, 345–367. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.06.003>
- Crowell, J. C. (1974). Origin of late Cenozoic basins in southern California. In R.H. Dott Jr. dan R. H. Shaver (Eds.), *Modern and Ancient Geosynclinal Sedimentation* (Vol. 19, pp. 340–362). SEPM Special Publication.

- Curry, J. R. (2005). Tectonics and history of the Andaman Sea region. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(1), 187–232.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.01.009>
- Davis, G. H., dan Reynolds, S. J. (1996). *Structural Geology of Rocks and Regions* (2nd ed.). John Wiley dan Sons.
- Davis, G. H., Reynolds, S. J., dan Kluth, C. F. (2012). *Structural Geology of Rocks and Regions* (3rd ed.). John Wiley dan Sons.
- Delano Smith, D., Jackson, J., dan Campbell, E. (2021). Fault-parallel ridges as indicators of strike-slip deformation: Examples from active fault zones. *Journal of Structural Geology*, 150, 104457. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104457>
- DePolo, C. M. (1991). *Seismotectonics of the Basin and Range Province of western Nevada and eastern California*. Ph.D. dissertation, University of Nevada, Reno.
- Ekström, G., Nettles, M., dan Dziewoński, A. M. (2012). The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200–201, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., dan Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Fossen, H. (2016). *Structural Geology* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Gantenbein, R. (2012). Hillshade DEMs and the interpretation of tectonic structures. *Geospatial World Magazine*.
- Graf, K. C., dan Martel, S. J. (2021). Techniques for structural geology field mapping: Folding and faulting analysis. *Journal of Structural Geology*, 150, 104416. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104416>
- Grohmann, C. H. (2004). Morphometric analysis in geographic information systems: Applications of free software GRASS and R. *Computers dan Geosciences*, 30(9–10), 1055–1067. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.08.002>

- Hall, R. (2002). Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-based reconstructions and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(4), 353–434. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(01\)00069-4](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(01)00069-4)
- Hall, R. (2009). Southeast Asia's changing palaeogeography. *Blumea - Biodiversity, Evolution and Biogeography of Plants*, 54(1–3), 148–161. <https://doi.org/10.3767/000651909X475941>
- Hall, R. (2012). Late Jurassic–Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean. *Tectonophysics*, 570–571, 1–41. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.04.021>
- Hall, R. (2013). The palaeogeography of Sundaland and Wallacea since the Late Jurassic. *Journal of Limnology*, 72(S2), 1–17. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2013.s1.e1>
- Hamilton, W. (1979). *Tectonics of the Indonesian region* (USGS Professional Paper 1078). United States Geological Survey
- Handy, M. R., Hirth, G., dan Bürgmann, R. (1999). A synthesis of the rheological properties of rocks from structural geology and rock mechanics. *Journal of Structural Geology*, 21(10), 1245–1259. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(99\)00036-4](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(99)00036-4)
- Hanks, T. C., dan Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5), 2348–2350. <https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348>
- Hauber, E., dan McBeth, A. (2018). Applications of the "V Rule" in fault interpretation using topographic contours. *Remote Sensing in Earth Sciences*, 11(3), 225–233.
- Hirth, G., dan Kohlstedt, D. L. (2003). Rheology of the upper mantle and the mantle wedge: A view from the experimentalists. In J. Eiler (Ed.), *Inside the Subduction Factory* (Vol. 138, pp. 83–105). American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/138GM06>
- Holloway, N. H. (1982). North Palawan Block, Philippines—Its relation to Asian mainland and role in evolution of South China Sea. *American Association of Petroleum*

Geologists Bulletin, 66(9), 1355–1383.

Hutchison, C. S. (2004). Marginal basin evolution: The southern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 21(9), 1129–1148. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2004.07.003>

Hutchison, C. S. (2005). *Geology of North-West Borneo: Sarawak, Brunei and Sabah*. Elsevier.

Hutchison, C. S. (2007). Geological evolution of Borneo. *Oil and Gas Science and Technology*, 62(1), 47–54. <https://doi.org/10.2516/ogst:2007005>

Hyndman, R. D., Yamano, M., dan Oleskevich, D. A. (1997). The seismogenic zone of subduction thrust faults. *Island Arc*, 6(3), 244–260. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.1997.tb00175.x>

Jenness, J. S. (2006). *Topographic position index (TPI) and landforms classification*. Jenness Enterprises. Available at: <https://www.jennessent.com>

Keller, E. A., dan Pinter, N. (2002). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape* (2nd ed.). Prentice Hall.

Kreemer, C., Blewitt, G., dan Klein, E. C. (2014). A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(10), 3849– 3889. <https://doi.org/10.1002/2014GC005407>

Lay, T., dan Wallace, T. C. (1995). *Modern Global Seismology*. Academic Press.

Lim, C. H., dan Heng, C. C. (1985). *Geological map of Sabah, Malaysia* (1:500,000). Geological Survey of Malaysia.

Lindsey, E. O., Hubbard, J., dan Bürgmann, R. (2021). Geodetic constraints on earthquake cycle processes from InSAR time series. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49, 309–338. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-072420-071551>

Lisle, R. J., Brabham, P., dan Barnes, J. W. (2011). *Basic Geological Mapping* (5th ed.). Wiley-Blackwell.

Mandl, G. (2000). *Faulting in brittle rocks: An introduction to the mechanics of tectonic*

faults. Springer.

- Marrett, R., dan Allmendinger, R. W. (1990). Kinematic analysis of fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, 12(8), 973–986. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(90\)90093-E](https://doi.org/10.1016/0191-8141(90)90093-E)
- Mazzarini, F., Isola, I., dan Paola, C. (2020). Structural analysis of ridges in active tectonic settings using DEM and satellite imagery: Insights into fold-thrust belts. *Tectonophysics*, 789, 228549. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228549>
- McCalpin, J. P. (2009). *Paleoseismology* (2nd ed.). Academic Press.
- McNutt, S. R. (2005). Volcanic seismology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33, 461–491. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122459>
- Metcalf, I. (2013). Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66, 1–33. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.12.020>
- Monsalve, G., Sheehan, A. F., Schmitz, M., dan Perez, A. (2006). Seismic evidence for lithospheric detachment beneath eastern Venezuela and its potential role in the evolution of the Caribbean-South American plate boundary. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B6). <https://doi.org/10.1029/2005JB003894>
- Morley, C. K. (2012). Late Cretaceous–Early Palaeogene tectonic development of SE Asia. *Earth-Science Reviews*, 115(3), 37–75. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.08.002>
- Morley, C. K. (2016). Dating the onset of strike-slip deformation in SE Asia. *Geological Society, London, Special Publications*, 431(1), 1–31. <https://doi.org/10.1144/SP431.1>
- Moss, S. J., dan Wilson, M. E. J. (1998). Biostratigraphy and depositional history of the Tertiary Kutai Basin, East Kalimantan, Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 16(1), 61–93. [https://doi.org/10.1016/S0743-9547\(98\)00005-4](https://doi.org/10.1016/S0743-9547(98)00005-4)
- Mukul, M., Srivastava, V., Mukul, M., dan Ghosh, S. (2017). The use of Shuttle Radar

Topography Mission data for geological interpretation: A review. *Journal of the Geological Society of India*, 89(1), 47–64. <https://doi.org/10.1007/s12594-017-0551-1>

- Nabavi, S. A., dan Fossen, H. (2021). Influence of mechanical stratigraphy on fold- thrust structures: A review. *Tectonophysics*, 812, 228855. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228855>
- Parkinson, C. D. (1998). Observations on fault-related fold development in sandstone-shale sequences. *Geological Society of Malaysia Bulletin*, 42, 57–68.
- Pubellier, M., dan Morley, C. K. (2014). The basins of Sundaland (SE Asia): Evolution and boundary conditions. *Marine and Petroleum Geology*, 58, 555–578. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.03.020>
- Pubellier, M., Morley, C. K., dan Chantraprasert, S. (2003). Cenozoic strike-slip faulting in Thailand. In T. Morley (Ed.), *Tectonic evolution of southeast Asia* (pp. 71–
- Ramsay, J. G., dan Huber, M. I. (1987). *The Techniques of Modern Structural Geology: Volume 2: Folds and Fractures*. Academic Press.
- Roering, J. J., Kirchner, J. W., dan Dietrich, W. E. (2007). Hillslope evolution by nonlinear creep and landsliding: An experimental study. *Geology*, 27(12)
- Rohadi, S. (2009). Kajian penentuan parameter sumber gempa bumi untuk pemodelan bahaya gempa bumi di Indonesia. Laporan Teknis. Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN), Badan Geologi, Kementerian ESDM.
- Ryan, W. B. F., Carbotte, S. M., Coplan, J. O., O'Hara, S., Melkonian, A., Arko, R., dan Zemsky, R. (2009). Global Multi-Resolution Topography synthesis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(3). <https://doi.org/10.1029/2008GC002332>
- Scharf, T. E., Codilean, A. T., Jansen, J. D., dan Moucha, R. (2013). Quantitative denudation rates from morphometric analysis of triangular facets in southeastern Australia. *Geomorphology*, 195, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.04.031>

- Scholz, C. H. (2002). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Segall, P., dan Pollard, D. D. (1980). Mechanics of discontinuous faults. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 85(B8), 4337–4350. <https://doi.org/10.1029/JB085iB08p04337>
- Shah, A. A., dan Sieh, K. (2013). Rupture characteristics of major active faults in Borneo: Constraints from remote sensing and field observations. *Tectonophysics*, 608, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.08.033>
- Shearer, P. M. (2009). *Introduction to Seismology* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Shyu, J. B. H., Sieh, K., Chen, Y. G., dan Liu, C. S. (2005). Neotectonic architecture of Taiwan and its implications for future large earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B8). <https://doi.org/10.1029/2004JB003251>
- Sibson, R. H. (1984). Roughness at the base of the seismogenic zone: Contributing factors. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7), 5791–5799. <https://doi.org/10.1029/JB089iB07p05791>
- Simandjuntak, T. O., dan Barber, A. J. (1996). *Tectonic evolution of SE Asia*. Geological Society of Malaysia.
- Simons, W. J. F., dan Wang, X. (2008). Application of GPS measurements for tectonic study in SE Asia. *Geophysical Research Abstracts*, 10, EGU2008-A-01234.
- Simons, W. J. F., Socquet, A., Vigny, C., dan Ambrosius, B. A. C. (2007). A decade of GPS in Southeast Asia: Deformation and plate motion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B6). <https://doi.org/10.1029/2005JB003775>
- Stein, S., dan Wysession, M. (2003). *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. Blackwell Publishing.
- Sylvester, A. G. (1988). Strike-slip faults. *Geological Society of America Bulletin*, 100(11), 1666–1703. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1666:SSF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1666:SSF>2.3.CO;2)

- Tongkul, F. (1991). Tectonic evolution of Sabah, Malaysia. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 6(3–4), 395–406. [https://doi.org/10.1016/0743-9547\(91\)90072-Z](https://doi.org/10.1016/0743-9547(91)90072-Z)
- Tongkul, F. (1997). The geology of Sabah in relation to plate tectonics. Penerbit Universiti Malaysia Sabah.
- Tongkul, F. (2017). Active tectonics and earthquake potential of Sabah. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 64, 27–36.
- Twiss, R. J., dan Moores, E. M. (2007). *Structural Geology* (2nd ed.). W. H. Freeman and Company.
- USGS. (2021). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/>
- USGS. (2023). Earthquake Hazards Program. United States Geological Survey. <https://earthquake.usgs.gov/>
- Wallace, R. E. (1978). Geometry and rates of change of fault-generated range fronts, north-central Nevada. *U.S. Geological Survey Journal of Research*, 6(5), 637–650.
- Wang, X., dan Zhang, Y. (2021). Visualization tools for geological mapping and spatial data integration: The role of hybrid graphics software in scientific communication. *Journal of Geospatial Science and Technology*, 14(2), 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.jgst.2021.05.004>
- Wells, D. L., dan Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974–1002.
- Widiyantoro, S., Pesicek, J. D., Thurber, C. H., dan Masturyono. (2020). Evidence for active deformation and earthquake potential in Borneo. *Nature Communications*, 11, 260. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14188-z>
- Wilford, G. E., dan Khoo, H. P. (1984). Geological map of Sabah, Malaysia, sheet 2 (Ranau), scale 1:250,000. Geological Survey of Malaysia.
- Wobus, C. W., Tucker, G. E., dan Anderson, R. S. (2006). Self-formed bedrock channels.

Geophysical Research Letters, 33, L18408. <https://doi.org/10.1029/2006GL027182>

Zahirovic, S., Matthews, K. J., Flament, N., Müller, R. D., Gurnis, M., dan Seton, M. (2014).
Tectonic evolution and deep mantle structure of the eastern Tethys since the latest
Jurassic. Earth-Science Reviews, 138, 81–98.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08>

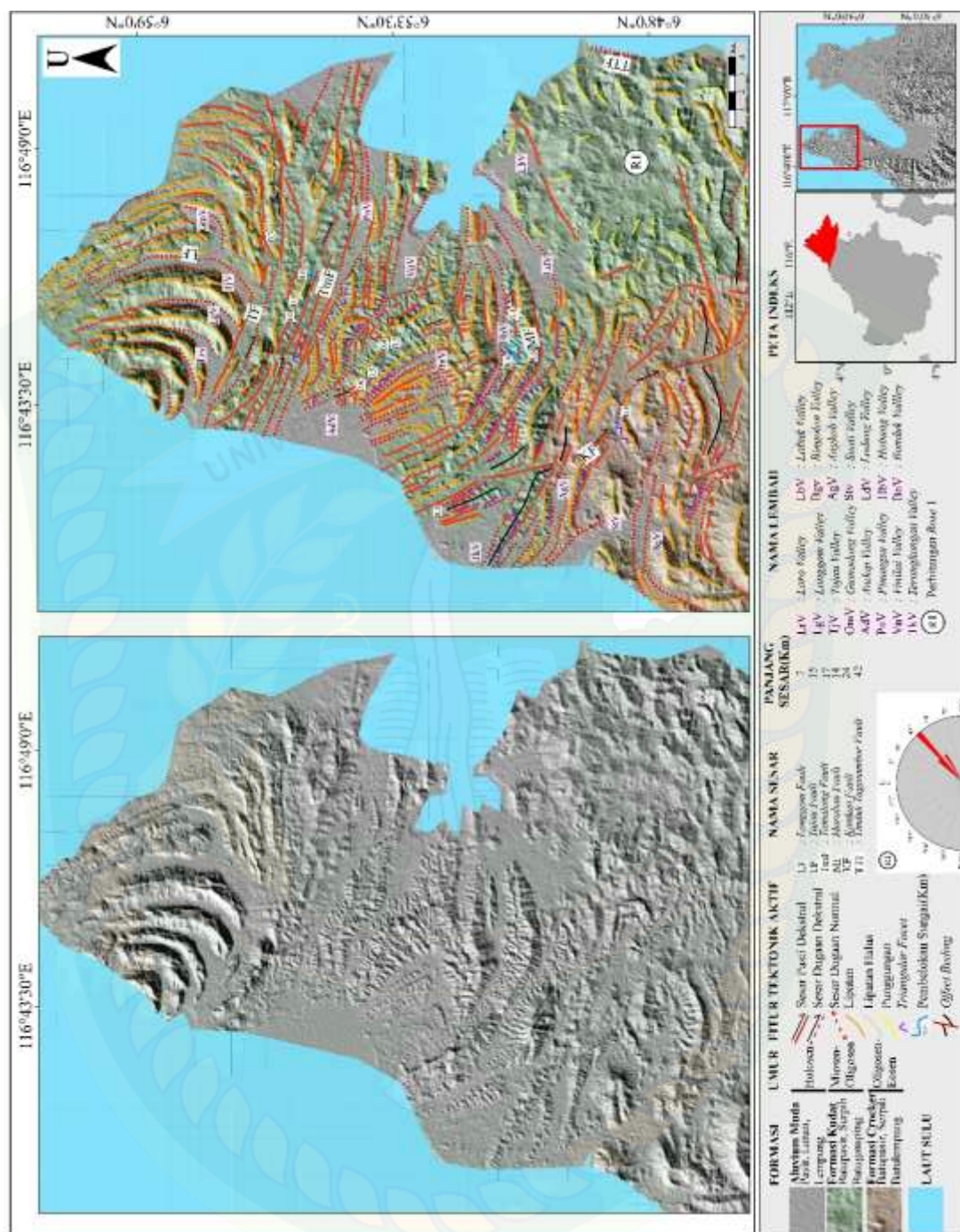


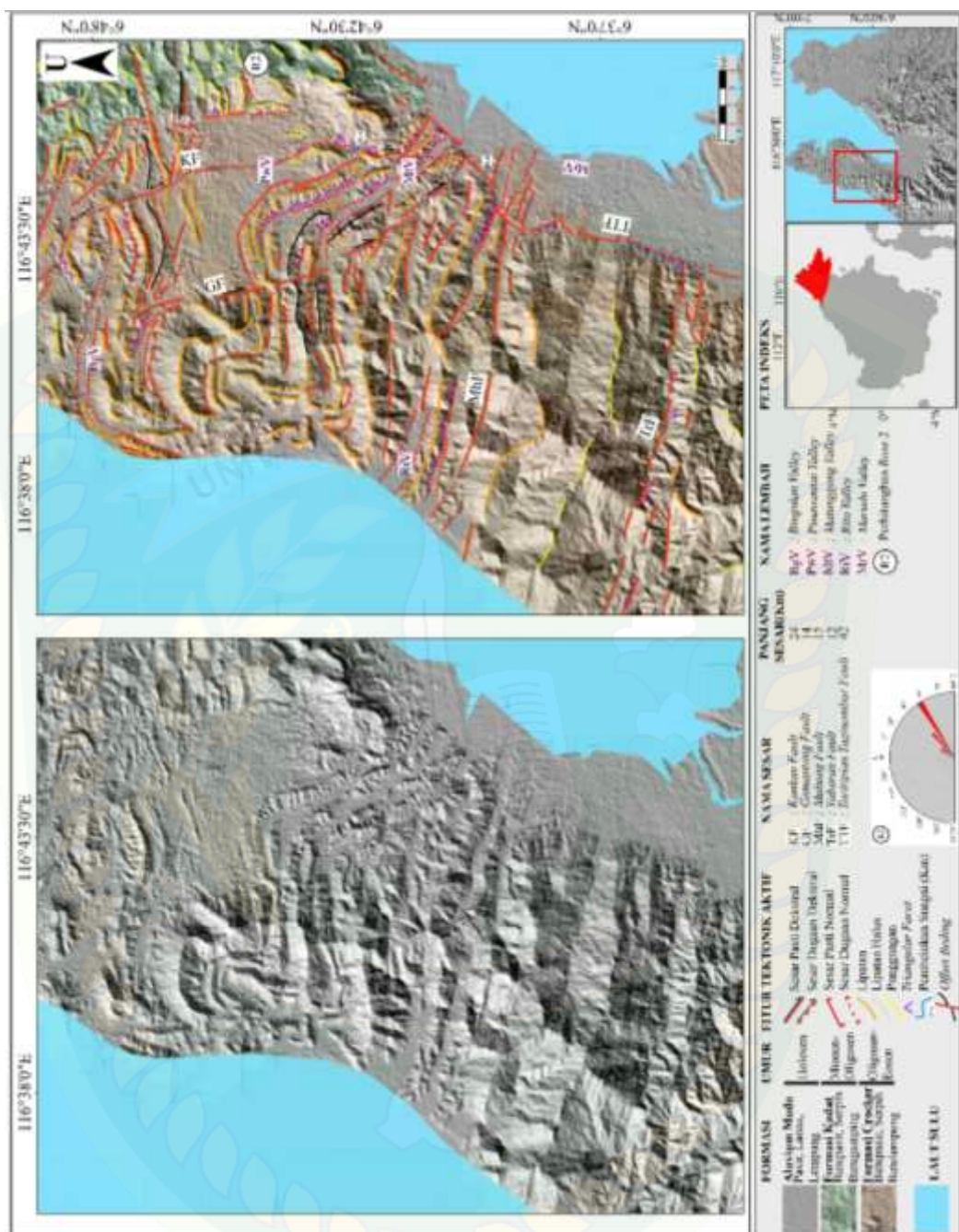
LAMPIRAN

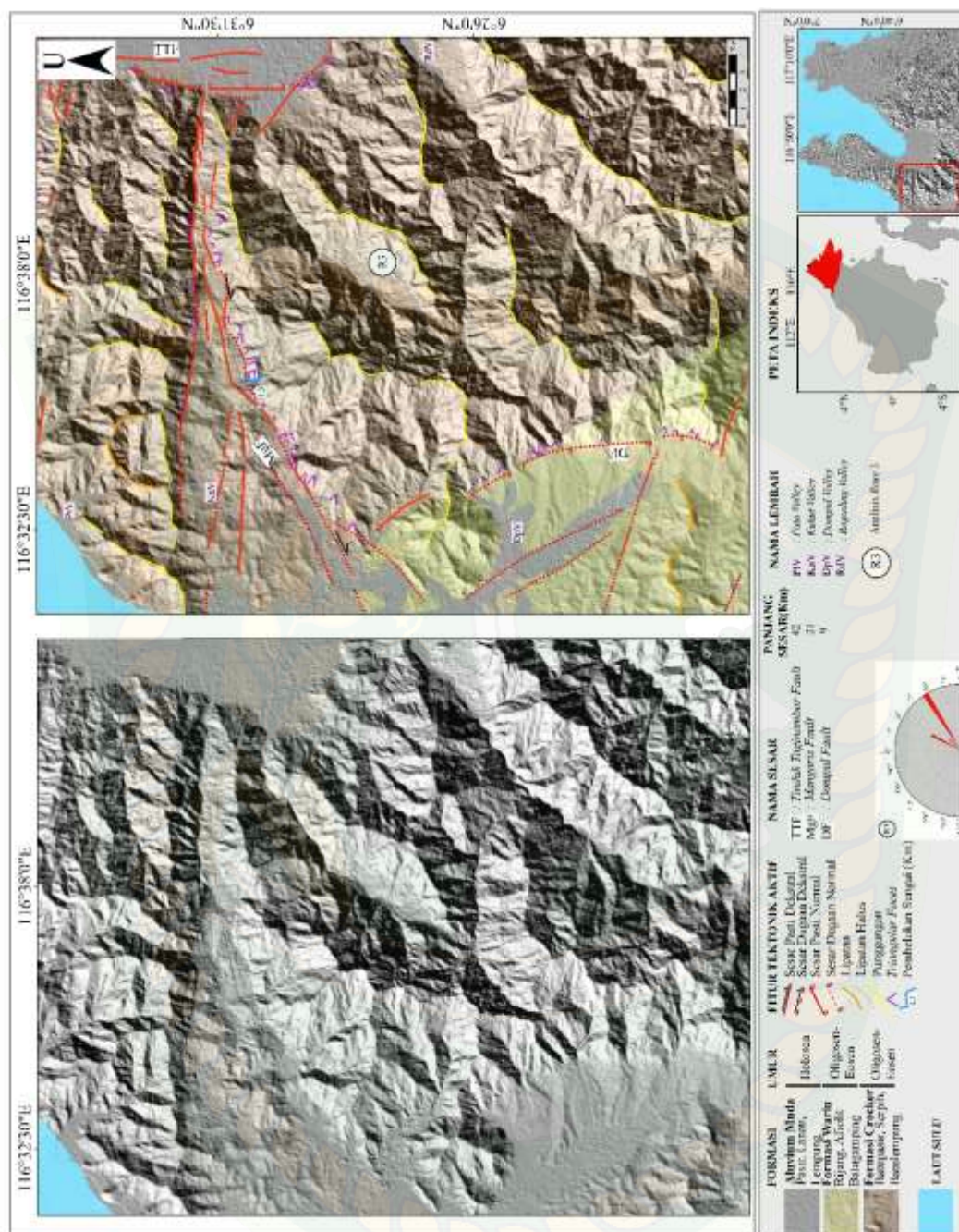
Nama Sesar	L	Jenis Sesar (D)	Downdip Limit	W	A	Mw	Mo	D	Klasifikasi Gempabumi
	(a)	(b)	(c)	(h)	(d)	(e)	(f)	(g)	(i)
Kankan Fault (KF)	5,1	Dekstral	5	5	119	6	6	1,6	Kuat
Tinduk - Taginambor Fault (TTF)	5,7	Normal	5	5,7	239	6,4	6,3	8,8	Kuat
Mangaris Fault (MgF)	5,1	Dekstral	5	6,4	130	6,1	6	1,5	Kuat
Marudu - Matanggal Fault (MMF)	5,3	Normal	5	5	207	6,3	6,2	1	Kuat
Taritipan - Sulu Fault (TSF)	5,7	Normal	5	5	90	5,9	5,9	2,1	Sedang
Tandek Fault (TdF)	5	Sinistral	5	6,4	104	6	5,9	1,9	Kuat
Ranggal Fault (RF)	5,1	Dekstral	5	5	102	6	5,9	1,9	Kuat
Tukar Fault (TuF)	5	Dekstral	5	4,9	160	6,2	6,1	1,2	Kuat
Manduring Fault (MdF)	5	Dekstral	5	4,9	111	6	6	1,8	Kuat
Telaga Fault (TeF)	10	Naik	5	2,5	56	5,7	5,7	3,3	Sedang
Bengkoka Fault (BoF)	5	Sinistral	5	4,9	121	6,1	6	1,6	Kuat

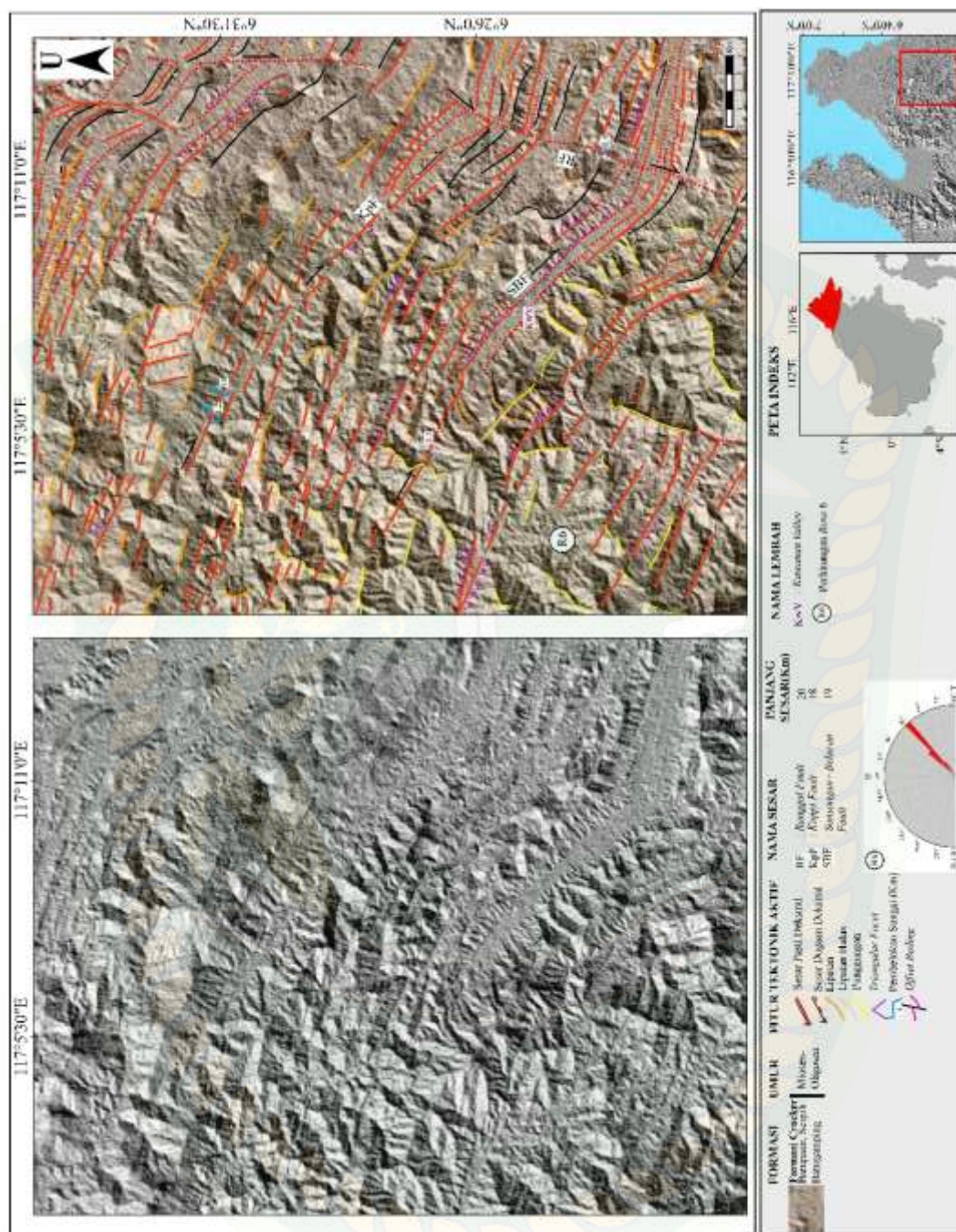
Catatan :

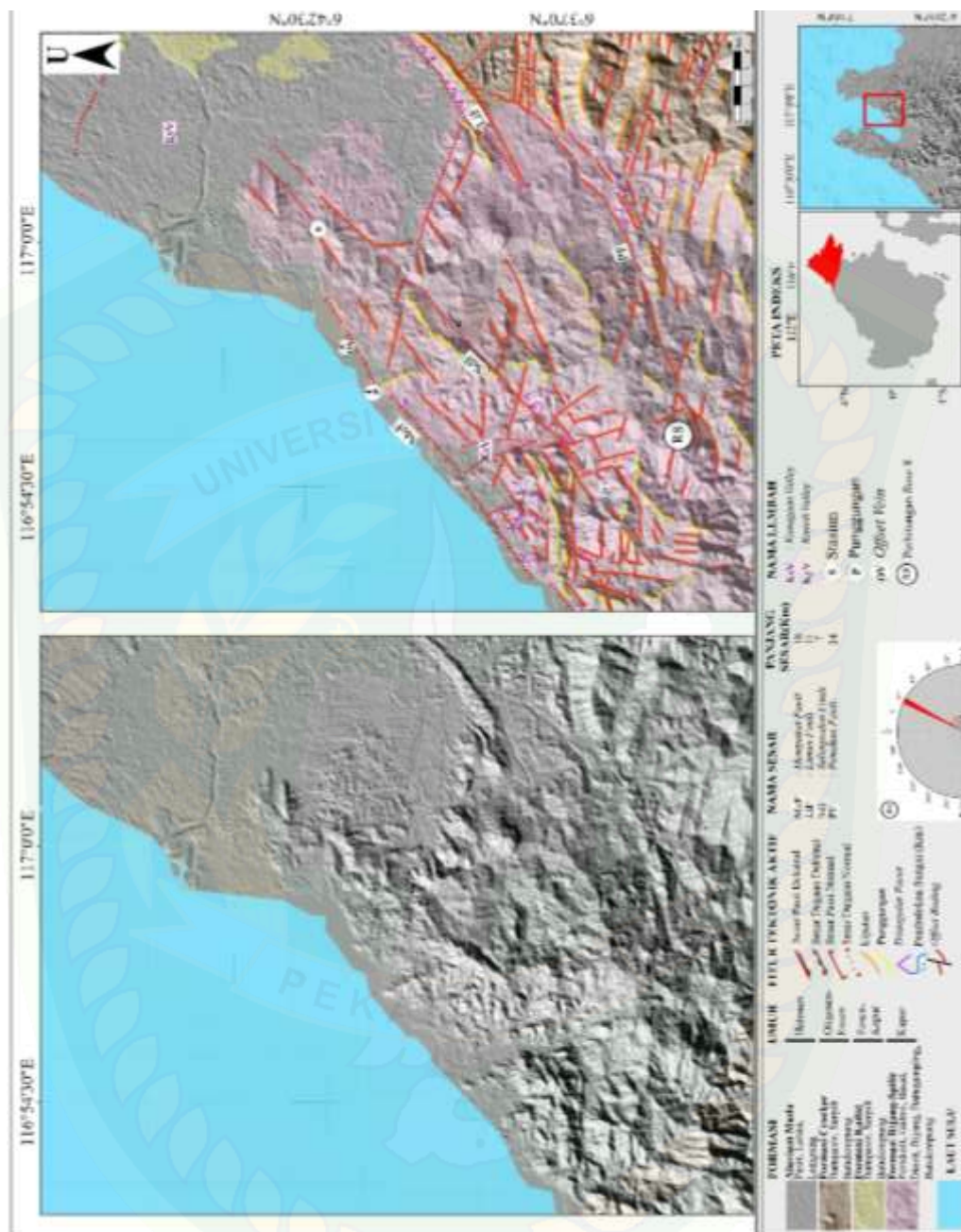
- j) Panjang patahan (L), Km
- k) D: sesar dekstral, S: sesar sinistral N: Sesar normal, T: Sesar Naik
- l) $W = \text{Downdip Limit} / \sin \text{dip patahan}$, Km
- m) $A = L \times W$, Km²
- n) *Moment magnitude* dihitung menggunakan persamaan:
 Sesar geser $M_w = 3,98 + 1,02 \log A$
 Sesar normal $M_w = 3,93 + 1,02 \log A$
 Sesar naik $M_w = 4,33 + 0,90 \log A$
- o) *Seismic moment* (Mo) dihitung menggunakan persamaan:
 $M_w = 2/3 \log Mo - 10,737$, satuan Nm
- p) *Slip rate* (D) dari masing-masing patahan
- q) Lebar patahan (W)
- r) Klasifikasi gempabumi: kecil (3-3,9 Mw), ringan (4-4,9 Mw), sedang (5-5,9 Mw), kuat (6- 6,9 Mw), besar (7-7,9 Mw), dahsyat (8-8,9 Mw)

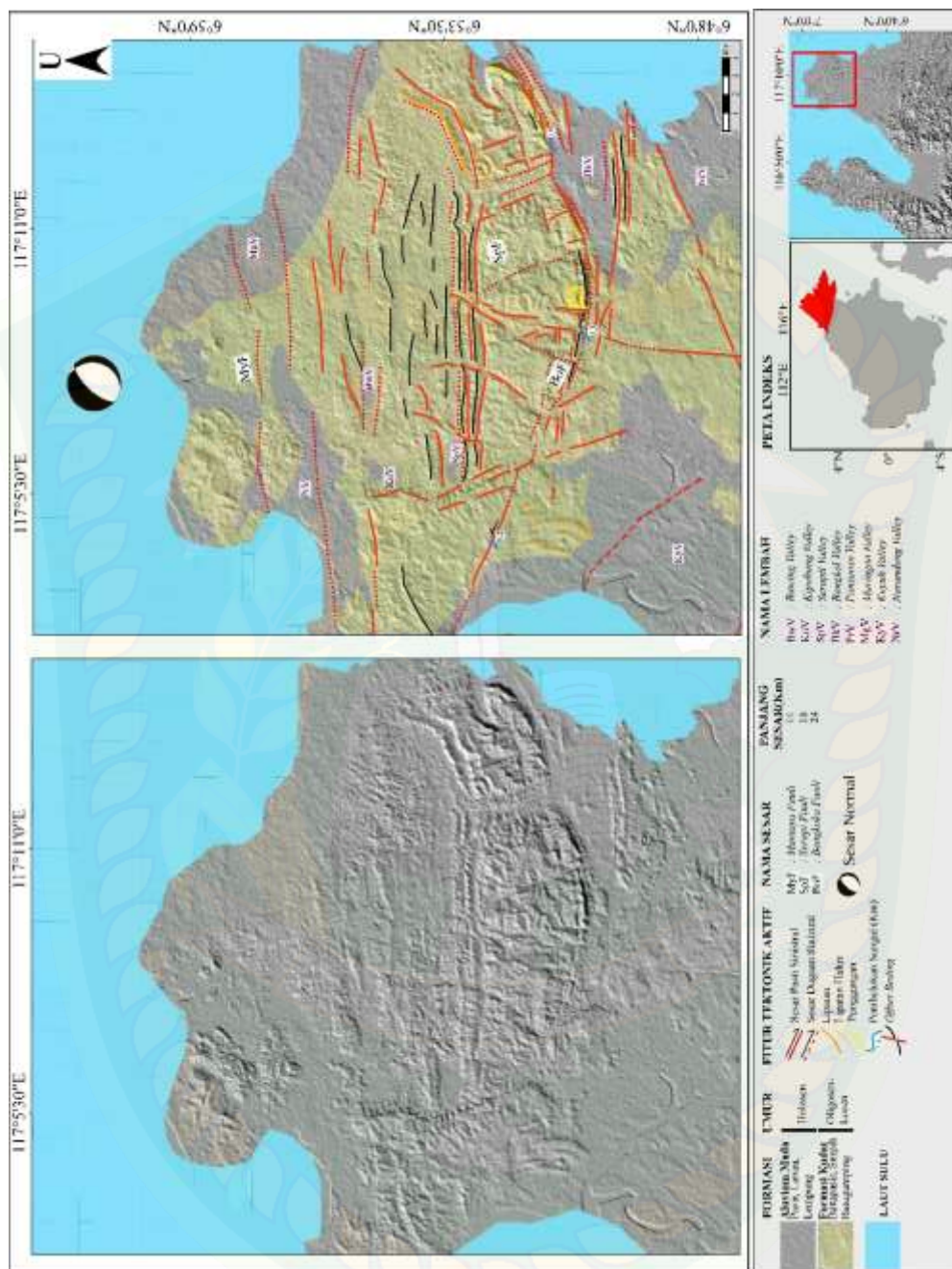


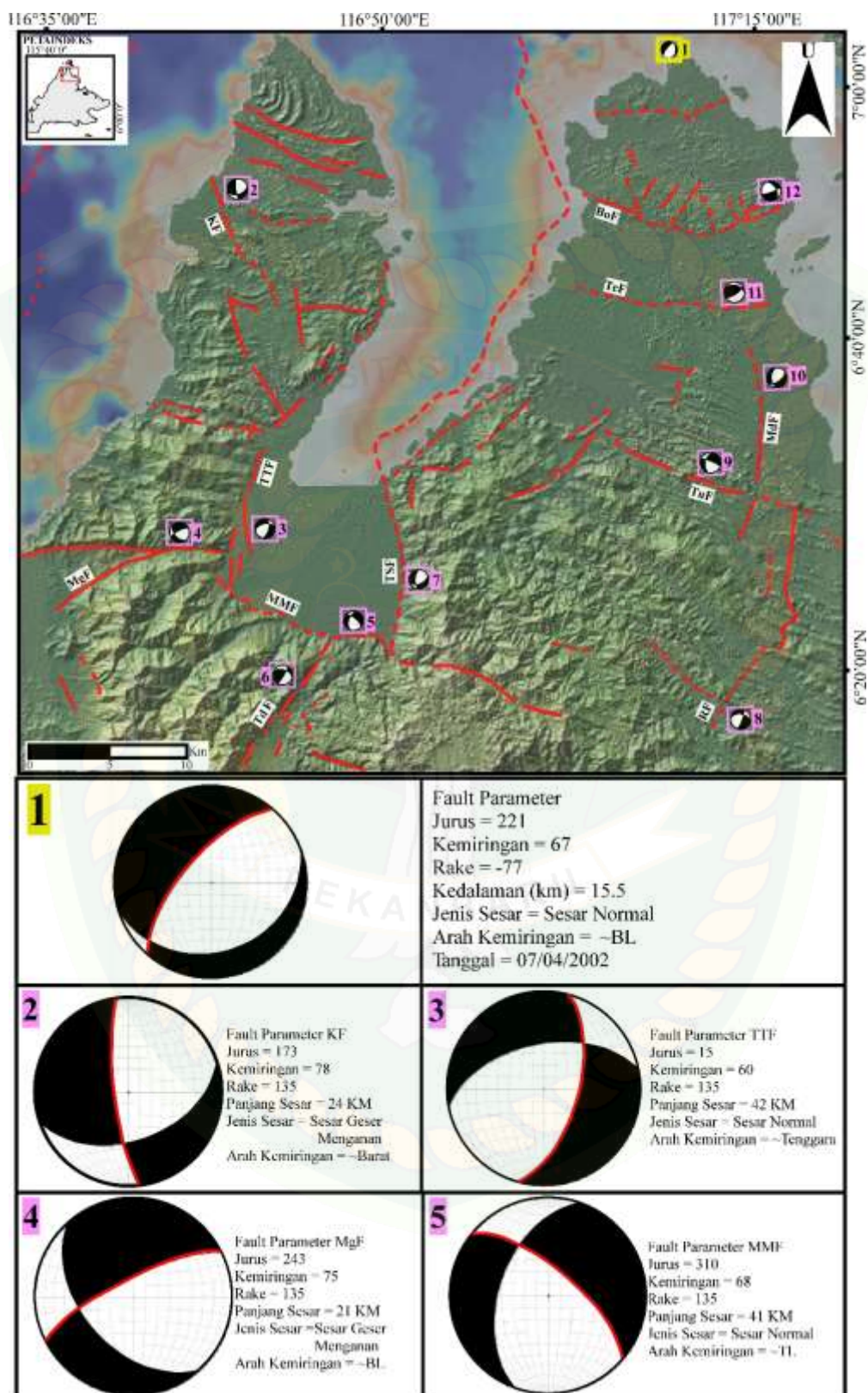


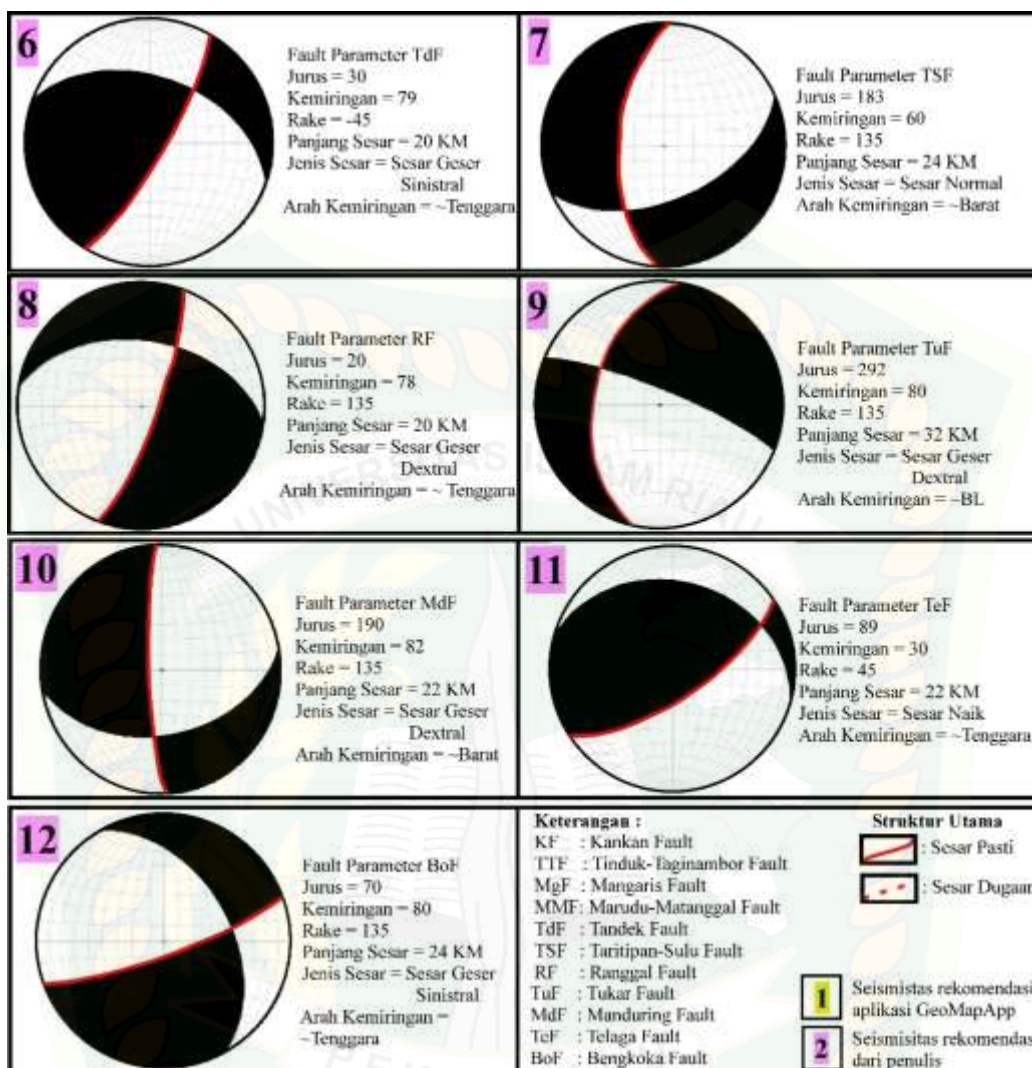


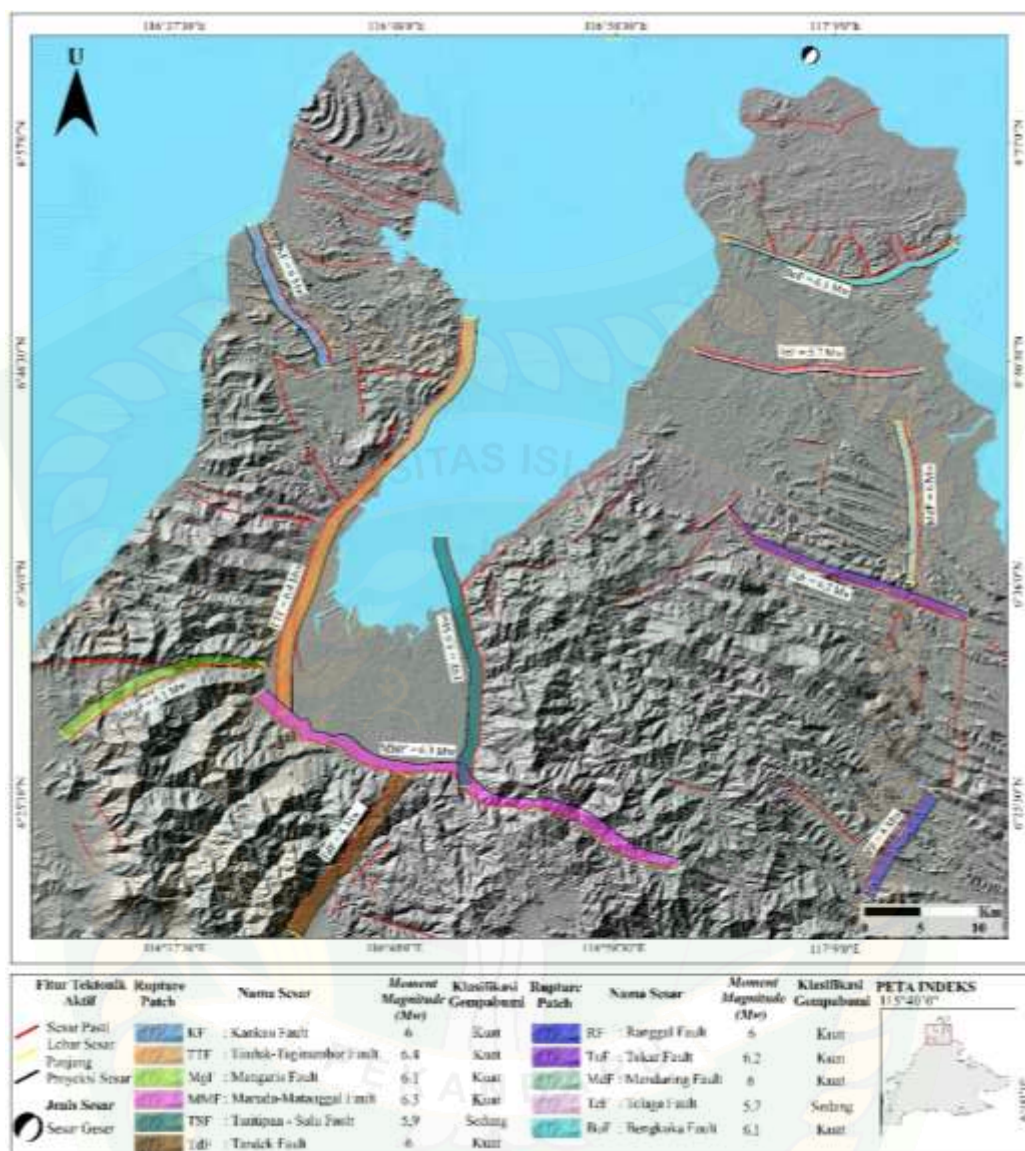


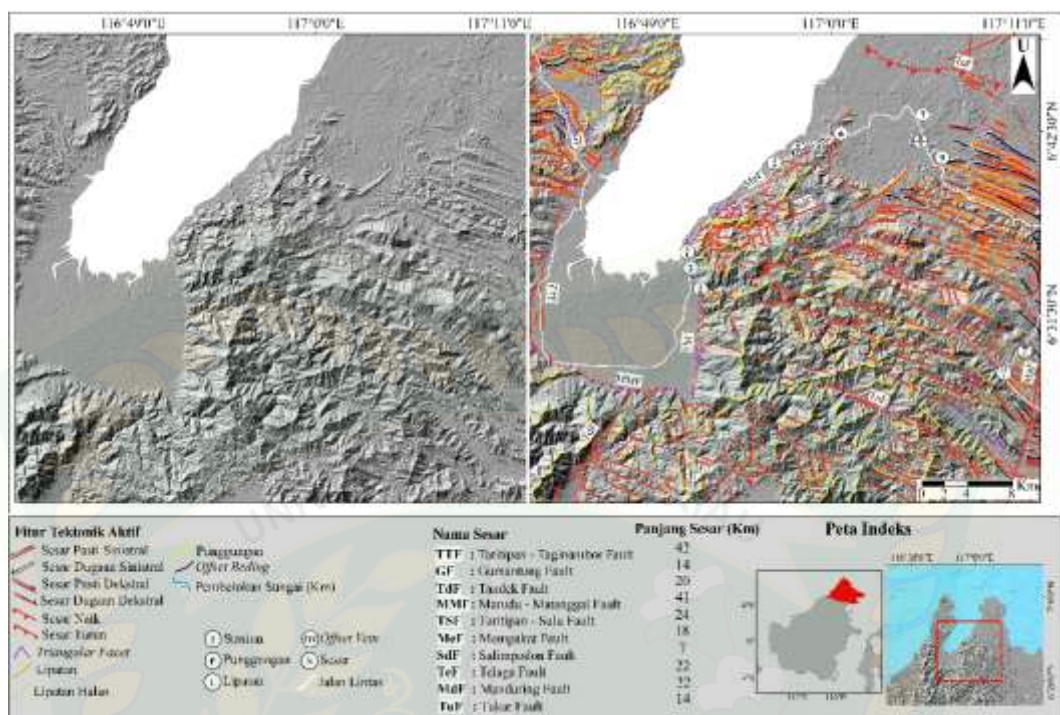














**JURNAL HARIAN
PRODI TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM RIAU**

Hari/Tanggal :		Vegetasi :	Pepohonan
Stasiun :	09	Cuaca :	Cerah
Lokasi :	Kanibongan	Elevasi :	86.8 m
Koordinat :	6°41'33" N / 117°5'35" E	Morfologi :	landai

FOTO :



DESKRIPSI :

St 9 terletak di wilayah Kanibongan pada koordinat 6°6'54" N / 116°26'28" E pada stasiun ini terdapat singkapan batupasir dan panjang singkapan 4m dan tinggi 3m yang memiliki struktur Lipatan bacaan strike/dip wing kiri N 228°E/32° wing kanan N 249°E/61°.



**JURNAL HARIAN
PRODI TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM RIAU**

Hari/Tanggal :	Vegetasi :	Pepohonan
Stasiun : 10	Cuaca :	Cerah
Lokasi : Kanibongan	Elevasi :	74.6 m
Koordinat : $6^{\circ}37'26''$ N / $117^{\circ}12'4''$ E	Morfologi :	landai

FOTO :



DESKRIPSI :

St 10 terletak di wilayah Kanibongan, beluran pada koordinat $6^{\circ}6'54''$ N / $116^{\circ}26'28''$ E pada stasiun ini terdapat singkapan batupasir. Panjang singkapan 5m dan tinggi 2m yang memiliki lipatan satu dengan arah bacaan wing kanan $N266^{\circ}/15^{\circ}$ kiri $N126^{\circ}/14^{\circ}$, dan lipatan dua dengan arah bacaan wing kanan $N49^{\circ}/30^{\circ}$ wing kiri $N196^{\circ}/51^{\circ}$. Terdapat offset perlapisan 0,5cm.



**JURNAL HARIAN
PRODI TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM RIAU**

Hari/Tanggal :	Vegetasi :	Pepohonan
Stasiun : 11	Cuaca :	Cerah
Lokasi : Kanibongan	Elevasi :	75.6 m
Koordinat : $6^{\circ}37'43''$ N / $117^{\circ}12'58''$ E	Morfologi :	landai

FOTO :



DESKRIPSI :

St 11 terletak di wilayah Kanibongan pada koordinat $6^{\circ}6'54''$ N / $116^{\circ}26'28''$ E pada stasiun ini terdapat singkapan batupasir. Panjang singkapan 6 m dan tinggi 4m, offside perlapisan 2cm



JURNAL HARIAN
PRODI TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM RIAU

Hari/Tanggal :	Vegetasi :	Pepohonan
Stasiun : 11	Cuaca :	Cerah
Lokasi : Kanibongan	Elevasi :	75.6 m
Koordinat : 6°37'43" N / 117°12'58" E	Morfologi :	landai

FOTO :



DESKRIPSI :

St 11 terletak di wilayah Kanibongan pada koordinat 6°6'54" N / 116°26'28" E pada stasiun ini terdapat singkapan batupasir. Panjang singkapan 6 m dan tinggi 4m, offside perlapisan 2cm



**JURNAL HARIAN
PRODI TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM RIAU**

Hari/Tanggal : Kamis, 27 Februari 2025
Stasiun : 01
Lokasi : Bukit Lalang
Koordinat : $6^{\circ}32'57''$ N / $116^{\circ}52'15''$ E

Vegetasi : Pepohonan
Cuaca : Berawan
Elevasi : 63 m
Morfologi : landai

FOTO :



DESKRIPSI :

St 1 terletak di wilayah Marudu koordinat $6^{\circ}32'57''$ N / $116^{\circ}52'15''$ E pada stasiun ini terdapat lipatan dengan bacaan strike/dip perlapisan $N8^{\circ}E/28^{\circ}$ dan panjang 6m dan tinggi 2m



**JURNAL HARIAN
PRODI TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM RIAU**

Hari/Tanggal :	Vegetasi :	Pepohonan
Stasiun :	Cuaca :	Cerah
Lokasi :	Elevasi :	62.5 m
Koordinat :	Morfologi :	landai

FOTO :



DESKRIPSI :

St 2 terletak di wilayah Langkon Pitas pada koordinat $6^{\circ}35'0''$ N / $116^{\circ}51'21''$ E pada stasiun ini terdapat singkapan *silt* yang memiliki struktur kekar dengan panjang singkapan 5 meter tinggi 7 meter.



**JURNAL HARIAN
PRODI TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM RIAU**

Hari/Tanggal :
Stasiun : 03
Lokasi : Langkon Pitas
Koordinat : $6^{\circ}35'10''$ N / $116^{\circ}51'19''$ E

Vegetasi : Pepohonan
Cuaca : Cerah
Elevasi : 62.2 m
Morfologi : landai

FOTO :



DESKRIPSI :

St 3 terletak di wilayah Langkon Pitas pada koordinat $6^{\circ}35'10''$ N / $116^{\circ}51'19''$ E pada stasiun ini terdapat singkapan *silt* dengan panjang singkapan 6m dan tinggi 8m, terdapat offset 12 cm.



**JURNAL HARIAN
PRODI TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM RIAU**

Hari/Tanggal :	Vegetasi :	Pepohonan
Stasiun : 04	Cuaca :	Cerah
Lokasi : Langkon Pitas	Elevasi :	92.9 m
Koordinat : 6°40'59" N / 116°56'51" E	Morfologi :	landai

FOTO :



DESKRIPSI :

St 4 terletak di wilayah Langkon Pitas pada koordinat 6°40'59" N / 116°56'51" E pada stasiun ini terdapat singkapan batuan beku panjang 8m dan tinggi 6m. Terdapat offset 1cm pada urat kuarsa dan terdapat kekar



**JURNAL HARIAN
PRODI TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM RIAU**

Hari/Tanggal :	Vegetasi :	Pepohonan
Stasiun :	Cuaca :	Cerah
Lokasi :	Elevasi :	66.6 m
Koordinat :	Morfologi :	landai

FOTO :



DESKRIPSI :

St 5 terletak di wilayah Pitas pada koordinat $6^{\circ}6'54''$ N / $116^{\circ}26'28''$ E pada stasiun ini terdapat singkapan batugamping kaya akan urat kuarsa, dan panjang singkapan 9m dan tinggi 2,5m terdapat dua offset urat kuarsa 9cm dan 3cm.

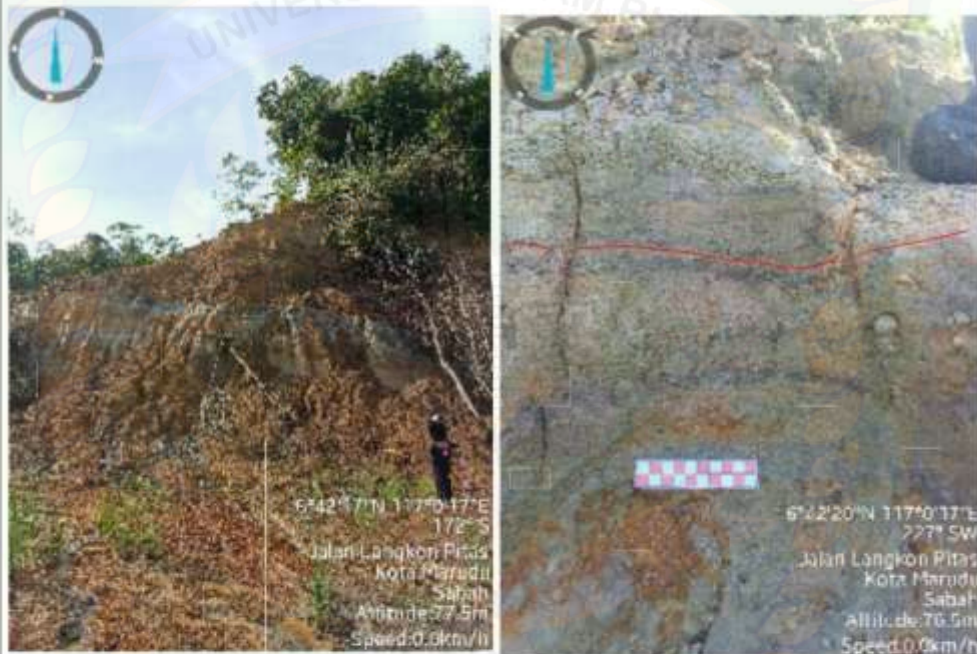


**JURNAL HARIAN
PRODI TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM RIAU**

Hari/Tanggal :
Stasiun : 06
Lokasi : Langkon Pitas
Koordinat : $6^{\circ}42'17''$ N / $117^{\circ}0'17''$ E

Vegetasi : Pepohonan
Cuaca : Cerah
Elevasi : 77.5 m
Morfologi : landai

FOTO :



DESKRIPSI :

St 6 terletak di wilayah Langkon Pitas pada koordinat $6^{\circ}42'17''$ N / $117^{\circ}0'17''$ E pada stasiun ini terdapat singkapan batupasir. Dengan panjang singkapan 10m dan tinggi 5m terdapat dua offside 2cm dan 0,5cm



**JURNAL HARIAN
PRODI TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM RIAU**

Hari/Tanggal :	Vegetasi :	Pohon Sawit
Stasiun : 07	Cuaca :	Cerah
Lokasi : Kanibongan	Elevasi :	61.55 m
Koordinat : $6^{\circ}43'15''$ N / $117^{\circ}4'56''$ E	Morfologi :	landai

FOTO :



DESKRIPSI :

St 7 terletak di wilayah Kanibongan, beluran pada koordinat $6^{\circ}6'54''$ N / $116^{\circ}26'28''$ E pada stasiun ini terdapat singkapan batulempung, dengan panjang singkapan 6m dan tinggi 3m yang memiliki offside perlapisan 2cm



**JURNAL HARIAN
PRODI TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM RIAU**

Hari/Tanggal :	Vegetasi :	Pepohonan
Stasiun : 08	Cuaca :	Cerah
Lokasi : Kanibongan	Elevasi :	77.2 m
Koordinat : $6^{\circ}42'10''$ N / $117^{\circ}5'23''$ E	Morfologi :	landai

FOTO :



DESKRIPSI :

St 8 terletak di wilayah Kanibongan, beluran pada koordinat $6^{\circ}6'54''$ N / $116^{\circ}26'28''$ E pada stasiun ini terdapat singkapan batupasir, dengan panjang singkapan 20m dan tinggi 12m yang memiliki struktur Sesar dengan bacaan slickenside $N31^{\circ}E/48^{\circ}$ dan bacaan strike/dip HW $N217^{\circ}E/5^{\circ}$ FW $N163^{\circ}E/60^{\circ}$

SURAT KEPUTUSAN DEKAN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS ISLAM RIAU
NOMOR : 0345/KPTS/FT-UIR/SI/2025
TENTANG PENGANGKATAN TIM PEMBIMBING SKRIPSI

DEKAN FAKULTAS TEKNIK

Menimbang :

1. Bahwa untuk menyelesaikan perkuliahan bagi mahasiswa Fakultas Teknik perlu membuat Skripsi.
2. Untuk itu perlu ditunjuk Tim Pembimbing penelitian dan penyusunan Skripsi yang diangkat dengan Surat Keputusan Dekan

Mengingat :

1. Undang-Undang Nomor 12 Tahun 2012 Tentang Pendidikan Tinggi
2. Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 8 Tahun 2012 Tentang Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia
3. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2009 Tentang Dosen
4. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 66 Tahun 2010 Tentang Pengelolaan dan Penyelenggaraan Pendidikan
5. Peraturan Menteri Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia Nomor 3 Tahun 2020 Tentang Standar Nasional Pendidikan Tinggi
6. Statuta Universitas Islam Riau Tahun 2018
7. Peraturan Universitas Islam Riau Nomor 001 Tahun 2018 Tentang Ketentuan Akademik Bidang Pendidikan Universitas Islam Riau

MEMUTUSKAN

Menetapkan :

1. Mengangkat saudara-saudara yang namanya tersebut dibawah ini sebagai Tim Pembimbing Penelitian & penyusunan Skripsi Mahasiswa/i Fakultas Teknik Program Studi Teknik Geologi

No	Nama	Pangkat	Jabatan
1.	CATUR CAHYANINGSIH, B.Sc(Hons)., M.Sc.	Lektor	Pembimbing

2. Mahasiswa yang akan dibimbing :

Nama : Ragil ayu hardina
NPM : 213610648
Program Studi : Teknik Geologi
Jenjang Pendidikan : Strata Satu (S1)
Judul Skripsi : KAJIAN GEOLOGI STRUKTUR DAMPAK PERGERAKAN SESAR BERDASARKAN ANALISIS GEOMORFOLOGI TEKTONIK DAN SEISMISITAS DAERAH MARUDU HINGGA PITAS, SABAH, MALAYSIA

3. Keputusan ini berlaku pada tanggal ditetapkannya dengan ketentuan bila terdapat kekeliruan dikemudian hari segera ditinjau kembali.

Ditetapkan di : Pekanbaru
Pada tanggal : 21 Mei 2025

Dekan,



Dr. DEDDY PURNOMO RETNO, S.T., M.T.
NIDN. 100502353



UNIVERSITAS ISLAM RIAU

FAKULTAS TEKNIK

جامعة الإسلامية الرياوي

F.A.3.20.FT

Alamat : Jalan Kaharuddin Nasution No. 113 Marpoyan, Pekanbaru, Riau, Indonesia - 28284
Telp. +62 761 67474 Fax. +62761 674834 Email: teknik@uir.ac.id Website: www.uir.ac.id

FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama Mahasiswa	:	Ragil ayu hardina
Dosen Pembimbing	:	CATUR CAHYANINGSIH, B.Sc(Hons)., M.Sc.
NPM	:	213610648
Program Studi	:	Teknik Geologi
Judul Kerja Praktek	:	KAJIAN GEOLOGI STRUKTUR DAMPAK PERGERAKAN SESAR BERDASARKAN ANALISIS GEOMORFOLOGI TEKTONIK DAN SEISMISITAS DAERAH MARUDU HINGGA PITAS, SABAH, MALAYSIA

No	Hari/ Tanggal Bimbingan	Materi Bimbingan	Hasil/ Saran Bimbingan	Keterangan
1.	03 Januari 2025	Penentuan Lokasi Penelitian dan serta persiapan peta (peta geologi, peta geomorfologi tektonik dan peta geologi struktur)	Mahasiswa diarahkan untuk review kondisi singkapan melalui rekaman google earth dan google map. serta memperbaiki peta tematik (peta geologi, geomorfologi tektonik dan peta geologi struktur)	Sudah ditandatangani
2.	03 Februari 2025	Persiapan studi literature	Mengarahkan mahasiswa untuk mencari latar belakang masalah penelitian dan studi literature	Sudah ditandatangani
3.	04 Maret 2025	Metode Penelitian	Menentukan tujuan dan metode penelitian yang sesuai untuk geomorfologi tektonik, seismisitas, dan skenario gempabumi	Sudah ditandatangani
4.	04 April 2025	Penguasaan software dan digitasi	Mahasiswa menguasai software ArcGIS, Geomapp, Faultkin, dan Georose	Sudah ditandatangani
5.	28 Oktober 2025	Pembahasan hasil seismisitas	Revisi peta dan sub bab Seismisitas	Sudah ditandatangani
6.	28 Oktober 2025	Pembahasan hasil Neotektonik	Revisi Peta dan Sub bab Neotektonik	Sudah ditandatangani

No	Hari/ Tanggal Bimbingan	Materi Bimbingan	Hasil/ Saran Bimbingan	Keterangan
7.	03 November 2025	Pembahasan Hasil Bukti Lapangan	Revisi Peta dan Sub bab Bukti Lapangan	Sudah ditandatangani
8.	17 November 2025	Pembahasan Hasil Bukti Lapangan	Revisi Peta dan Sub bab Bukti Lapangan	Sudah ditandatangani
9.	24 November 2025	Pembahasan hasil Visualisasi 3D tektonik	Revisi Peta dan Sub bab 3D tektonik	Sudah ditandatangani
10.	16 Desember 2025	Pembahasan hasil Riedl Shear	Revisi Peta dan Sub bab Riedl Shear	Sudah ditandatangani

Pekanbaru, 21 Juli 2025
Ketua Program Studi Teknik Geologi



BUDI PRAYITNO, S.T., M.T.



UNIVERSITAS ISLAM RIAU

FAKULTAS TEKNIK

الْجَامِعَةُ الْإِسْلَامِيَّةُ الرَّيَوِيَّةُ

Alamat: Jalan Kaharuddin Nasution No.113, Marpoyan, Pekanbaru, Riau, Indonesia - 28284
Telp. +62 761 674674 Email: fakultas_teknik@uir.ac.id Website: www.eng.uir.ac.id

SURAT KETERANGAN BEBAS PLAGIAT

Nomor: 095/A-UIR/5-T/2026

Fakultas Teknik Universitas Islam Riau menerangkan bahwa Mahasiswa/i dengan identitas berikut:

Nama : **RAGIL AYU HARDINA**
NPM : 213610648
Program Studi : Teknik Geologi
Jenjang Pendidikan : Strata Satu (S1)
Judul Skripsi TA : **KAJIAN GEOLOGI STRUKTUR DAMPAK PERGERAKAN SESAR BERDASARKAN ANALISIS GEOMORFOLOGI TEKTONIK DAN SEISMISITAS DAERAH MARUDU HINGGA PITAS, SABAH, MALAYSIA**

Dinyatakan Bebas Plagiat, berdasarkan hasil pengecekan pada Turnitin menunjukkan angka **Similarity Index < 30%** sesuai dengan peraturan Universitas Islam Riau yang berlaku.

Demikian surat keterangan ini dibuat untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Mengetahui,

Kaprodi. Teknik Geologi

Budi Prayitno, S.T., M.T.

Pekanbaru, _____ 26 March 2026 M
7 Syawwāl 1447 H

Staff Pemeriksa

Syatra Safira Anjani, S.Pd

SURAT KEPUTUSAN DEKAN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS ISLAM RIAU
NOMOR : 1454/KPTS/FT-UIR/PS/2025
TENTANG PENGANGKATAN TIM PENGUJI SKRIPSI

DEKAN FAKULTAS TEKNIK

Menimbang :

1. Bahwa untuk menyelesaikan studi S.1 bagi mahasiswa Fakultas Teknik Univ. Islam Riau dilaksanakan Ujian Skripsi/Komprehensif sebagai tugas akhir. Untuk itu perlu ditetapkan mahasiswa yang telah memenuhi syarat untuk ujian dimaksud serta dosen penguji.
2. Bahwa penetapan mahasiswa yang memenuhi syarat dan dosen penguji yang bersangkutan perlu ditetapkan dengan Surat Keputusan Dekan.

Mengingat :

1. Undang-Undang Nomor 12 Tahun 2012 Tentang Pendidikan Tinggi
2. Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 8 Tahun 2012 Tentang Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia
3. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2009 Tentang Dosen
4. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 66 Tahun 2010 Tentang Pengelolaan dan Penyelenggaraan Pendidikan
5. Peraturan Menteri Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia Nomor 3 Tahun 2020 Tentang Standar Nasional Pendidikan Tinggi
6. Statuta Universitas Islam Riau Tahun 2018
7. Peraturan Universitas Islam Riau Nomor 001 Tahun 2018 Tentang Ketentuan Akademik Bidang Pendidikan Universitas Islam Riau

MEMUTUSKAN

Menetapkan :

1. Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Islam Riau yang tersebut namanya di bawah ini :

Nama : Ragil Ayu Hardina

NPM : 213610648

Program Studi : Teknik Geologi

Jenjang Pendidikan : Strata Satu (S1)

Judul Skripsi : KAJIAN GEOLOGI STRUKTUR DAMPAK PERGERAKAN SESAR BERDASARKAN ANALISIS GEOMORFOLOGI TEKTONIK DAN SEISMISITAS DAERAH MARUDU HINGGA PITAS, SABAH, MALAYSIA

2. Penguji Seminar Proposal dan Sidang Skripsi mahasiswa tersebut terdiri dari :

CATUR CAHYANINGSIH, B.Sc(Hons)., M.Sc.

Sebagai Ketua Merangkap Penguji

ADI SURYADI, B.Sc(Hons)., M.Sc.

Sebagai Anggota Merangkap Penguji

FITRI MAIRIZKI, S.Si., M.Si.

Sebagai Anggota Merangkap Penguji

3. Laporan hasil ujian serta berita acara telah sampai kepada Pimpinan Fakultas selambat-lambatnya 1(satu) bulan setelah ujian dilaksanakan.

4. Keputusan ini mulai berlaku pada tanggal ditetapkannya dengan ketentuan bila terdapat kekeliruan dikemudian hari segera ditinjau kembali.

KUTIPAN : Disampaikan kepada yang bersangkutan untuk dapat dilaksanakan dengan sebaik-baiknya.

Ditetapkan di : Pekanbaru
Pada tanggal : 30 Juli 2025
Dekan,



Dr. DEDDY PURNOMO RETNO, S.T., M.T.
NIDN. 100502353



UNIVERSITAS ISLAM RIAU

FAKULTAS TEKNIK

الجامعة الإسلامية الريوية

Alamat: Jalan. Kaharuddin Nasution No.113, Marpoyan, Pekanbaru, Riau, Indonesia - 28284
Telp. +62 761 674674 Email: fakultas_teknik@uir.ac.id Website: www.eng.uir.ac.id

BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI

Berdasarkan Surat Keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas Islam Riau, Pekanbaru, tanggal 17 April 2026, Nomor: 0060/KPTS/FT-UIR/2026, maka pada hari Selasa, 14 April 2026, telah dilaksanakan Ujian Sidang Akhir Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Islam Riau, Jenjang Studi S1, Tahun Akademik 2025/2026 berikut ini.

Nama : Ragil ayu hardina
NPM : 213610648
Judul Skripsi : KAJIAN GEOLOGI STRUKTUR DAMPAK PERGERAKAN SESAR BERDASARKAN ANALISIS GEOMORFOLOGI TEKTONIK DAN SEISMISITAS DAERAH MARUDU HINGGA PITAS, SABAH, MALAYSIA
Waktu Ujian : Selasa, 14 April 2026
Tempat Pelaksanaan Ujian : Ruang Sidang Prodi Teknik Geologi UIR

Dengan keputusan Hasil Ujian Skripsi:
Lulus*/ Lulus dengan Perbaikan*/ Tidak Lulus*
* Coret yang tidak perlu.

Nilai Ujian:
Nilai Ujian Angka = 84 Nilai Huruf = A

Tim Penguji Skripsi.

No	Nama	Jabatan	Tanda Tangan
1.	CATUR CAHYANINGSIH, B.Sc(Hons)., M.Sc.	Ketua	1.
2.	ADI SURYADI, B.Sc(Hons)., M.Sc.	Anggota	2.
3.	FITRI MAIRIZKI, S.Si., M.Si.	Anggota	3.

Panitia Ujian

Ketua,



CATUR CAHYANINGSIH, B.Sc(Hons)., M.Sc.

NIDN. 1021128903

Pekanbaru 17 April 2026

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik



Dr. KURNIA HASTUTI, S.T., M.T.

NIDN. 990502281



UNIT LABORATORIUM TEKNIK GEOLOGI
PROGRAM STUDI TEKNIK GEOLOGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM RIAU

Jalan Kaharudin Nasution No. 113 KM. 11 Perhentian Marpoyan Pekanbaru 28284
Telp 0761 – 674635, 674636, 72126 Fax. (0761) 674636

SURAT KETERANGAN BEBAS TANGGUNGAN LABORATORIUM
No: 214 / SKRIPSI / IV / 2026

Dengan ini menyatakan bahwa mahasiswa:

Nama : Ragil Ayu Hardina
NPM : 213610648
Prodi : Teknik Geologi
Angkatan : 2021

Mahasiswa tersebut telah menyelesaikan administrasi tanggungan alat/bahan laboratorium, dan kepada mahasiswa tersebut dinyatakan tidak terdapat catatan tanggungan alat/bahan laboratorium.

Demikian surat keterangan ini dibuat untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.



Pekanbaru, 16 April 2026
Kepala Laboratorium


Fitri Mairizki, S.Si., M.Si.
NIDN. 1008058901