

**ANALISIS PENGARUH AKTIVITAS TEKTONIK TERHADAP
GEOMORFOLOGI TEKTONIK, SEISMISITAS DAN STRUKTUR
GEOLOGI DI DAERAH BELURAN, SABAH, MALAYSIA**

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Meraih Gelar Sarjana

Program Studi Teknik Geologi Fakultas Teknik

Universitas Islam Riau



Oleh:

STEVEN ANSER REYGA RAMADHAN

213610622

PROGRAM STUDI TEKNIK GEOLOGI

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS ISLAM RIAU

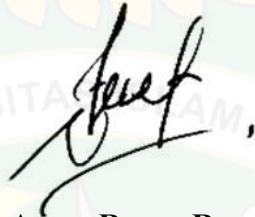
PEKANBARU

2025

**HALAMAN PENGESAHAN
SKRIPSI**

**ANALISIS PENGARUH AKTIVITAS TEKTONIK TERHADAP
GEOMORFOLOGI TEKTONIK, SEISMISITAS DAN STRUKTUR
GEOLOGI DI DAERAH BELURAN, SABAH, MALAYSIA**

Disusun Oleh:



Steven Anser Revga Ramadhan
213610622

Diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing :
Pekanbaru, 30 Januari 2026



Catur Cahyaningsih, B.Sc(Hons)M.Sc
NIDN: 1021128903

Disahkan oleh :

Ka. Prodi Teknik Geologi
Pekanbaru, 30 Januari 2026



Budi Pravito, 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



STEVEN ANSER REYGA RAMADHAN
213610622

ANALISIS PENGARUH AKTIVITAS TEKTONIK TERHADAP GEOMORFOLOGI TEKTONIK, SEISMISITAS DAN STRUKTUR GEOLOGI DI DAERAH BELURAN, SABAH, MALAYSIA

SARI

Borneo berada di antara Lempeng Eurasia dan Lempeng Filipina. Meskipun Borneo sering dianggap stabil secara tektonik, daerah penelitian ternyata menunjukkan adanya aktivitas tektonik signifikan seperti deformasi kerak, sesar aktif, dan gempa kecil hingga menengah yang belum banyak dikaji. Minimnya data dan penelitian geomorfologi tektonik, aktivitas seismik, prediksi *Moment magnitude* (Mw) gempabumi di masa depan, yang diintegrasikan dengan bukti lapangan geologi, menjadi kesenjangan pengetahuan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi kekosongan pengetahuan tersebut melalui pemetaan geomorfologi tektonik, analisis seismisitas, dan penyusunan peta neotektonik berbasis data lapangan. Metode penelitian ini mengintegrasikan pengumpulan data sekunder dan primer. Hasil penelitian ini menunjukkan beberapa fitur geomorfologi tektonik seperti 20 sesar yang dominasinya berupa sesar geser mengangan (*dextral*), lipatan besar *Beluran Mega Fold*, rata-rata *offset bedding* 1,6 km pergerakan geser mengangan, rata-rata pembelokan sungai 1,4 km orientasi geser mengangan, dan 37 set bukit segitiga. Penulis merekomendasikan 5 buah *Centroid Moment Tensor* (CMT) yang tidak direkomendasikan oleh Geomapp hal ini menyesuaikan sesuai dengan kondisi geomorfologi tektonik yang mewakili geometri sesar yang tidak tersedia di aplikasi Geomapp sebagai penyedia data seismisitas diantaranya: Sesar Linkabau (LF), Sesar Linkabau – Kias (LKF), Sesar Pamol 1 (PF1), Sesar Pamol 2 (PF2), Sesar Botitian – Paraganpang (BPF). Potensi besar *moment magnitude* (Mw) gempabumi terbesar di masa depan yang akan terjadi adalah 6.5 Mw yang diakibatkan oleh Sesar Linkabau – Kias (LKF). Bukti lapangan dijumpai bukit segitiga, punggung, lipatan, *offset* perlapisan, dan gores-garis (*slickenside*). Analisis Riedl Shear terhadap sesar Beluran (BF) merupakan kombinasi pergeseran simpel komposit dan ekstensi murni (*composite simple shear and extensional pure shear*).

Kata Kunci: Tektonik, Geomorfologi Tektonik, Seismisitas, Skenario Gempabumi, *Moment magnitude* (Mw), Beluran, Sabah.

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TECTONIC ACTIVITY ON
TECTONIC GEOMORPHOLOGY, SEISMICITY AND GEOLOGICAL
STRUCTURE IN THE BELURAN REGION, SABAH, MALAYSIA**

ABSTRACT

Borneo lies between the Eurasian Plate and the Philippine Plate. Although Borneo is often considered tectonically stable, the study area exhibits significant tectonic activity, such as crustal deformation, active faults, and small to moderate earthquakes, which have not been widely studied. The lack of data and research on tectonic geomorphology, seismic activity, and predictions of future earthquake (M_w), integrated with geological field evidence, constitutes a knowledge gap. Therefore, this study aims to fill this knowledge gap through tectonic geomorphology mapping, seismicity analysis, and the preparation of a neotectonic map based on field data. This research method integrates secondary and primary data collection. The results of this study indicate several tectonic geomorphology features, such as 20 faults, the majority of which are right-slip faults (dextral), big folds (Mega Fold), rate-rate offset bedding (1.6 km of right-hand shear movement, an average of 1.4 km of river diversion with a right-hand shear orientation, and 37 sets of triangular hills. The author recommends 5 of these. Centroid Moment Tensor (CMT) which is not recommended by the geomapapp, this is adjusted according to the tectonic geomorphology conditions that represent the fault geometry that is not available in the geomapapp application as a provider of seismicity data, including: Linkabau Fault (LF), Linkabau – Kias Fault (LKF), Pamol Fault 1 (PF1), Pamol Fault 2 (PF2), Botitian – Paraganpang Fault (BPF). Great potential moment magnitude (M_w) The largest earthquake in the future that will occur is 6.5 M_w which is caused by the Linkabau – Kias Fault (LKF). Field evidence found triangular facet, ridges, folds, offset bedding, and slickenside. Riedl Shear analysis of the Beluran Fault (BF) is a combination composite simple shear and extensional pure shear.

Keywords: Tectonics, Tectonic Geomorphology, Seismicity, Earthquake Scenarios, Moment magnitude (M_w), Beluran, Sabah.

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum wr. wb.

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas rahmat, taufik, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul **“Analisis Pengaruh Aktivitas Tektonik Terhadap Geomorfologi Tektonik, Seismisitas Dan Struktur Geologi di Daerah Beluran, Sabah, Malaysia”**. Laporan skripsi ini disusun untuk menyelesaikan Sarjana di Program Studi Teknik Geologi Universitas Islam Riau.

Penulis menyadari bahwa laporan skripsi ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak untuk perbaikan dan penyempurnaan laporan skripsi ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan bimbingan selama proses penyusunan laporan ini. Semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu geologi, khususnya dalam memahami dinamika tektonik di daerah penelitian.

Pekanbaru, 4 April 2026

Penulis

DAFTAR ISI

COVER	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	i
SARI	ii
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	12
1.1 Latar Belakang	12
1.2 Rumusan Masalah	14
1.3 Tujuan Penelitian.....	14
1.4 Manfaat Penelitian	15
1. Manfaat Bagi Akademik.....	15
2. Manfaat Bagi Masyarakat.....	15
3. Manfaat Bagi Pemerintah	15
1.5 Batasan Masalah.....	15
1.6 Lokasi Penelitian.....	16
1.7 Jadwal Penelitian.....	18
BAB II KAJIAN PUSTAKA	19
2.1 Latar Belakang Tektonik	19
2.2 Geologi.....	22
2.2.1 Geologi Borneo.....	22
2.2.2 Geologi Sabah.....	26
2.2.3 Geologi Daerah Penelitian.....	31
2.3 Struktur Geologi.....	35
2.3.1 Sesar.....	35
2.3.2 Sesar Borneo.....	37
2.3.3 Sesar Sabah.....	43
2.3.4 Lipatan	45

2.3.5 Kekar	47
2.4 Geomorfologi Tektonik	50
2.4.1 Lembah (<i>Valley</i>)	51
2.4.2 Bukit Segitiga (<i>Triangular Facet</i>)	52
2.4.3 Punggungan (<i>Ridge</i>)	55
2.4.4 <i>Focal Mechanism Solution</i>	56
2.5 Gempabumi	59
2.6 Studi Terdahulu	60
BAB III METODE PENELITIAN	63
3.1 Tahap Persiapan	63
3.2 Tahap Penelitian	63
3.3 Tahap Pengambilan Data	64
3.3.1 Pengumpulan Data Sekunder	64
3.3.2 Pengambilan Data Lapangan/Primer	64
3.3.3 Dokumentasi Visual	65
3.4 Analisis Data Sekunder	65
3.4.1 Geomorfologi Tektonik	65
3.4.2 Analisis Seismisitas	67
3.4.3 Area Retakan/Patahan	68
3.4.4 Perhitungan Moment Magnitudo Gempabumi	68
3.4.5 Sudut Kemiringan Sesar (<i>Dip Angle</i>)	69
3.4.6 Kedalaman <i>Downdip Limit</i>	70
3.4.7 Lebar Patahan	71
3.4.8 <i>Slip Rate</i>	71
3.4.9 <i>Moment Magnitude</i> (<i>M_w</i>)	72
3.4.10 <i>Seismic Moment</i> (<i>M_o</i>)	73
3.5 Analisis Data Primer	73
3.6 Perangkat Lunak dan Aplikasi Pendukung	74
3.5.1 ArcGIS	74
3.5.2 <i>GeoMapApp</i>	75
3.5.3 <i>GeoRose</i>	75
3.5.4 <i>Faultkin</i>	76

3.5.5 Canvas X.....	77
3.5.6 <i>Timestamp</i>	77
3.7 Alur Penelitian.....	78
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	80
4.1 Geomorfologi Tektonik.....	80
4.1.1. Marmahat.....	80
4.1.2 Paitan.....	81
4.1.3 Takeban.....	85
4.1.4 Linkabau.....	86
4.1.5 Botitian.....	90
4.1.6 Kaniongan.....	91
4.1.7 Pamol.....	95
4.2 Seismisitas.....	97
4.3 Skenario Gempabumi.....	101
4.4 Bukti Lapangan Geomorfologi Tektonik.....	105
4.4.1 Punggungan.....	105
4.4.2 Bukit Segitiga (<i>Triangular facet</i>).....	108
4.4.3 Lipatan.....	108
4.4.4 <i>Offset</i> Perlapisan.....	109
4.4.5 Singkapan Batuan.....	110
4.5 Pemodelan <i>Strain Elipsoid Riedle Shear</i>	115
4.6 Pemodelan 3D Sesar Daerah Penelitian.....	116
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	117
5.1 Kesimpulan.....	117
5.1.1 Geomorfologi Tektonik.....	117
5.1.2 Seismisitas.....	117
5.1.3 Skenario Gempabumi.....	118
5.1.4 Bukti Lapangan Geomorfologi Tektonik.....	118
5.2 Saran.....	119
DAFTAR PUSTAKA.....	120

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Peta Lokasi Penelitian.....	17
Gambar 2.1 Peta Tektonik Asia Tenggara.....	11
Gambar 2.2 Peta Geologi Regional Borneo	15
Gambar 2. 3 Peta Geologi Sabah.....	19
Gambar 2.4 Peta Geologi Daerah Penelitian	23
Gambar 2.5 Ilustrasi Sesar Normal, Naik, Mendatar dan Oblique.....	27
Gambar 2.6 Peta Menunjukkan Sesar Aktif Pulau Borneo	29
Gambar 2.7 Peta menunjukkan struktur geologi dan lineamen Pulau Borneo	31
Gambar 2. 8 Peta menunjukkan sesar aktif Sabah.....	34
Gambar 2. 9 Klasifikasi Penamaan Lipatan (Fleuty, 1964)	35
Gambar 2.10 Analisis Diagram Rose	37
Gambar 2.11 Analisis Kekar Menggunakan <i>Strain Ellipsoid Riedel Shear</i>	38
Gambar 2.12 Ilustrasi Lembah Jenis <i>releasing bend, fault termination, pull- apart basin, dan fault branch</i>	40
Gambar 2.13 Ilustrasi Morfologi <i>Triangular facet</i>	41
Gambar 2.14 Ilustrasi Punggungan/ <i>Ridge</i>	43
Gambar 2.15 Menunjukkan Aki Konvensi Aki dan Richard yang digunakan untuk tafsiran bidang sesar.....	44
Gambar 2.16 Visualisasi <i>Centroid Moment Tensor</i>	46
Gambar 3.1 Memperlihatkan bidang patahan yang diproyesikan ke permukaan	54
Gambar 3.2 Bagan Alir Penelitian	79
Gambar 4. 1 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Marmahat.....	83
Gambar 4. 2 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Paitan	84
Gambar 4. 3 Analisis Diagram Rose (R1) Menunjukan Dominasi Arah Punggungan Berarah Timurlaut - Baratdaya	87
Gambar 4. 4 Analisis Diagram Rose (R2) Menunjukan Dominasi Arah Punggungan Berarah Timurlaut - Baratdaya	87

Gambar 4. 5 Analisis Diagram Rose (R3) Menunjukkan Dominasi Arah Punggungan Berarah Timurlaut - Baratdaya	87
Gambar 4. 6 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Takeban	88
Gambar 4. 7 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Linkabau	89
Gambar 4. 8 Analisis Diagram Rose (R4) Menunjukkan Dominasi Arah Punggungan Berarah Timurlaut - Baratdaya.....	92
Gambar 4. 9 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Botitian	93
Gambar 4. 10 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Kaniongan.....	94
Gambar 4. 11 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Pamol	96
Gambar 4. 12 Peta Seismisitas Daerah penelitian	99
Gambar 4. 13 Nilai Seismisitas Rekomendasi Penulis Untuk Parameter Sesar Utama Daerah penelitian.....	100
Gambar 4. 14 Peta Skenario Gempabumi Daerah Penelitian.....	104
Gambar 4. 15 Peta Sebaran Bukti Lapangan Geomorfologi Tektonik Daerah Penelitian.....	106
Gambar 4. 16 Foto Geomorfologi Punggungan Pada Daerah Paitan (G1) dan Linkabau (G2)	107
Gambar 4. 17 Foto Proyeksi Bukit Segitiga (Triangular Facet), (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Sesudah Interpretasi	108
Gambar 4. 18 Foto Singkapan Stasiun 4 Yang Menunjukkan Adanya Lipatan, (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Setelah Interpretasi	109
Gambar 4. 19 Foto Offset Pelapisan Pada Stasiun 1 (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Setelah Interpretasi.....	110
Gambar 4. 20 Foto Singkapan Stasiun 1, (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Setelah Interpretasi Menunjukkan Adanya Lipatan dan Offset Perlapisan	111
Gambar 4. 21 Foto Singkapan Stasiun 6, (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Setelah Interpretasi Menunjukkan Adanya Lipatan dan Perlapisan	111
Gambar 4. 22 Foto Singkapan Stasiun 8, (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Setelah Interpretasi Menunjukkan Adanya Perlapisan Yang Terlipat dan Offset Perlapisan	112

Gambar 4. 23 Foto Singkapan Stasiun 11, (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Setelah Interpretasi Menunjukkan Adanya Perlapisan Batuan	113
Gambar 4. 24 Foto Singkapan Stasiun 12, (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Setelah Interpretasi Menunjukkan Adanya Perlapisan Batuan	113
Gambar 4. 25 Foto Singkapan Stasiun 13, (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Setelah Interpretasi Menunjukkan Adanya Cermin Sesar (Slickenslide).....	114
Gambar 4. 26 Foto Singkapan Stasiun 15, (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Setelah Interpretasi Menunjukkan Adanya Perlapisan Batuan	114
Gambar 4. 27 Pemodelan Sesar BF Pada Daerah Penelitian Menggunakan Strain Elipsoid Riedle Shear	115
Gambar 4. 28 Pemodelan 3D Sesar Di Daerah penelitian.....	116

DFTAR TABEL

Tabel 1.1 Waktu Penelitian	18
Tabel 2.1 Tabel Kesenjangan Penelitian Terdahulu.....	16
Tabel 2.2 Rekomendasi Kedalaman Brittle-Ductile Transition (BDT) di Pulau Borneo	21
Tabel 2.3 Rekomendasi Nilai Brittle-Ductile Transition untuk Sabah	35
Tabel 2.4 Rekomendasi Nilai Brittle-Ductile Transition (BDT), kawasan Beluran, Sabah	32
Tabel 2.5 Struktur Geologi Utama di Pulau Borneo Berdasarkan Peta Liniamen dan Sesar	36
Tabel 2.6 Klasifikasi Lipatan Berdasarkan Interlimb Angle (Fluety, 1964).....	60
Tabel 2.7 Klasifikasi Gempabumi Berdasarkan Magnitudo (Mw), Kedalaman, dan Jenis Gempa.....	60

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia secara tektonik terletak pada pertemuan tiga lempeng utama: Lempeng Indo-Australia pada bagian selatan, Lempeng Eurasia pada bagian utara dan Lempeng Pasifik pada sebelah timur, menjadikannya kawasan dengan tingkat seismisitas tinggi (Hall, 1996; 2012). Borneo sendiri berada di antara Lempeng Eurasia pada bagian barat dan Lempeng Filipina di timurlaut, meskipun relatif stabil dibandingkan Sumatra atau Jawa, Borneo menunjukkan aktivitas tektonik seperti pergerakan lempeng, sesar aktif, dan seismik kecil-menengah (Hamilton, 1979; Widiyantoro dkk., 2020). Namun penelitian tentang dinamika tektonik Borneo masih terbatas, menyebabkan kurangnya data spasial sesar, peta geomorfologi tektonik, catatan seismisitas, dan skenario gempa berbasis geologi, hal ini menyebabkan adanya kesenjangan pengetahuan (*knowledge gap*). Oleh karena itu penulis termotivasi untuk melakukan penelitian ini guna melengkapi kesenjangan pengetahuan melalui pemetaan geomorfologi tektonik, analisis seismik, dan skenario gempa dengan bukti lapangan.

Minimnya ketersediaan peta geomorfologi tektonik berskala rinci di wilayah Sabah menghambat kajian kebencanaan geologi dan geodinamika, di mana data yang tersedia hanya bersifat regional dan bersifat umum. Pemahaman terhadap fitur geomorfologi tektonik, seperti sesar, lipatan, punggung, bukit segitiga, serta pembelokan sungai, masih terbatas, padahal merupakan indikator krusial penyelesaian aktif dan mitigasi risiko seismik (Burbank dan Anderson, 2013; Keller dan Pinter, 2002). Pemanfaatan data citra satelit SRTM 30m belum optimal meskipun potensial untuk analisis detail (Grohmann, 2004; Narkhede dan Patil, 2014), disertai minimnya integrasi antara data geomorfologi dan seismisitas (Ouimet dkk., 2009; Mills, 2011). Penelitian ini bertujuan memecahkan kesenjangan tersebut melalui pemetaan komprehensif dan sistematis yang belum pernah dilakukan secara mendalam sebelumnya.

Borneo, khususnya Sabah, menunjukkan aktivitas seismik yang mengindikasikan tektonik aktif, namun mekanisme sumber gempa (*focal mekanisme*) seperti "*beachball*" masih sangat terbatas, ini menyebabkan minimnya

pemahaman geometri sesar aktif termasuk parameter-parameter penting seperti arah jurus (*strike*), kemiringan bidang sesar (*dip*), arah pergeseran sesar (*rake*), hingga besaran nilai *Moment magnitude* (M_w) serta riwayat kegempaan (Stein dan Wysession, 2003; Lay dan Wallace, 1995). Hal disebabkan oleh rendahnya analisis seismometer, terbatasnya data seismik terbuka, serta minimnya dokumentasi historis gempa. Hal ini mempengaruhi interpretasi struktur utama seperti Sesar Crocker dan Sesar Sabah, yang masih bersifat indikatif (Hutchison, 2005; Lee dan Abdullah, 2019; Abdullah dkk., 2021).

Pemodelan skenario gempabumi berdasarkan estimasi *Moment magnitude* (M_w) maksimum merupakan elemen krusial dalam penilaian bahaya seismik Sabah, wilayah ini menunjukkan aktivitas tektonik signifikan melalui sesar aktif seperti Sesar Crocker dan Sesar Ranau (Tongkul, 2017). Namun, ketiadaan peta skenario gempa yang mempertimbangkan geometri sesar, panjang segmen, *slip rate*, dan fitur geomorfologi mencerminkan kesenjangan pengetahuan (*knowledge gap*) yang signifikan, terutama karena minimnya pemodelan geospasial dan prediksi besaran *Moment magnitude* (M_w) berdasarkan data sesar aktif. Sehingga membatasi strategi mitigasi seperti tata ruang, desain infrastruktur tahan gempa, dan kesiapsiagaan masyarakat. Penelitian ini mengisi kekosongan tersebut melalui analisis seismisitas kuantitatif yang dikorelasikan dengan data geomorfologi tektonik dan histori gempa untuk menghasilkan peta skenario gempa berbasis estimasi *Moment magnitude* (M_w), sebagai landasan ilmiah mitigasi risiko seismik yang kredibel.

Bukti geologi permukaan seperti pergeseran sesar (*fault displacement*), pergeseran lapisan (*offset strata*), dan lipatan yang dipicu oleh gempabumi merupakan indikator utama yang mencerminkan aktivitas deformasi kerak secara langsung. Observasi lapangan terhadap fenomena-fenomena ini sangat penting, tidak hanya untuk merekonstruksi sejarah tektonik masa lalu, tetapi juga dalam memprediksi kemungkinan kejadian seismik di masa mendatang dengan dasar geologis yang kuat (Hutchison, 2005; Tongkul, 2017). Namun, untuk wilayah Sabah, dokumentasi ilmiah yang sistematis terhadap bukti-bukti deformasi permukaan tersebut masih sangat terbatas. Hal ini menciptakan kesenjangan pengetahuan (*knowledge gap*) yang nyata, yakni belum adanya pendekatan

komprehensif yang mengintegrasikan observasi geologi permukaan dengan analisis seismisitas untuk memahami hubungan antara fitur geomorfologi tektonik dan dinamika deformasi aktif di wilayah ini. Oleh karena itu, penelitian ini berusaha menjawab kekosongan tersebut dengan melakukan integrasi antara pemetaan geomorfologi aktif dan analisis deformasi permukaan yang terverifikasi di lapangan, guna mengungkap karakteristik fisik, segmentasi, dan perilaku sesar aktif secara lebih rinci.

Studi ini bertujuan untuk mengumpulkan data terkini dan menyusunnya dalam bentuk berbagai peta tematik, seperti Peta Geomorfologi Tektonik, Peta Seismisitas, Peta Skenario Gempabumi, dan dokumentasi lapangan geologi. Luaran ini diharapkan dapat memperkuat pemahaman ilmiah dalam perencanaan pembangunan wilayah Sabah yang lebih adaptif terhadap potensi gempabumi di masa depan.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun yang menjadi rumusan masalah pada penelitian ini diantaranya:

1. Bagaimana keadaan fitur geomorfologi tektonik pada daerah penelitian?
2. Bagaimana kondisi seismisitas yang ada pada daerah penelitian?
3. Berapa nilai prediksi besaran *Moment magnitude* (M_w) gempabumi pada daerah penelitian?
4. Bagaimana bukti-bukti foto lapangan yang memiliki hubungan dengan terkait dengan deformasi pada daerah penelitian?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menginterpretasikan keadaan fitur geomorfologi tektonik pada daerah penelitian.
2. Menganalisis kondisi seismisitas pada daerah penelitian.
3. Menganalisis prediksi nilai besaran *Moment magnitude* (M_w) pada daerah penelitian.
4. Mengidentifikasi bukti-bukti foto lapangan akibat proses deformasi pada daerah penelitian.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini mengintegrasikan beberapa data seperti data geomorfologi tektonik, seismisitas, pemodelan skenario gempabumi serta validasi bukti aktivitas tektonik di lapangan, yang menjadi data krusial dalam pemahaman deformasi kerak bumi secara komprehensif. terutama di wilayah dengan kategori tektonik aktif seperti Sabah. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan beberapa manfaat melalui beberapa analisis diantaranya:

1. Manfaat Bagi Akademik

- a. Geomorfologi Tektonik : identifikasi fitur seperti sesar, lipatan, offset sungai, punggung, segi segitiga untuk membekukan analisis aktif (Montgomery, 2001).
- b. Seismisitas : Korelasi distribusi episenter, magnitudo, kedalaman dengan geometri sesar sebagai sumber gempa utama (Sili dan Murjaya, 2022).
- c. Skenario Gempabumi : Prediksi Mw untuk potensi gempa masa depan.
- d. Bukti Lapangan : Validasi sesar, lipatan, offset sungai dari citra untuk bukti tektonik aktual.

2. Manfaat Bagi Masyarakat

- a. Meningkatkan risiko kesadaran geologi dan seismik.
- b. Memperkuat kesiapsiagaan mitigasi bencana melalui informasi yang akurat.
- c. Minimalisir dampak sosial-ekonomi dari gempa.

3. Manfaat Bagi Pemerintah

- a. Landasan kebijakan tata ruang aman gempa dan infrastruktur tahan gempa.
- b. Perencanaan pembangunan adaptif dan berkelanjutan.
- c. Pengelolaan risiko bencana berbasis bukti ilmiah.

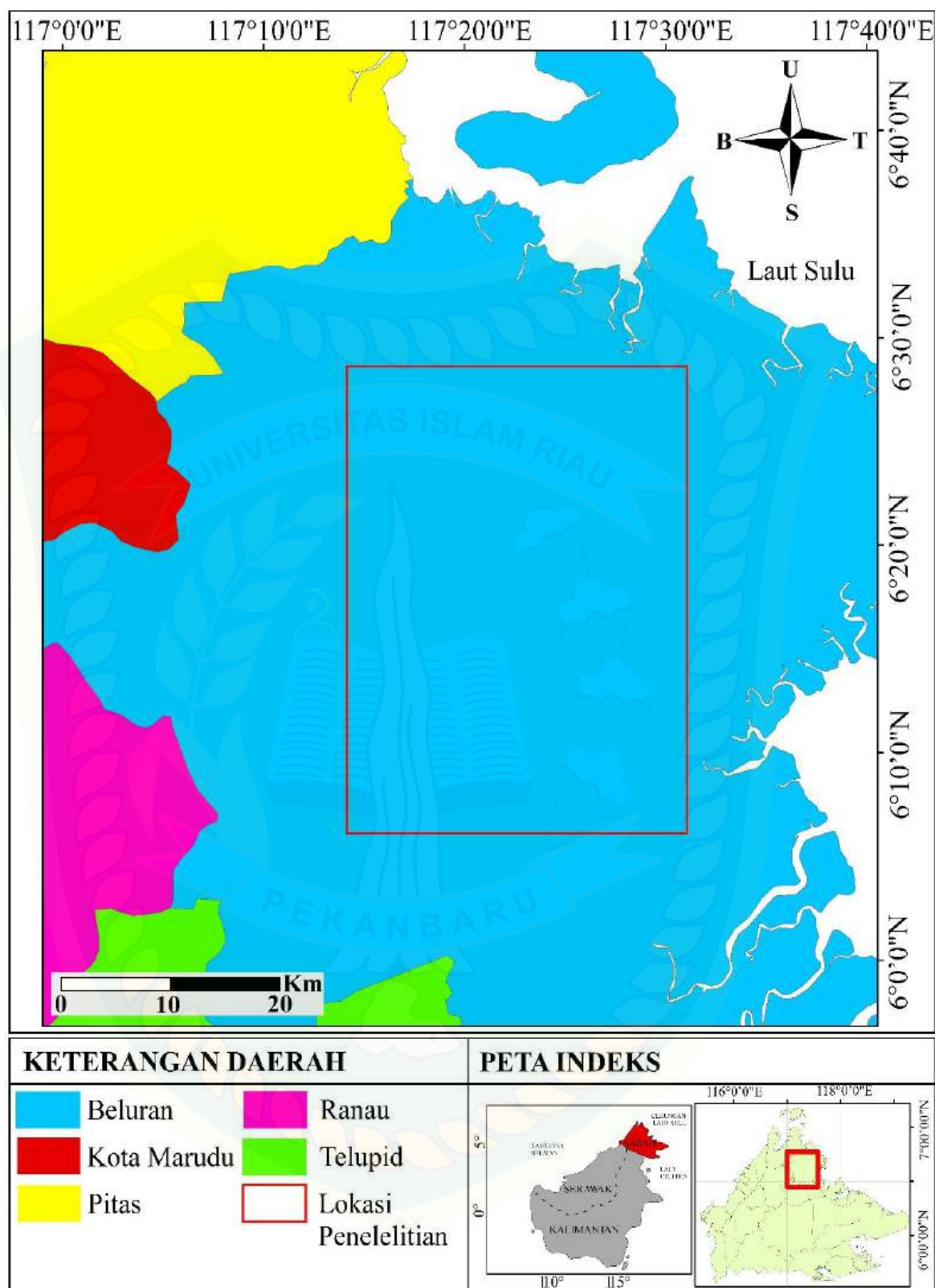
1.5 Batasan Masalah

Penulis membatasi kawasan penelitian dengan mengamati singkapan tepi jalan yang membentang sepanjang 54 Km dengan luasan kavling 78 x 63 Km (4.916 km²) . Batasan penelitian ini terdiri dari empat aspek utama terkait dinamika

tektonik di daerah studi. Pertama, analisis geomorfologi tektonik permukaan dilakukan dengan memanfaatkan citra satelit *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) beresolusi sekitar 30 meter untuk mengidentifikasi fitur-fitur lahan yang menunjukkan aktivitas tektonik, seperti fitur geomorfologi tektonik, patahan, lipatan, *offset* sungai, dan pola punggung (*ridge axis*) (Grohmann, 2004; Narkhede dan Patil, 2014). Kedua, aspek seismisitas difokuskan pada penyusunan rekomendasi geometri sesar aktif yang sebelumnya belum terdokumentasi secara lengkap, dengan menggunakan data gempabumi historis dan instrumental sebagai dasar analisis (Ouimet dkk., 2009; Mills, 2011). Ketiga, dilakukan estimasi *Moment magnitude* (M_w) untuk potensi gempa di masa depan menggunakan pendekatan empiris yang mengacu pada parameter geometri sesar (Tongkul, 2017). Keempat, penelitian ini melibatkan pengumpulan bukti geologi lapangan berupa singkapan batuan terdeformasi, struktur sesar, dan bukti *offset* lapisan yang berfungsi sebagai validasi interpretasi morfotektonik dan pemodelan seismik (Hutchison, 2005). Pembatasan ruang lingkup ini bertujuan untuk memfokuskan analisis secara mendalam terhadap potensi deformasi dan aktivitas tektonik di wilayah penelitian.

1.6 Lokasi Penelitian

Kesampaian lokasi penelitian yang berada sekitar 300 km dari Pekanbaru menuju Sabah (Kota Kinabalu) memerlukan waktu tempuh kurang lebih 5 jam dengan dua kali transit penerbangan (Pekanbaru-Kuala Lumpur-Kota Kinabalu) kemudian dilanjutkan dengan perjalanan darat dari Kota Kinabalu menuju lokasi penelitian dengan jarak tempuh kurang lebih 230 km yang memakan waktu kurang lebih 6 jam perjalanan. Lokasi penelitian terletak di daerah Beluran, Sabah, yang dapat dilihat pada peta administrasi (**Gambar 1.1**). Di sebelah utara berbatasan dengan Pitas dan Laut Sulu, sebelah selatan berbatasan dengan Telupid, sebelah barat berbatasan dengan Kota Marudu dan Ranau, lalu di sebelah timur berbatasan dengan Laut Sulu.



Gambar 1.1 Peta Administrasi Daerah Penelitian

1.7 Jadwal Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama 10 bulan mulai Juli 2025 hingga April 2026. Pada bulan Juli, kegiatan diawali dengan tahap persiapan penelitian. Kemudian dilanjutkan dengan penulisan proposal penelitian. Seminar proposal kemudian dilakukan pada minggu ketiga bulan Agustus 2025 guna mendapatkan penilaian tentang topik yang diajukan memiliki metode yang relevan serta memiliki kontribusi ilmiah.

Setelah seminar proposal, peneliti akan mempelajari beberapa perangkat lunak pendukung meliputi ArcGIS, *GeomapApp*, *Faultkin*, dan Canvas X untuk keperluan analisis data. Pengambilan data lapangan dilakukan selama dua pekan pada akhir Agustus dan awal September 2025, mencakup pengumpulan data lapangan serta dokumentasi visual sebagai bukti geomorfologi tektonik.

Data yang telah terkumpul kemudian akan diolah dan dianalisis secara komprehensif. Proses penulisan skripsi dilaksanakan pada bulan Februari 2026 berdasarkan hasil analisis data yang diperoleh. Tahap akhir penelitian adalah seminar hasil yang dijadwalkan pada akhir periode penelitian yaitu bulan April 2026. Seluruh rangkaian kegiatan penelitian ini telah disusun secara sistematis sesuai dengan waktu yang telah ditetapkan (**Tabel 1.1**).

Tabel 1.1 Jadwal Waktu 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									
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

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Latar Belakang Tektonik

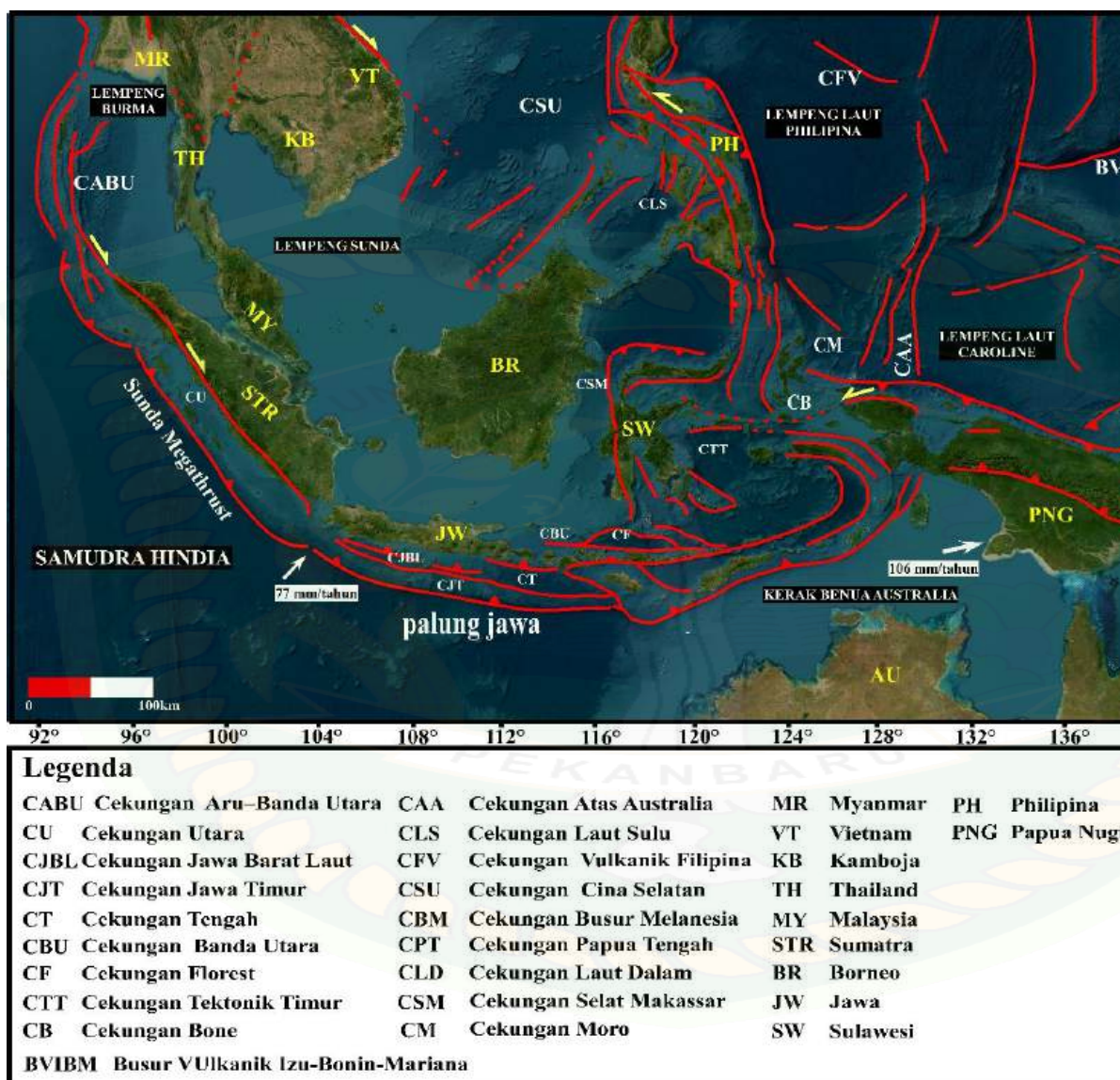
Indonesia terletak di antara pertemuan tiga lempeng besar utama yang mana pada sebelah utara berbatasan dengan Lempeng Eurasia, di sebelah timur berbatasan dengan Lempeng Pasifik dan di sebelah barat berbatasan dengan Lempeng Australia. Pertemuan ketiga lempeng besar ini mengakibatkan terbentuknya zona sesar besar yaitu Sesar Sunda *Megathrust*. Borneo sendiri terletak di pertemuan dua lempeng pada bagian barat berbatasan langsung dengan Lempeng Eurasia dan pada bagian timur laut berbatasan dengan Lempeng Filipina, kondisi ini menjadikan Borneo jauh dari zona sesar besar namun tetap mengalami proses deformasi aktif yang tidak signifikan, hal ini ditandai dengan adanya Cekungan Laut Sulu di bagian utara Borneo.

Evolusi awal Pulau Borneo terjadi pada Paleozoikum Akhir hingga Mesozoikum Awal. Pada fase ini batuan dasar Borneo terbentuk dari akresi fragmen Kontinental Gondwana melalui rangkaian proses orogenik yang intens. Terutama, batuan dasar (*basement*) di selatan dan barat Pulau ini diperkaya oleh metamorfik Paleozoikum hingga Perm-Trias, mencerminkan fase penambahan batuan selama orogen Gondwana. Bagian barat, pegmatit dan granit membentuk rangkaian Pegunungan Schwaner (130–85 Ma) menunjukkan aktivitas magmatik terkait subduksi lempeng samudera di margin selatan Borneo selama periode Kapur Akhir. Keterkaitan Borneo dengan zona subduksi dan interaksi lempeng tektonik regional Asia Tenggara dapat dilihat pada **Gambar 2.1**. Fase subduksi awal ini menghasilkan penempatan serpentinit, ofiolit, serta formasi arc granit. Contohnya, Kompleks Meratus di tenggara Borneo mencerminkan sisa-sisa zona subduksi Kapur yang berjalan hingga formasi batuan metamorf tekanan tinggi (*ophiolitic mélange*) (Breitfeld dkk., 2020).

Transisi Tengah ketika Mesozoikum–Tersier dan pembentukan *Sundaland*, pada tenggara Borneo terjadi perubahan tektonik pada Kapur Awal hingga Paleosen. Pada fase ini terjadi akresi fragment kontinental kecil seperti blok

Semitau yang bergabung dengan utara Borneo (Krisnabudhi dkk., 2022; Breitfeld dkk., 2020). Subduksi yang berlangsung selama ini menghasilkan busur vulkanik luas mencakup Borneo dan daratan sekitarnya hingga 79 Ma. Akresi ini memuncak pada peristiwa orogenik Sarawak di Eosen Akhir (~40 Ma), dimana blok daratan Laut Cina Selatan menabrak Borneo Utara, menyebabkan lipatan dan *thrusting* besar pada Formasi Rajang- Formasi Crocker. Kondisi tersebut menandai awal pembentukan punggung dan depresiasi pada kontinen, memasuki fase transisi ke cekungan *foreland* (Krisnabudhi dkk., 2022).

Pada masa Kenozoikum terbentuklah *Sabah Orogeny*, rotasi kontinen, dan erosi intensif. Sekitar Miosen Awal (~22–15 Ma), tekanan kompresi terbentuk dari tumbukan *Dangerous Grounds*/Palawan dan bukti ekstensi Laut Sulu muncul. *Sabah Orogeny* tercermin dari *uplift* regional, pengangkatan melange dan basement, hingga formasi *unconformity* basal Miosen. Selain itu, analisis paleomagnetik menunjukkan rotasi Borneo searah jarum jam sebesar 35° pada Eosen Akhir dan tambahan 10° pada Miosen Awal, sejalan pembalikan arah subduksi dan penutupan proto–Laut Cina Selatan. Periode Neogen ditandai oleh pembentukan cekungan *foreland* (Barito, Kutai, Sarawak), dengan penimbunan sedimen tebal hingga 6 km dari nilai pasca-erupsi Erosi tinggi pada iklim tropis mempercepat denudasi dan akumulasi material ke cekungan sekitarnya. Keempat fase tektonik utama pada *Southern Great Tarakan Basin* pada masa kontraksi Jura–Kapur, ekstensi Paleogen, subsiden Miosen Awal, dan kontraksi Miosen Akhir, hal ini mewakili kompleksitas deformasi yang masih berlangsung (Krisnabudhi dkk., 2022).



Gambar 2.1 Peta Tektonik Asia Tenggara Menunjukkan Interaksi Lempeng

2.2 Geologi

Dalam rangka memperoleh pemahaman yang mendalam mengenai karakteristik deformasi batuan serta mengidentifikasi zona *Brittle-Ductile Transition* (BDT), penelitian ini mengklasifikasikan tinjauan geologi ke dalam tiga bagian utama, yakni geologi regional Pulau Borneo, geologi wilayah Sabah, dan geologi lokal di daerah penelitian. Pendekatan berperingkat ini dipilih guna memastikan bahwa interpretasi terhadap dinamika geologi dan deformasi struktur dapat dilakukan secara menyeluruh, dengan mempertimbangkan pengaruh struktur geologi baik pada skala regional maupun lokal.

2.2.1 Geologi Borneo

Borneo memiliki sejarah geologi yang kompleks dan beragam, secara regional, borneo terdiri dari zona morfotektonik utama yang mencerminkan proses tektonik sejak Paleozoikum hingga Kenozoikum, termasuk pembentukan cekungan sedimen, intrusi magmatik, proses deformasi tektonik yang membentuk sesar dan lipatan serta aktivitas tektonik yang masih berlangsung hingga saat ini terutama di zona subduksi barat daya akibat interaksi Lempeng Eurasia, India-Australia dan Filipina-Pasifik (Khan, 2017).

Berdasarkan interpretasi peta geologi Borneo, wilayah ini mencerminkan variasi litologi dan sejarah geologi yang panjang dan kompleks (**Gambar 2.2**). Sedimen Kuartar ditandai dengan warna coklat tua mencakup sekitar 16% wilayah Borneo. Sebaran sedimen ini dominan di daerah pesisir dan delta-delta utama, seperti Delta Tarakan dan Delta Mahakam. Endapannya terdiri dari aluvium, sedimen pantai, dan rawa-rawa, mencerminkan lingkungan sedimentasi aktif yang masih berlangsung hingga saat ini.

Cekungan kratonik antar pegunungan ditandai dengan warna kuning meliputi 12% wilayah Borneo, cekungan ini terbentuk akibat aktivitas tektonik selama Neogen, yang memicu pengangkatan daratan dan sedimentasi fluvial-deltaik. Sementara itu, cekungan kratonik busur luar ditandai dengan oranye mencakup 16% wilayah, berkembang seiring subduksi dan pembentukan sistem *forearc* dan *backarc basin*.

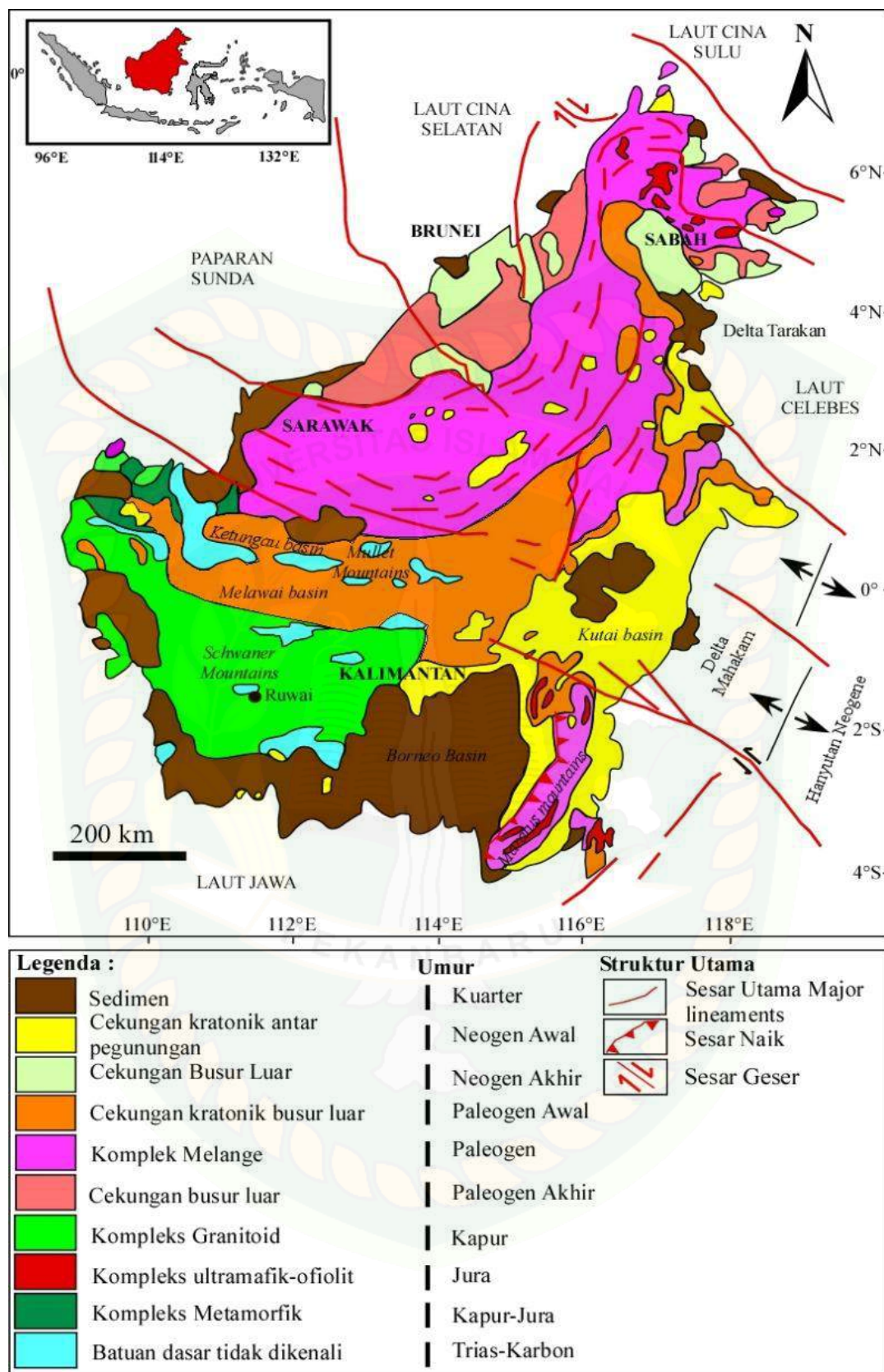
Kompleks *melange* yang di simbolkan dengan warna ungu muda mendominasi 19% wilayah, terutama di bagian tengah dan utara Borneo. Kompleks

ini terbentuk selama Paleogen sebagai hasil deformasi intensif di zona subduksi. Di sisi lain, kompleks granitoid ditandai dengan warna hijau muda seperti di Pegunungan Schwaner mencakup 15% wilayah Borneo, terbentuk akibat intrusi magma felsik terkait subduksi pada Jura-Kapur.

Batuan ultramafik-ofiolit ditandai dengan warna merah dan kompleks metamorfik yang di simbolkan dengan warna biru muda masing-masing meliputi 3% kawasan Borneo, tersebar di bagian baratdaya hingga timur Borneo. Kehadirannya menandakan aktivitas obduksi kerak samudera dan metamorfosis regional. Sementara itu, batuan dasar tidak dikenali ditandai dengan warna abu-abu berumur Trias-Karbon mencakup 4% wilayah, terutama di baratdaya Borneo, menunjukkan keterbatasan data geologi di area tersebut.

Presentase ini menggambarkan evolusi geologi Borneo yang kompleks, dari sedimentasi Kuartir hingga tektonik subduksi dan obduksi pada masa Kapur-Jura. Satuan ini mencerminkan fragmen kerak benua purba yang menjadi fondasi bagi perkembangan geologi Borneo. Litologi dari satuan ini masih belum terpetakan secara rinci, mengindikasikan keterbatasan data geologi dasar di wilayah tersebut.

Sistem sesar utama dengan orientasi baratlaut–tenggara serta timurlaut–baratdaya. Sesar ini merepresentasikan batas blok tektonik yang terbentuk akibat translasi dan rotasi lempeng sejak Mesozoikum hingga Kenozoikum (Hall, 2012). Sesar naik yang tergambar pada peta ini menampilkan pola struktur regional yang signifikan dalam mengontrol pembentukan cekungan dan pegunungan di Borneo. Secara keseluruhan peta ini menegaskan bahwa evolusi geologi Borneo sangat dipengaruhi oleh interaksi antara proses sedimentasi, magmatisme, dan tektonik yang membentuk satuan batuan dari era Paleozoikum hingga Kuartir.



Gambar 2.2 Peta Geologi Regional Borneo

Nilai kedalaman BDT Pulau Borneo bervariasi antara 3 hingga 20 km tergantung pada karakteristik satuan geologi. Pada batuan yang lebih tua dan lebih kristalin seperti batuan dasar (Trias–Karbon) dan kompleks metamorfik (Kapur–Jura), kedalaman BDT diperkirakan mencapai 14–20 km dan 12–18 km berturut-turut, (Sibson, 1977; Hacker, 1996; Handy dkk., 1999). Hal ini disebabkan oleh kekuatan mekanik batuan yang tinggi dan kestabilan tektonik relatif. Kompleks granitoid dari periode Kapur memiliki kisaran BDT sekitar 12–16 km (White dkk., 2006), sedangkan kompleks ultramafik-ofiolit dari Jura menunjukkan BDT pada kisaran 10–14 km (Nicolas dan Collette, 1990), mencerminkan komposisi mineral yang lebih tahan terhadap deformasi plastis.

Sebaliknya, satuan geologi yang lebih muda dan lebih lunak seperti cekungan sedimen Paleogen hingga Kuarter memiliki BDT yang lebih dangkal. Komplek melange Paleogen memperlihatkan BDT sekitar 8–12 km (Suppe, 1985), sedangkan cekungan kratonik dan busur luar Neogen hanya memiliki kedalaman BDT antara 5–9 km, mencerminkan batuan yang belum sepenuhnya terkonsolidasi (Allen dan Allen, 2005; Clarke dkk., 1997). Satuan sedimen Kuarter bahkan menunjukkan kedalaman BDT paling dangkal, sekitar 3–6 km, karena karakter litologinya yang lemah dan belum terlitifikasi sempurna. Rekomendasi nilai BDT Pulau Borneo dapat dilihat pada **Tabel 2.2**.

Tabel 2.2 Rekomendasi Kedalaman *Brittle-Ductile Transition* (BDT) di Pulau Borneo

Satuan Geologi	Umur	Jenis Litologi Dominan	Kedalaman BDT (Km)	Referensi
Batuan Dasar Tidak Dikenal	Trias - Karbon	Granit, Batuan Intrusif, Metamorf	14–20	Sibson (1977); Scholz (2002)
Kompleks Metamorfik	Kapur–Jura	Gneiss, schist, quartzite	12–18	Hacker (1996); Handy et al. (1999)
Kompleks Ultramafik - Ophiolit	Jura	Peridotit, gabro, basal	10–14	Nicolas & Collette (1990)
Kompleks Granitoid	Kapur	Granit, granodiorit	12–16	White et al. (2006)
Kompleks Melange	Paleogen	Campuran serpih, batupasir, ofiolit, dll	8–12	Suppe (1985); Twiss & Moores (2007)
Cekungan Kratonik Busur Luar	Paleogen Awal	Batupasir, serpih, karbonat	8–11	Allen & Allen (2005)
Cekungan Busur Luar	Paleogen Akhir	Batulempung, napal, batupasir	7–10	Van der Pluijm & Marshak (2004)
Cekungan Kratonik Antar Pegunungan	Neogen Awal	Serpih, konglomerat, batupasir	6–9	Dahlen et al. (1984)
Cekungan Busur Luar	Neogen Akhir	Sedimen klastik, batuan vulkanik muda	5–8	Clarke et al. (1997)
Sedimen Permukaan	Kuarter	Alluvium, batulempung, lempung	3–6	Allen & Allen (2005); Sibson (1977)

2.2.2 Geologi Sabah

Batuan tertua di Sabah tersingkap di bagian timur dan tenggara Sabah, terutama di sekitar Tawau dan Teluk Dravel terbentuk pada zaman Pra kapur sebanyak 5% tersebar di sebelah timur Sabah. Satuan ini terdiri atas batuan kristalin seperti granit dan gneis yang menjadi fondasi bagi satuan yang lebih muda. Satuan ini mencerminkan kerak benua awal yang mengalami deformasi sebelum sedimentasi Paleogen, (Hutchison, 2005; Tongkul, 1997). Dari interpretasi peta geologi regional Sabah (**Gambar 2.3**) dijumpai beberapa satuan batuan diantaranya:

Satuan ofiolit tersingkap secara terfragmentasi di sepanjang jalur sesar utama seperti di sekitar Lahad Datu pada zaman Eosen sebanyak 5%, tersebar di bagian tengah hingga tenggara Sabah. Komposisi utamanya terdiri dari peridotit, gabro, dan basal sebagai hasil dari obduksi kerak samudera ke atas kerak benua selama Paleosen-Eosen, (Hall, 2002; Hutchison, 2005).

Batuan sedimen yang terbentuk pada zaman Kapur - Paleogen Awal, sebanyak 20%, tersebar dibagian tengah hingga selatan Sabah. Satuan ini

mendominasi bagian timurlaut Sabah dan merupakan hasil dari sedimentasi laut dalam yang berlangsung sebelum kolisi tektonik. Umumnya terdiri dari serpih, batupasir, dan batugamping dalam lingkungan laut dalam.

Batuan sedimen yang terbentuk pada zaman Paleogen Akhir-Neogen Awal, sebanyak 20% tersebar di bagian utara dan barat. Tersingkap di wilayah tengah Sabah seperti di sekitar Telupid dan Beluran, satuan ini berisi batupasir dan serpih yang diendapkan dalam lingkungan cekungan kolisional. Endapan ini mengindikasikan tahap pasca-subduksi yang berkembang menjadi sistem *forearc basin* (Moss dan Wilson, 1998).

Olistostrom yang terbentuk pada Miosen Awal-Miosen Tengah sebanyak 10% dengan sebaran di bagian timur Sabah. Satuan ini merupakan endapan gravitasi dalam bentuk campuran sedimen dan fragmen batuan berukuran besar yang berasal dari zona akresi. Distribusi utamanya berada di jalur pusat Sabah dari Keningau ke arah Telupid.

Batuan sedimen yang terbentuk pada masa Neogen sebanyak 10% yang tersebar di bagian timur dan selatan Sabah, Endapan Neogen tersingkap luas di sepanjang bagian timur dan utara Sabah. Satuan ini terbentuk akibat proses pengangkatan dan sedimentasi fluvial serta laut dangkal. Komposisinya didominasi oleh batupasir, konglomerat, dan serpih.

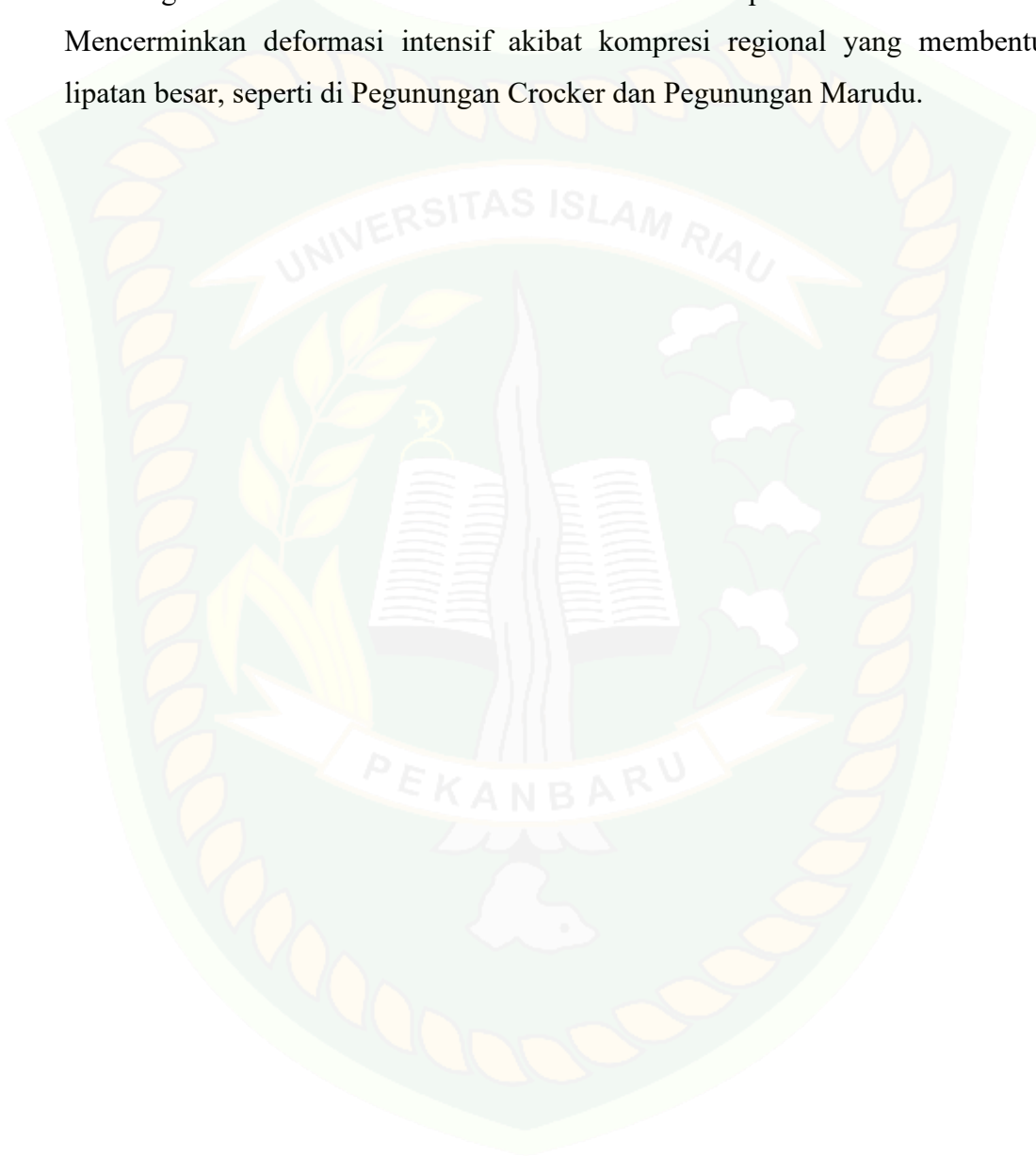
Batuan piroklastik terbentuk pada Miosen tengah sebanyak 12% tersebar di Selatan Sabah, beberapa lokasi seperti sekitar Semporna dan Teluk Dravel. Kehadiran batuan ini menandakan aktivitas vulkanik selama Miosen, yang berasosiasi dengan penipisan kerak dan pemekaran lokal (Hall, 2002; Pubellier dan Morley, 2014)

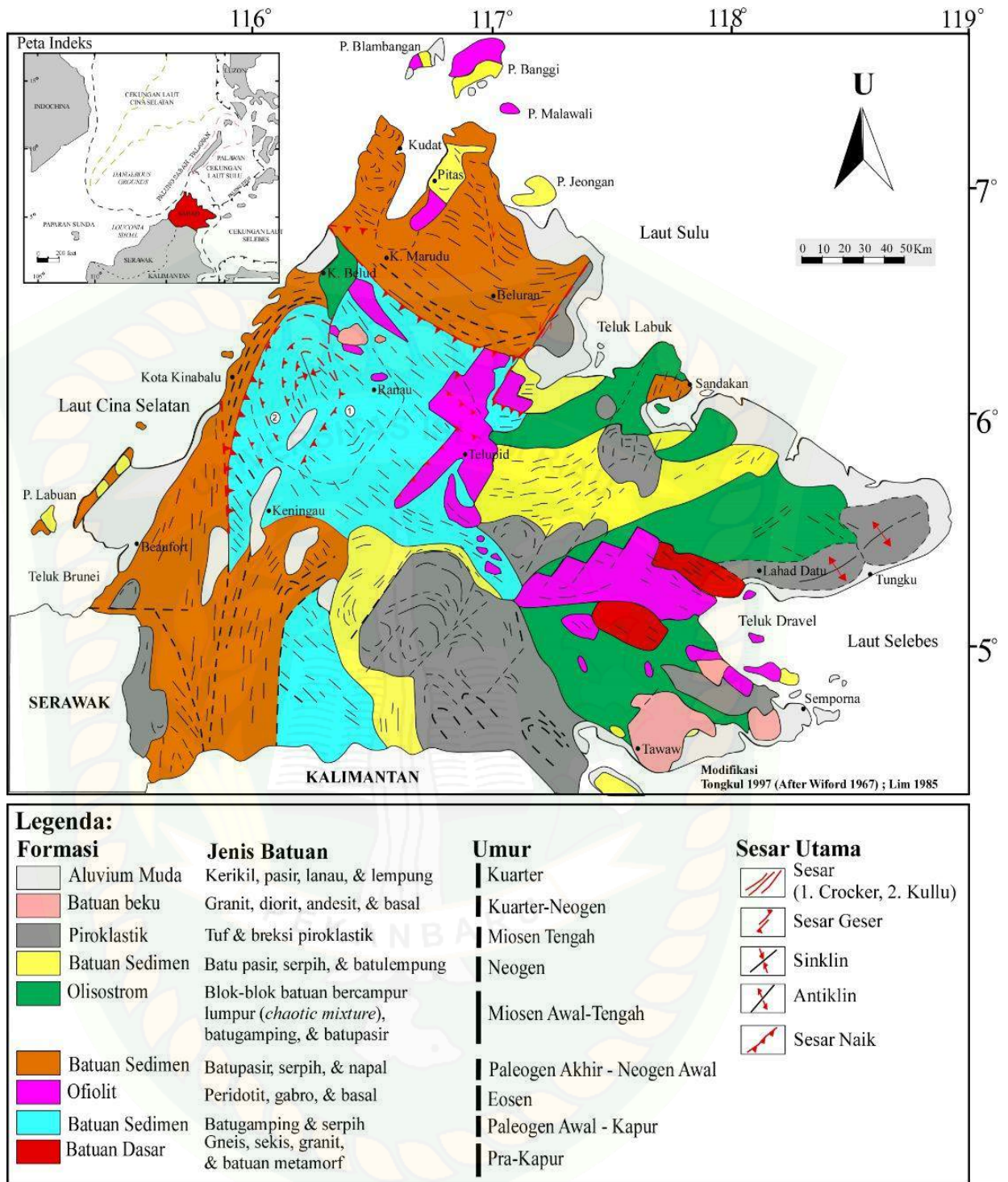
Batuan beku Kuarter yang terbentuk pada masa Neogen sebanyak 5% tersebar di tenggara Sabah. Tersingkap secara lokal, terutama di wilayah Semporna dan Labuan, satuan ini menunjukkan adanya aktivitas vulkanik dan intrusi yang berlangsung dari akhir Neogen hingga Kuarter. Termasuk di dalamnya adalah batuan basal ik dan andesitik.

Aluvium muda yang terbentuk pada masa Kuarter sebanyak 8% tersebar di seluruh pesisir Sabah. Satuan paling muda ini tersebar di dataran rendah, lembah

sungai, dan pesisir. Endapan aluvial terdiri atas pasir, lanau, dan lempung dari proses fluvial modern.

Struktur geologi Sabah juga sangat kompleks, ditandai dengan keberadaan berbagai Sesar Naik: Banyak ditemukan di sekitar kaki pegunungan dan zona kolisi. Sesar Geser yakni Sesar Crocker dan Sesar Kullu yang kemudian mengontrol arah morfologi dan distribusi batuan sedimen. Serta terdapat antiklin dan sinklin: Mencerminkan deformasi intensif akibat kompresi regional yang membentuk lipatan besar, seperti di Pegunungan Crocker dan Pegunungan Marudu.





Gambar 2.3 Peta Geologi Regional Sabah

Dari peta geologi Sabah didapati beberapa struktur geologi seperti sesar dan antiklin yang terdapat di Pegunungan Crocker dan zona Ranau - Telupid, nilai *Brittle-Ductile Transition* (BDT) memiliki korelasi yang erat dengan pembentukan struktur geologi tersebut. Penentuan nilai BDT sangat dipengaruhi oleh faktor

faktor seperti gradien geothermal, jenis litologi kerak, serta sejarah pembentukan batuan di suatu wilayah.

Bagian tenggara Sabah, seperti di wilayah Tawau dan Teluk Dravel, batuan penyusun utamanya adalah batuan kristalin Pra-Kapur sebagai batuan dasar. Batuan ini memiliki kekuatan tinggi dan tahan terhadap deformasi termal, sehingga transisi rapuh-plastisnya terjadi pada kedalaman lebih dalam, diperkirakan antara 12 hingga 18 km (Sibson, 1977; Scholz, 2002). Sementara itu, formasi ofiolit yang tersingkap di sekitar Lahad Datu, yang terdiri atas gabro, basal, dan peridotit dari zaman Eosen, menunjukkan kedalaman BDT berkisar antara 10 hingga 14 km (Nicolas dan Collette, 1990; Hacker, 1996), mengingat litologi ini umumnya bersifat kaku dan memiliki konduktivitas termal tinggi.

Formasi sedimen laut dalam dan batupasir-serpih yang berasal dari zaman Kapur hingga Paleogen Awal, seperti yang ditemukan di daerah Telupid dan Beluran, diperkirakan memiliki kedalaman BDT sekitar 8 hingga 12 km. Jenis batuan ini lebih rentan terhadap pelipatan dan deformasi pada kedalaman menengah (Handy dkk., 1999; Twiss dan Moores, 2007). Di bagian baratdaya Sabah, daerah seperti Ranau dan Keningau didominasi oleh olistostrom dari Miosen Awal hingga Tengah, yang mencerminkan lingkungan geologi kompleks dan labil. Dengan komposisi litologi yang bervariasi dan tidak terkonsolidasi penuh, zona BDT di wilayah ini cenderung lebih dangkal, sekitar 8 hingga 10 km (Suppe, 1985; Dahlen dkk., 1984).

Wilayah seperti Lahad Datu dan Semporna juga memperlihatkan kehadiran batuan vulkanik piroklastik dari Miosen Tengah, yang dikenal memiliki sifat rapuh dengan transisi *ductile* pada kedalaman 6–10 km (White dkk., 2006; Clarke dkk., 1997). Terakhir, bagian timurlaut Sabah yang tersusun atas sedimen Neogen dan endapan Kuartir seperti aluvium, terutama di daerah Sandakan dan delta pesisir, menunjukkan kedalaman BDT yang sangat dangkal, berkisar antara 4 hingga 6 km karena batuanannya bersifat lepas (*unconsolidated*) dan berumur sangat muda (Allen dan Allen, 2005; Van der Pluijm dan Marshak, 2004). Rekomendasi nilai *Brittle-Ductile Transition* Sabah ditunjukkan pada **Tabel 2.3**.

Tabel 2.3 Rekomendasi Nilai *Brittle-Ductile* Transition untuk Sabah

No	Litologi	Umur	Lokasi	Perkiraan Kedalaman BDT (Km)	Referensi
1	Basement Kristalin (Gneiss, granit)	Pra-Kapur	Tawaw, Teluk Darvel	12-18 Km	Sibson (1977), Scholz (2002)
2	Ofiolit (gabro, peridotit, basalt)	Eosen	Lahad Datu	10-14 Km	Nicolas & Collete (1990), Hacker (1996)
3	Batupasir-Serpih (Sedimen Laut Dalam)	Kapur-Paleogen awal	Telupid, Beluran	8-12 Km	Handy et al. (1999), Twiss & Mores (2007)
4	Olisostrom campuran (blok-blok besar)	Miosen Awal-Tengah	Keningau, Ranau	8-10 Km	Suppe (1985) Dahlen et al (1984)
5	Vulkanik piroklastik	Miosen Tengah	lahad Datu, Semporna	6-10 Km	White et al (2006), Clarke et al (1997)
6	Sedimen Fluvial-aluvial	Neogen-Kuarter	Dataran Pantai Timur	4-6 Km (Sangat Dangkal)	Allen & Allen (2005) Van der Puijm & Marshak (2004)

2.2.3 Geologi Daerah Penelitian

Daerah penelitian menunjukkan keragaman satuan litologi dan struktur geologi yang mencerminkan evolusi tektonik, ditunjukkan pada **Gambar 2.4**. Berdasarkan peta geologi yang dianalisis, wilayah ini didominasi oleh satuan sedimen Akhir Paleogen–Awal Neogen, yang mencakup sekitar 65% dari total area penelitian. Litologi ini berasosiasi dengan lingkungan pengendapan laut dangkal hingga deltaik, dan tersusun atas batupasir, serpih, serta batulanau, (Tongkul, 1997).

Satuan sedimen Neogen menempati sekitar 15% dari wilayah, tersebar terutama di bagian timur dan tenggara. Satuan ini mengindikasikan pengendapan pasca-tektonik, mencerminkan regresi laut dan perkembangan sistem delta dan kipas bawah laut, (Hutchison, 2005). Satuan aluvium Kuarter, yang mencakup sekitar 10% area, mendominasi bagian utara dan timurlaut, terutama di sepanjang jalur aliran sungai dan dataran banjir. Satuan ini mencerminkan proses geologi modern seperti sedimentasi fluviatil dan pelapukan aktif.

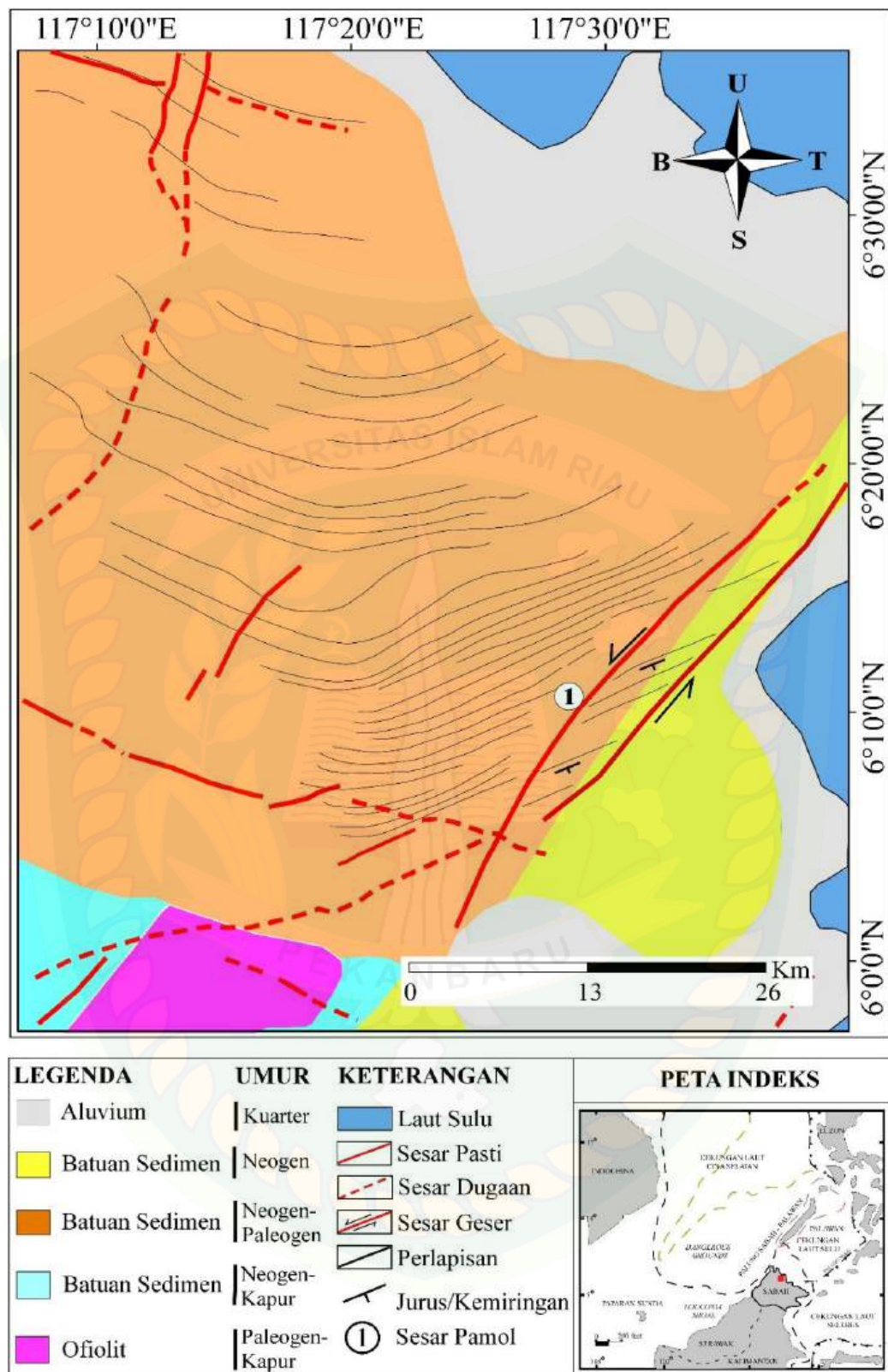
Bagian baratdaya hingga selatan, sekitar 7% dari wilayah terdiri atas sedimen Kapur–Awal Neogen, yang menunjukkan hubungan transisi dengan satuan sedimen lebih muda, dan kemungkinan berasosiasi dengan aktivitas tektonik awal di

kawasan ini. Sebaran ofiolit Kapur–Eosen, meskipun hanya sekitar 3%, terletak di bagian baratdaya. Kehadiran ofiolit ini mencerminkan fragmen kerak samudera yang terangkat selama episode obduksi dan subduksi masa lalu, menguatkan interpretasi adanya kompleks melange tektonik di kawasan ini (Hutchison, 2005; Tongkul, 1997).

Struktur geologi yang teridentifikasi di daerah ini mencakup sesar pasti dan sesar dugaan yang tersebar dominan dengan orientasi timurlaut–baratdaya (NE–SW), serta sebagian lainnya berorientasi baratlaut–tenggara (NW–SE). Arah ini konsisten dengan pola gaya utama regional yang berasosiasi dengan tumbukan mikro-lempeng di wilayah Sabah bagian timur (Hall, 2013). Selain itu, keragaman jenis sesar yang teridentifikasi mulai dari sesar geser, sesar naik, hingga sesar turun mengindikasikan bahwa deformasi yang terjadi bersifat kompleks dan berulang, melibatkan mekanisme gaya yang bervariasi.

Keberadaan Sesar Pamol, yang ditandai dengan simbol khusus pada peta, menjadi elemen struktural utama dalam kawasan ini. Sesar ini memiliki orientasi dominan timurlaut–barat daya (NE–SW) dan memperlihatkan karakteristik sebagai sesar mendatar dengan komponen gerak vertikal. Sesar Pamol diperkirakan berperan signifikan dalam pembentukan morfologi regional, termasuk pengangkatan satuan batuan tua seperti sedimen Kapur–Eosen dan Paleogen–Neogen awal, serta pengendapan tidak simetris dalam cekungan Neogen. Aktivitas tektonik sepanjang sesar ini juga tampaknya berkontribusi terhadap pembentukan zona-zona rekahan dan pelengkungan lapisan (*bedding*), sebagaimana tercermin dalam pola linimen dan arah jurus dan kemiringan (*strike-dip*) pada satuan batuan di sekitarnya.

Pola lineamen yang rumit serta orientasi struktur yang saling berpotongan semakin menguatkan bahwa wilayah ini berada dalam zona transisional aktif antara Paparan Sunda di barat dan Laut Sulu di timurlaut. Hal ini menunjukkan bahwa deformasi tektonik yang terjadi bukan merupakan hasil dari satu episode saja, melainkan akumulasi dari proses tektonik multi episode yang dipicu oleh dinamika batas mikro-lempeng di kawasan utara Borneo dan sekitarnya.



Gambar 2.4 Peta Geologi Regional Daerah Penelitian

Daerah penelitian menunjukkan keragaman litologi dan umur batuan yang mencerminkan riwayat geologi kompleks, dengan implikasi langsung terhadap kedalaman dan suhu *Brittle-Ductile Transition* (BDT). Pada satuan batuan sedimen dari Paleogen Akhir hingga Neogen Awal yang terdiri atas batupasir dan serpih, BDT diperkirakan terjadi pada kedalaman 9 hingga 12 km, dengan suhu antara 250 hingga 350 °C. Hal ini konsisten dengan nilai yang dijumpai pada batuan sedimen padat di zona tektonik aktif, (Ranalli, 1995; Sibson, 1977). Satuan sedimen berumur Neogen yang umumnya tersusun atas batupasir, batulanau, dan batulempung, memiliki transisi rapuh–plastik (BDT) yang lebih dangkal, yakni sekitar 6 hingga 9 km, pada kisaran suhu 200 hingga 300 °C (Scholz, 2002; Hall, 2013).

Satuan sedimen dari Kapur hingga Awal Neogen, yang mencakup batugamping dan batupasir yang lebih sementasi, menunjukkan kedalaman transisi yang lebih besar, yakni sekitar 10 hingga 13 km, dengan suhu antara 300 hingga 400 °C (Zoback dan Townend, 2001). Sementara itu, satuan ofiolit dari Kapur hingga Eosen yang terdiri dari batuan beku mafik seperti gabro, peridotit, dan basal menunjukkan nilai BDT tertinggi, dengan kedalaman transisi mencapai 13 hingga 18 km dan suhu berkisar antara 400 hingga 500 °C, mengingat kekuatan mekanik dan konduktivitas termal rendah dari batuan tersebut (Christensen, 1996; McKenzie, 1984). Sisi lain, endapan aluvium Kuarter yang tersusun atas material lepas seperti lempung dan pasir menunjukkan kedalaman transisi yang sangat dangkal, yakni kurang dari 5 km, dengan suhu di bawah 150 °C, (Ranalli, 1995; Sibson, 1977), sehingga cenderung mengalami deformasi rapuh pada kedalaman yang lebih dangkal. Rekomendasi nilai BDT kawasan Beluran, Sabah dapat dilihat pada **Tabel 2.4**.

Tabel 2.4 Rekomendasi Nilai *Brittle-Ductile Transition* (BDT), daerah Beluran, Sabah (modifikasi: Ranalli, 1995; Sibson, 1977).

No	Satuan Litologi	Umur	Jenis Batuan	Perkiraan Kedalaman BDT (Km)	Perkiraan Suhu BDT (°C)	Referensi
1	Sedimen Akhir Paleogen – Awal Neogen	Paleogen–Neogen	Batupasir, serpih	9–12	250–350	Ranalli (1995), Sibson (1977)
2	Sedimen Neogen	Neogen	Batupasir, lanau, lempung	6–9	200–300	Scholz (2002), Hall (2013)
3	Sedimen Kapur–Awal Neogen	Kapur–Neogen Awal	Batugamping, batupasir	10–13	300–400	Zoback & Townend (2001)
4	Ofiolit Kapur–Eosen	Kapur–Eosen	Gabro, peridotit, basalt	13–18	400–500	Christensen (1996), McKenzie (1984)
5	Aluvium Kuartar	Kuartar	Endapan lepas, lempung	<5	<150	Ranalli (1995), Sibson (1977)

2.3 Struktur Geologi

Pada sub bab ini membahas tentang definisi sesar, kehadiran sesar di Borneo dan sesar di Sabah, lipatan dan kekar.

2.3.1 Sesar

Sesar merupakan pergeseran relatif (*displacement*) dari satu blok batuan terhadap blok lain. Sesar selalu menunjukkan garis lineasi hasil dengan panjang, berukuran mulai dari beberapa sentimeter hingga puluhan kilometer. Umumnya sesar terbagi menjadi tiga diantaranya sesar mendatar, sesar naik, sesar normal (**Gambar 2.5**). Pergerakan sesar yang terdiri dari lebih satu jenis sesar dinamakan sesar oblik.

Pemetaan struktural merupakan metode utama dalam identifikasi struktur geologi serta geometri bawah permukaan secara detail (Twiss dan Moores, 2007; Fossen, 2016). Melalui pengamatan struktur geologi yang mendalam, keberadaannya dan fitur sesar seperti sesar itu sendiri, kemiringan, serta lipatannya dapat diidentifikasi secara akurat. Dalam mendeteksi dan menganalisis sesar secara efektif, pemanfaatan citra satelit menjadi metode yang sangat efektif. Citra *hillshade*, yang diperoleh dari data *Digital Elevation Model* (DEM), mampu memperlihatkan fitur-fitur topografi seperti kelurusan, patahan, dan pergeseran lapisan batuan yang sering kali sulit diidentifikasi pada citra udara biasa. Pada citra

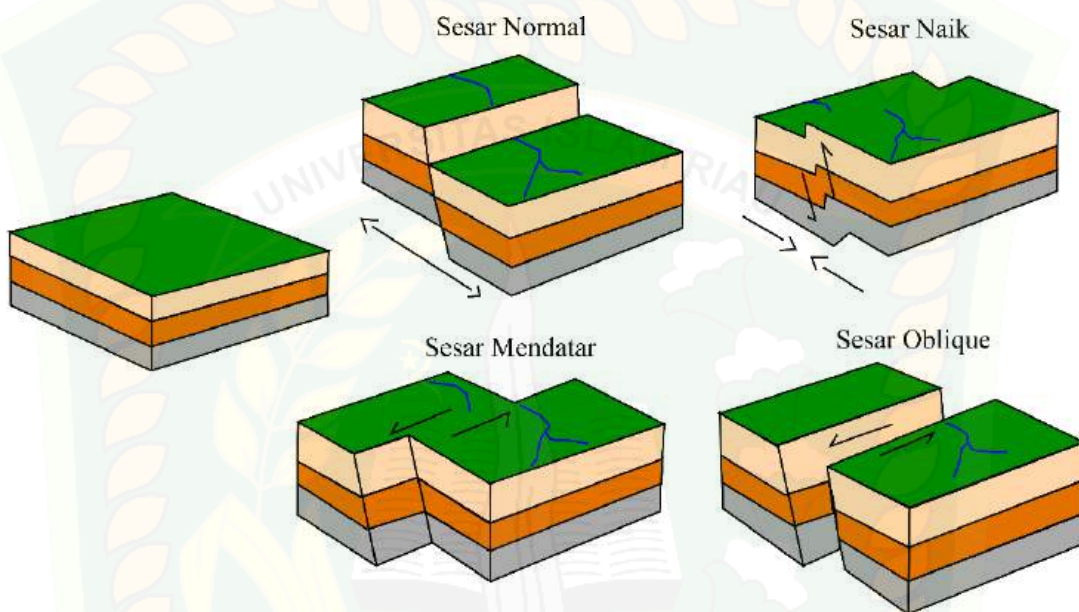
hillshade memungkinkan identifikasi struktur linier yang berpotensi merupakan sesar, terutama di wilayah dengan vegetasi rapat atau minim singkapan batuan. Pendekatan ini telah terbukti efektif dalam meningkatkan akurasi pemetaan struktur geologi di berbagai lingkungan kompleks (Carrara dkk., 1998; Blaschke, 2010).

Keberadaan sesar ditandai dengan simbol khusus, di mana garis tebal menunjukkan sesar yang telah terkonfirmasi, sedangkan garis putus-putus digunakan untuk menandai sesar yang belum atau sulit diamati secara langsung. (Twiss dan Moores, 2007). Pendekatan ini memungkinkan analisis kelurusan sesar dan membangun dalam identifikasi arah serta tipe pergerakannya. Dengan mengintegrasikan data sesar pasti dan tidak pasti, pola sesar dapat dianalisis secara lebih detail, sehingga segmen sesar yang diidentifikasi sebagai sesar tak pasti yang ditandai dengan simbol garis putus putus namun arah orientasinya sama dengan sesar utama dianggap sebagai bagian dari suatu sistem sesar, memungkinkan penamaan sesar baru sesuai dengan pedoman penamaan struktur geologi (Bennison dkk., 2011).

Dalam penelitian ini, prinsip *Rule of V's* digunakan untuk menganalisa dan memprediksi hubungan antara lapisan sedimen dan sesar, terutama pada area yang mini data permukaan dan kemiringan yang sulit diamati secara langsung. Prinsip ini mengandalkan pola “V” yang terlihat pada peta topografi sebagai indikator arah kemiringan struktur geologi, apabila ujung “V” mengarah ke hulu sungai, maka bidang tersebut dianggap miring ke arah hulu, sedangkan jika “V” mengarah ke hilir, kemiringan bidang tersebut rata-rata berlawanan dengan arah aliran sungai. Penentuan arah kemiringan sesar sangat penting untuk mengidentifikasi blok turun dan blok naik, yang selanjutnya digunakan dalam penentuan umur relatif serta klasifikasi jenis sesar. Contohnya, sesar normal biasanya memiliki kemiringan menuju blok turun, sesar naik mengarah ke blok naik, dan sesar menunjukkan kemiringan vertikal atau horizontal. Metode ini sangat efektif diterapkan pada kondisi lapangan dengan keterbatasan data dan eksposur batuan (Twiss dan Moores, 2007).

Sesar Semangko di Pulau Sumatra merupakan contoh sesar aktif yang menampilkan kombinasi sesar naik dan sesar mendatar. Sesar ini adalah sesar geser (*strike-slip fault*) dengan komponen gerak naik, sehingga tergolong sistem sesar

oblik aktif dengan dominasi pergerakan geser kanan dan sesar naik. Pola topografi di sekitar sesar, seperti kelurusan lembah dan lipatan asimetris, dapat dianalisis dengan mengintegrasikan citra *hillshade* dengan hukum “V” untuk menentukan arah kemiringan sesar serta karakter blok turun dan blok naik. Pendekatan ini membantu memetakan geometri sesar dengan akurat dan memahami dinamika yang terjadi, yang sangat penting dalam mitigasi risiko gempabumi di wilayah tektonik aktif, (Barber dkk., 2005; McCaffrey, 2009).



Gambar 2.5 Ilustrasi Sesar Normal, Sesar Naik, Sesar Mendatar dna Sesar Oblique

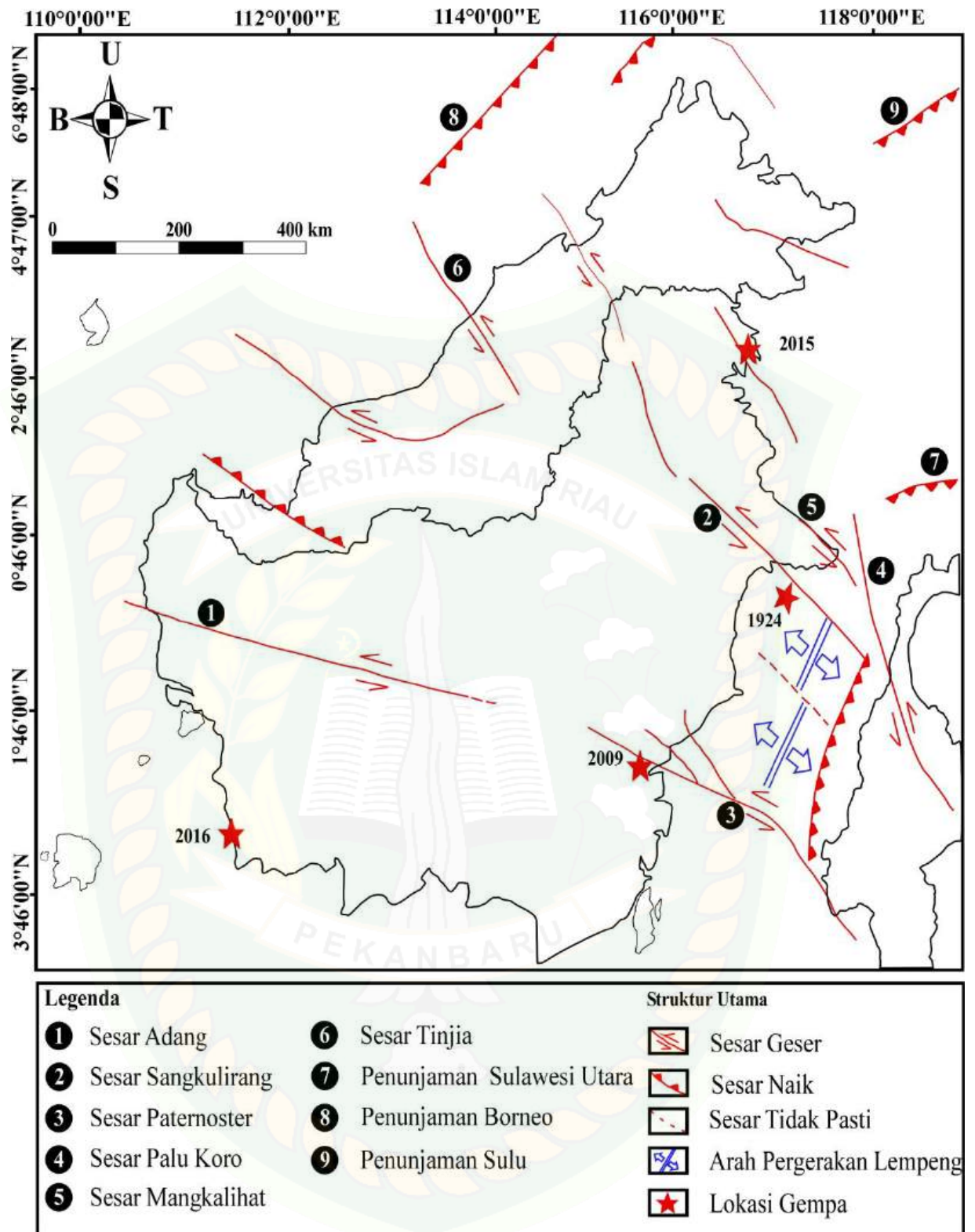
2.3.2 Sesar Borneo

Pulau Borneo menunjukkan konfigurasi struktur geologi yang kompleks dengan berbagai struktur sesar aktif yang tersebar di seluruh wilayahnya. Berdasarkan peta struktur yang dilampirkan, dapat diidentifikasi sembilan struktur utama yang terdiri atas sesar geser, sesar naik, dan zona subduksi, serta lokasi-lokasi gempa signifikan yang menjadi indikator keaktifan tektonik di wilayah ini. Sesar-sesar tersebut memiliki arah umum baratlaut–tenggara dan timurlaut–baratdaya, mencerminkan pengaruh utama gaya tektonik regional.

Beberapa sesar utama yang teridentifikasi pada peta antara lain: Sesar Adang, Sesar Sangkulirang, Sesar Patenosfer, Sesar Palu Koro, Sesar Mangkalihat, dan Sesar Tinjia, ditunjukkan pada **Gambar 2.6**. Sesar Adang di bagian baratdaya

Borneo yang mengarah baratlaut–tenggara, berasosiasi dengan aktivitas tektonik di sepanjang tepi barat Borneo. Sesar ini berkaitan dengan sumber gempa tahun 2016. Sesar Sangkulirang dan Sesar Paternoster di Borneo Timur yang berpotensi aktif, terletak dekat dengan lokasi gempa besar tahun 2009 dan 1924, mengindikasikan bahwa sesar ini masih menunjukkan deformasi tektonik aktif (Tongkul, 2017). Sesar Palu Koro yang dikenal sebagai sesar geser besar dengan arah barat–timur, meskipun sebagian besar terletak di Sulawesi, pengaruhnya menjangkau bagian timur Borneo dan berkontribusi pada deformasi kerak di Borneo Timur. Sesar Mangkalihat menunjukkan orientasi yang sejajar dengan sesar-sesar lain di kawasan timur laut Borneo dan berdekatan dengan garis subduksi Laut Sulu. Sesar Tinjia terletak di bagian tengah Borneo, dengan orientasi baratlaut–tenggara, meskipun masih memerlukan kajian lebih lanjut terkait tingkat keaktifannya.

Zona subduksi atau penunjaman mencakup Penunjaman Sulawesi Utara, Penunjaman Borneo, dan Penunjaman Sulu. Ketiganya menunjukkan adanya aktivitas konvergensi lempeng yang berkontribusi terhadap keaktifan seismik di wilayah Borneo bagian utara dan timur. Lokasi gempa yang ditandai dengan simbol bintang merah—terjadi pada tahun 1924, 2009, 2015, dan 2016 menegaskan adanya hubungan spasial yang erat antara sesar-sesar ini dengan aktivitas seismik kontemporer.



Gambar 2.6 Peta Menunjukkan Sesar Aktif Pulau Borneo

Pulau Borneo merupakan kawasan yang secara tektonik kompleks, memperlihatkan berbagai pola deformasi struktural akibat interaksi lempeng yang telah berlangsung sejak Kala Mesozoikum hingga saat ini. Berdasarkan peta lineamen dan sesar yang terlampir, dapat diidentifikasi adanya berbagai struktur geologi signifikan yang meliputi sesar utama, lipatan, serta pola oroklin dan cekungan, yang mengindikasikan dinamika tektonik yang aktif dan beragam. Sejumlah sesar utama yang tersebar di seluruh wilayah Borneo, dengan orientasi dominan baratlaut–tenggara dan timurlaut–baratdaya, ditunjukkan pada peta struktur geologi dan liniamen (**Gambar 2.7**) diantaranya Sesar Pulau Borneo, Sesar Tutoh, Sesar Belait, Cekungan Teluk Brunei, rangkaian oroklin, dan lipatan.

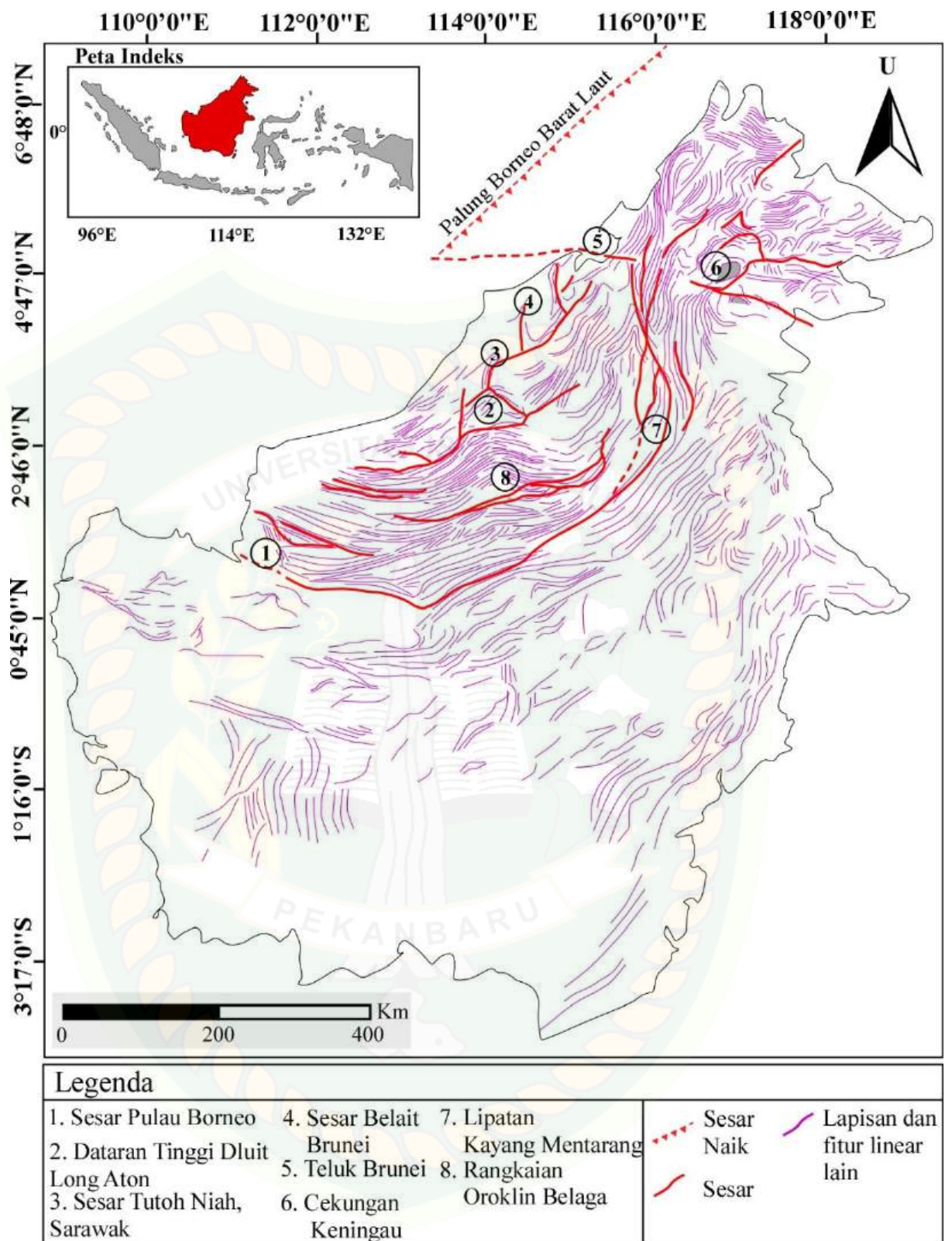
Sesar Pulau Borneo merupakan sesar utama dengan orientasi panjang yang membentang dari baratdaya ke timur laut pulau. Sesar ini menjadi batas struktural penting yang kemungkinan besar berperan sebagai zona pelemahan kerak dan memengaruhi perkembangan cekungan serta lipatan di sekitarnya (Hall dkk., 2008). Sesar Tutoh dan Sesar Belait terletak di wilayah baratlaut, berasosiasi erat dengan pembentukan Cekungan Teluk Brunei dan daerah lipatan intensif. Sesar-sesar ini menunjukkan karakter sesar naik akibat gaya kompresi yang berasal dari arah tenggara, berkontribusi terhadap terbentuknya jalur lipatan dan zona orogenik. Rangkaian Oroklin dan Lipatan akibat Kompresi tersebar luas di bagian barat dan tengah Borneo, menunjukkan adanya deformasi plastis akibat tekanan tektonik regional. Pola lipatan ini berkorelasi dengan keberadaan fitur-fitur linear (*lineament*) yang teramati di peta, menggambarkan proses *shortening* yang terjadi secara berulang dalam sejarah geologis kawasan ini (Morley dkk., 2011).

Lineamen berwarna ungu dalam peta menunjukkan keberadaan lapisan batuan dan fitur linear lainnya, yang mencerminkan arah tegasan regional dan kemungkinan eksistensi sesar minor atau foliasi yang belum terpetakan secara detail. Distribusi lineamen sangat padat di bagian tengah hingga baratdaya Borneo, berasosiasi erat dengan keberadaan sesar naik dan rangkaian oroklin. Selain itu, keberadaan Palung Borneo baratlaut yang digambarkan sebagai zona sesar naik juga menjadi penanda batas antara kerak samudera dan kerak benua yang mengalami subduksi atau tumbukan mikro-lempeng di masa lalu. Fitur ini menjadi elemen penting dalam menafsirkan sejarah tektonik Sabah dan Borneo Utara, yang

kini diketahui memiliki aktivitas neotektonik, (Tongkul, 2017). Struktur geologi utama dan lineamen di Pulau Borneo, ditunjukkan pada **Tabel 2.5**.

Secara keseluruhan, pola struktur geologi Borneo menunjukkan bahwa wilayah ini mengalami tekanan tektonik yang kompleks, melibatkan mekanisme kompresi, pelipatan, dan sesar naik yang saling berinteraksi. Hal ini mendukung interpretasi bahwa Borneo merupakan bagian aktif dari margin Lempeng Eurasia, dengan sejarah tektonik yang terus berkembang sejak masa Kapur hingga kini.





Gambar 2.7 Peta Struktur Geologi Dan Lineamen Pulau Borneo

Tabel 2.5 Struktur Geologi Utama di Pulau Borneo Berdasarkan Peta Liniamen dan Sesar

No.	Nama Fitur Geologi	Jenis Fitur	Keterangan Tambahan
1	Sesar Pulau Borneo	Sesar	Memanjang hampir vertikal dari utara ke selatan.
2	Dataran Tinggi Dliut	Struktur Geomorfik	Terletak di barat laut Kalimantan.
3	Sesar Tutoh	Sesar	Berarah barat daya –timur laut.
4	Sesar Belait	Sesar	Dekat dengan pantai utara Kalimantan Timur.
5	Teluk Brunei	Teluk	Area pesisir bagian utara.
6	Cekungan	Struktur Cekungan	Banyak tersebar di bagian tengah–selatan.
7	Lipatan Akibat Kompresi	Lipatan	Berasosiasi dengan sesar naik.
8	Rangkaian Oroklin	Struktur Lipatan	Merupakan hasil deformasi tektonik besar.

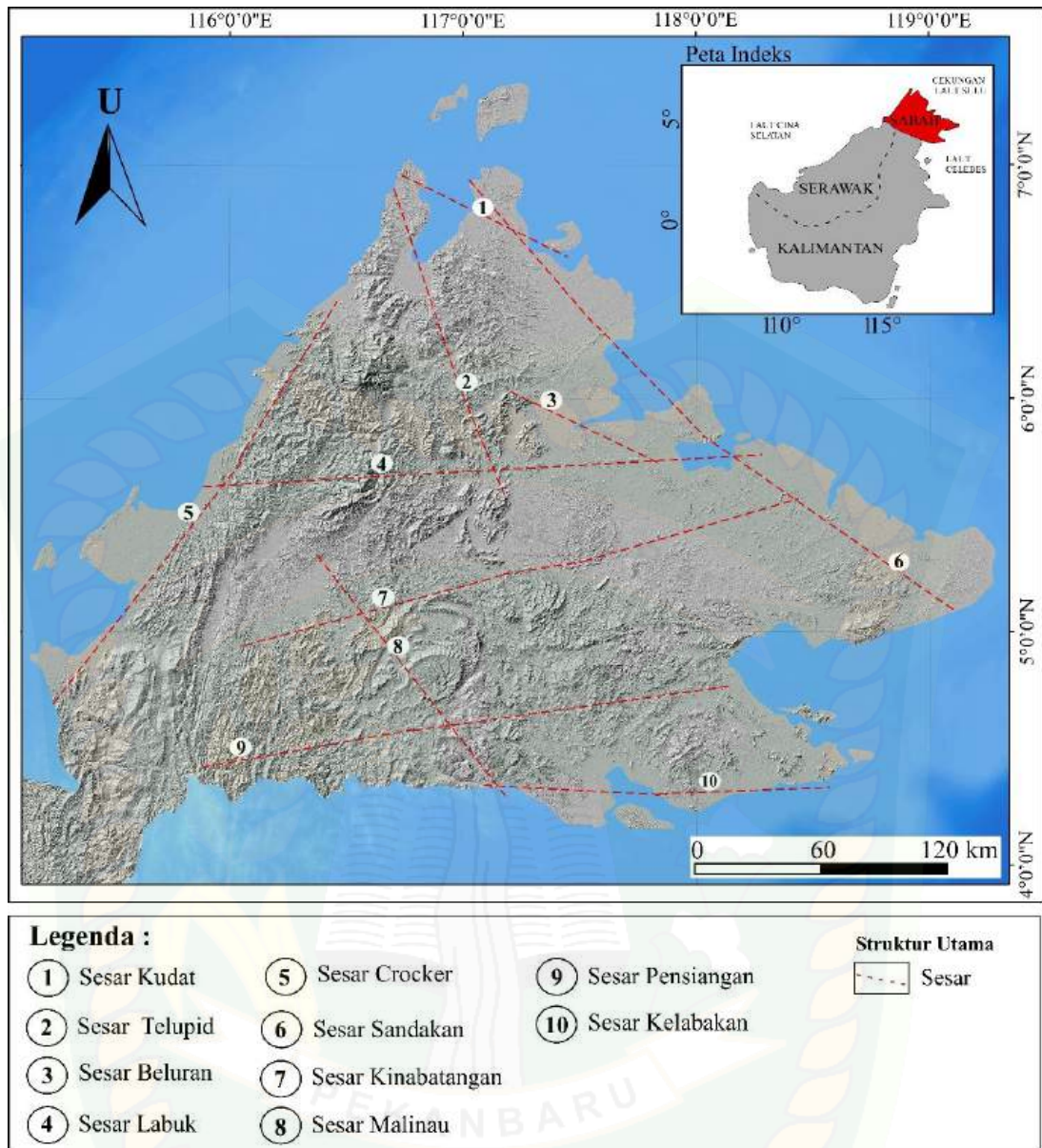
2.3.3 Sesar Sabah

Terdapat sepuluh sesar utama yang tersebar dari utara hingga selatan Sabah, menggambarkan sistem sesar yang beragam dengan orientasi dan peran tektonik yang berbeda-beda yakni Sesar Kudat, Sesar Telupid, Sesar Beluran, Sesar Labuk, Sesar Crocker, Sesar Sandakan, Sesar Kinabatangan, Sesar Malinau, Sesar Pensiangan dan Sesar Kelabakan. Peta yang menunjukkan sesar aktif Sabah ditunjukkan pada **Gambar 2.8**.

Sesar Kudat berada di bagian paling utara Sabah, memanjang dari pesisir barat ke arah timurlaut. Sesar ini berasosiasi dengan zona tektonik aktif di sekitar Cekungan Kudat yang dipengaruhi oleh gaya kompresi dari arah timurlaut, (Tongkul, 2017). Sesar Telupid dan Sesar Beluran terletak di bagian tengah utara Sabah, berorientasi baratlaut–tenggara dan diduga sebagai bagian dari sistem sesar

geser yang menjadi jalur pelemahan struktural regional. Kedua sesar ini kemungkinan berperan dalam pembentukan Cekungan Labuk dan deformasi batuan Neogen. Sesar Labuk memanjang dari daerah pegunungan menuju cekungan pesisir utara, menjadi batas penting antara struktur tektonik Crocker dan bagian timur Sabah. Sesar Crocker merupakan sesar utama yang berkembang di sepanjang Pegunungan Crocker. Sesar ini memiliki karakter sesar naik dan sesar geser dengan komponen oblique, yang sangat aktif sejak zaman Kuartar dan menjadi sumber utama deformasi regional di barat Sabah (Tongkul, 2017; Hutchison, 2005). Sesar Sandakan terletak di pantai timur Sabah dan mengontrol pembentukan Formasi Sandakan. Sesar ini diduga aktif selama masa Neogen dan berperan dalam pembentukan struktur patahan dan kemiringan blok sedimen ke arah laut. Sesar Kinabatangan dan Sesar Malinau terletak di wilayah tengah dan tenggara Sabah. Kedua sesar ini sejajar dan kemungkinan saling berhubungan secara struktural. Orientasi keduanya mencerminkan respon terhadap tegasan dari arah barat laut akibat penekanan antara Lempeng Eurasia dan Laut Sulu. Sesar Pensiangan dan Sesar Kelabakan berada di bagian selatan Sabah, menandai batas antara zona Crocker dan kawasan batuan dasar Paleozoik. Sesar Kelabakan memiliki orientasi barat laut–tenggara dan merupakan sesar geser yang penting dalam dinamika tektonik Sabah bagian selatan.

Distribusi sesar-sesar ini menggambarkan adanya sistem deformasi regional yang kompleks, dengan pola sesar dominan berorientasi barat laut-tenggara dan timur Laut-Barat Daya. Keberadaan sesar-sesar ini juga berkaitan erat dengan aktivitas kegempaan yang telah tercatat di Sabah, seperti gempa Ranau 2015 yang merupakan bukti nyata bahwa kawasan ini masih aktif secara seismik.



Gambar 2.8 Peta Menunjukkan Beberapa Sesar Aktif di Sabah

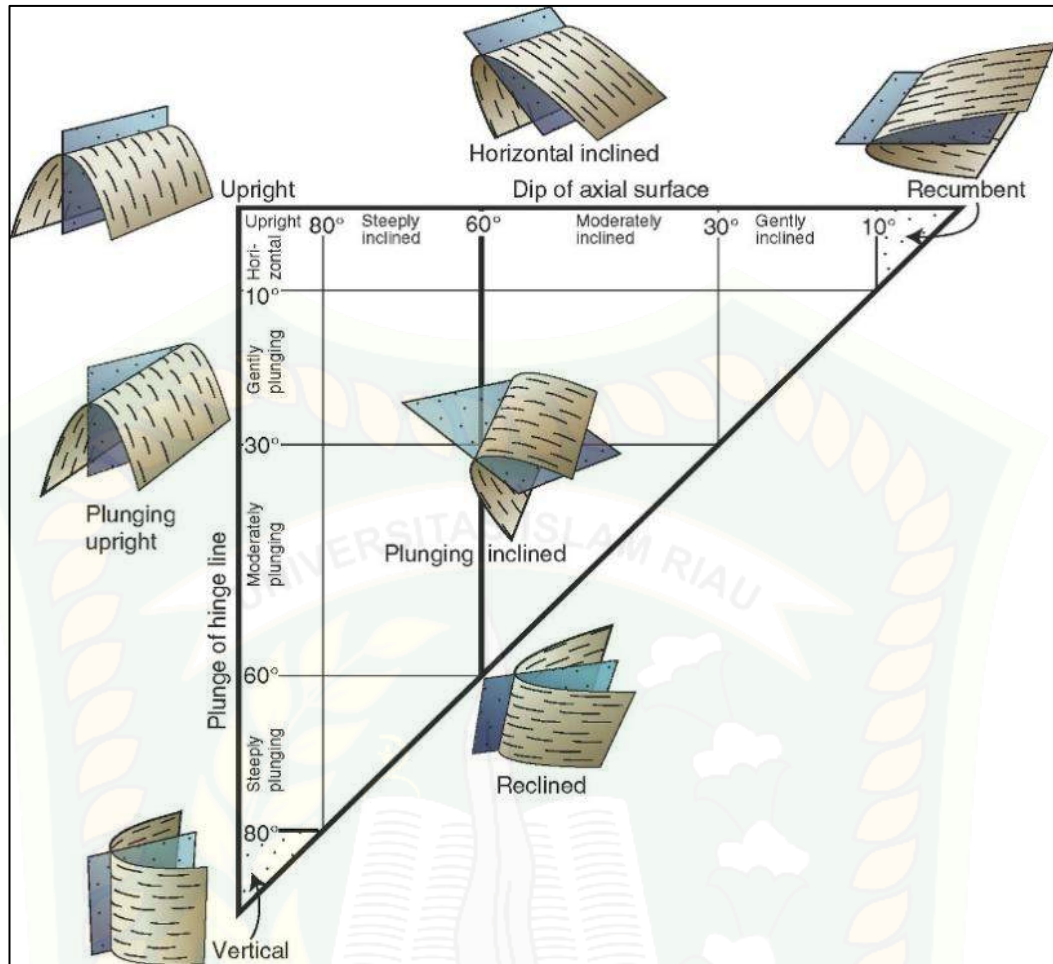
2.3.4 Lipatan

Lipatan merupakan struktur geologi berupa deformasi lapisan batuan yang membentuk lengkungan akibat gaya tektonik kompresional, (Ramsay dan Huber, 1987). Struktur ini terbentuk ketika batuan mengalami tekanan yang melebihi kekuatan rigiditasnya namun masih dalam kondisi daktil (*ductile*), (Fossen, 2016). Lipatan terdiri dari beberapa elemen utama, yaitu *hinge* (bagian paling melengkung), *limb* (bagian relatif lurus di antara *hinge*), dan *axial plane* (bidang imajiner yang membagi lipatan secara simetris), (Davis dan Reynolds, 1996).

Lipatan diklasifikasikan menjadi empat jenis utama: simetris, asimetris, isoklinal, dan rebah (berbaring). Lipatan simetris ditandai oleh sumbu lipatan yang tegak lurus terhadap bidang lapisan. Ukuran lipatan ini bervariasi dari sentimeter (cm) hingga kilometer (km), dengan sudut bukaan antar sayap berkisar antara 30° – 60° atau kurang. Ciri khas dari jenis ini adalah sayap planar yang simetris dan engsel yang tajam. Lipatan asimetris memiliki sumbu lipatan yang miring terhadap bidang lapisan. Ukuran lipatannya berkisar dari centimeter hingga ratusan meter, (Fleuty, 1964 dan sudut bukaan antar sayap mirip dengan lipatan simetris, yaitu 30° – 60° atau kurang. Keunikan lipatan ini terletak pada bentuk sayap yang asimetris dan sudut lipatan yang tetap tajam. Lipatan isoklinal, sumbu lipatannya sejajar atau hampir sejajar dengan bidang lapisan, menunjukkan deformasi yang lebih intens. Ukuran lipatan ini dapat mencapai puluhan meter hingga kilometer. Sudut bukaan antar sayap sangat kecil, biasanya kurang dari 30° . Ciri utama lipatan ini adalah sayap yang sejajar, bidang planar, dan sudut lipatan yang sangat tajam, (Fleuty, 1964). Klasifikasi lipatan berdasarkan *interlimb angle* ditunjukkan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Klasifikasi Lipatan berdasarkan *interlimb angle* (Fleuty, 1964)

Interlimb Angle	Description of Fold
180° - 120°	Gentle
120° - 70°	Open
70° - 30°	Close
30° - 0°	Tight
0°	Isoclinal
Negative Angle	Mushroom



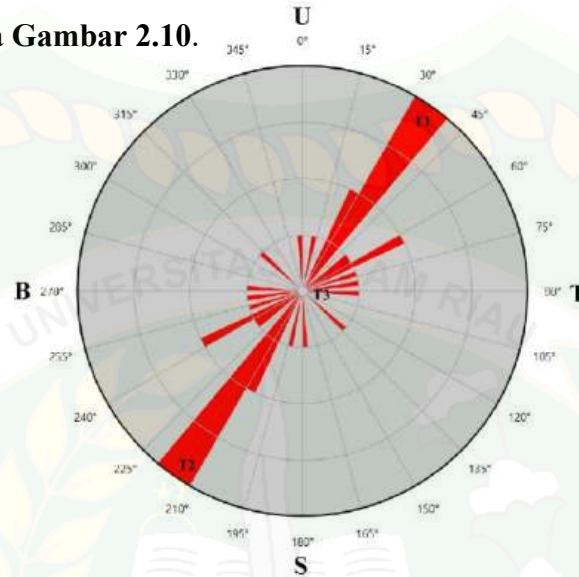
Gambar 2.9 Klasifikasi Penamaan Lipatan (Fleuty, 1964)

2.3.5 Kekar

Salah satu mekanisme utama pembentukan kekar (*fractures*) dalam batuan adalah aktivitas sesar (*faulting*), yang memicu tegasan diferensial tinggi dan distribusi tegasan tidak seragam di sekitarnya. Saat sesar mengalami pergerakan, zona di sekitarnya akan mengalami deformasi yang menghasilkan kekar dalam berbagai arah dan orientasi, yang bisa dianalisis secara statistik dan struktural menggunakan diagram rose dan model *Riedel shear* (van der Pluijm dan Marshak, 2001; Sylvester, 1988; Fossen, 2010).

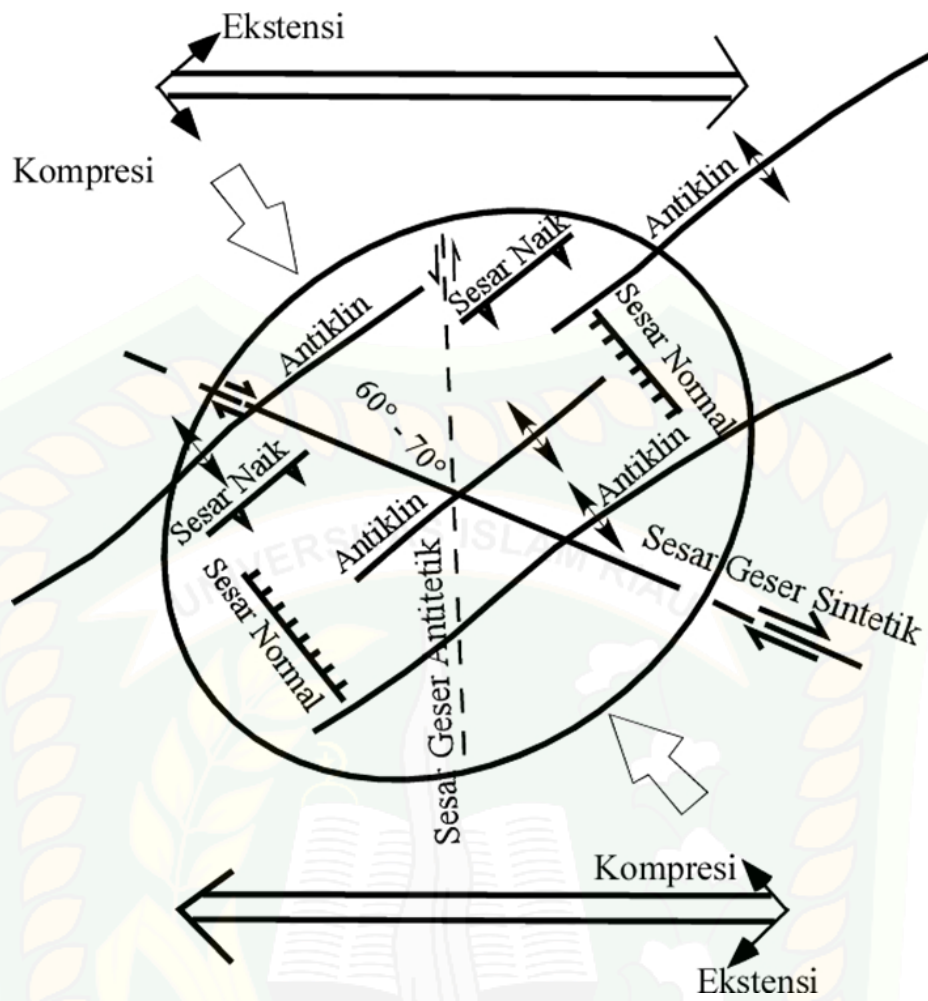
Diagram mawar (*diagram rose*) adalah representasi grafik yang menggambarkan frekuensi orientasi kekar berdasarkan arah azimuth. Alat ini digunakan untuk mengidentifikasi pola dominan orientasi kekar dalam suatu area, yang biasanya berasosiasi dengan sistem tegasan regional atau lokal. Fungsi diagram ini adalah mendeteksi arah dominan kekar (set kekar utama dan sekunder).

Interpretasi diagram ini jika terdapat dua atau lebih puncak dominan, maka dapat diasumsikan terjadi beberapa episode deformasi atau adanya medan tegasan kompleks. Aplikasi dalam zona sesar, kekar yang berkembang di dekat sesar biasanya akan sejajar, tegak lurus, atau miring terhadap arah sesar, tergantung pada gaya utama (σ_1), menengah (σ_2), dan minimum (σ_3). Analisis diagram rose ditunjukkan pada **Gambar 2.10**.

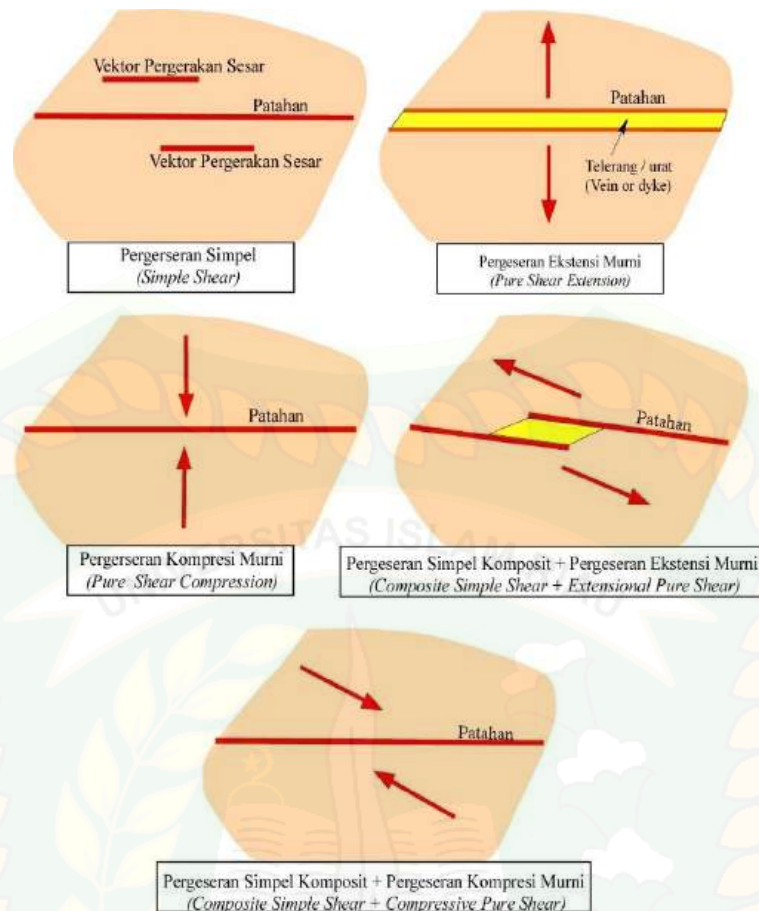


Gambar 2.10 Contoh Analisis Diagram *Rose* dengan nilai T1 37°, T2 217° dan T3 15°

Analisis *riedel shear* menjelaskan bagaimana kekar dan sesar-sesar kecil berkembang dalam zona geser (*shear zone*) sebagai respons terhadap deformasi brittle. Dalam sistem ini, berbagai set kekar atau sesar kecil terbentuk dengan sudut karakteristik terhadap arah geser utama. R (*Riedel shear*): terbentuk sekitar 15° terhadap arah geser utama (shear direction), biasanya sejajar dengan arah pergerakan. R' (*anti-Riedel*) terbentuk sekitar 75° terhadap arah geser utama. P-*shear* terbentuk pada sudut sekitar 10° dalam arah yang sama dengan pergerakan sesar utama, dan biasanya menjadi konektor antara R dan R'. Y-*shear* sejajar dengan sesar utama, sering kali berkembang menjadi sesar utama itu sendiri (Riedl, 1929). Analisis Kekar Menggunakan *Strain Ellipsoid Riedel Shear* dapat dilihat pada **Gambar 2.11**.



Gambar 2.11 Analisis Kekar Menggunakan *Strain Ellipsoid Riedel Shear*



Gambar 2.12 Analisis Kekar Menggunakan *Strain Ellipsoid Riedel Shear*

2.4 Geomorfologi Tektonik

Pemetaan geomorfologi tektonik merupakan metode pendekatan awal untuk memberikan bukti terhadap interaksi lempeng litosfer yang bergerak telah mengubah bentang alam menjadi beberapa fitur geomorfologi tektonik, (Agastya, 2022). Beberapa contoh fitur geomorfologi tektonik yang menunjukkan adanya deformasi diantaranya seperti pemberhentian sesar (*topographic break*), teras sungai muda (*young river terrace*), lembah (*valey*), ngarai (*canyon*), bukit segitiga (*triangular facet*) dan punggung (*ridge*), (Rao dkk, 2017). Metode pendekatan tektonik geomorfik ini merupakan cara yang jitu untuk menentukan pergerakan sesar yang berpotensi menyebabkan gempabumi, terutama untuk penentuan segmen sesar yang telah terkubur oleh sedimen aluvium muda, yang mengubur sesar ke bawah sub permukaan, (Shah, 2015; Lin dkk, 2013; Volkanou dkk, 2024; Quigley dkk, 2010). Kemampuan menggunakan perangkat lunak yang relevan dan

ketersediaan citra satelit beresolusi tinggi *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) 30 m diaplikasikan dalam penelitian ini.

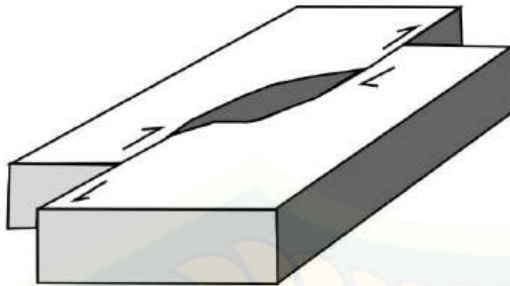
2.4.1 Lembah (*Valley*)

Lembah merupakan bentang alam memanjang yang memiliki ketinggian lebih rendah dibandingkan daerah sekitarnya dan sering kali dialiri oleh sungai; Dalam konteks struktur geologi, lembah yang terbentuk akibat aktivitas sesar dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis seperti *releasing bend*, *fault termination*, *pull-apart basin*, dan *fault branch* dapat dilihat pada **Gambar 2.13**.

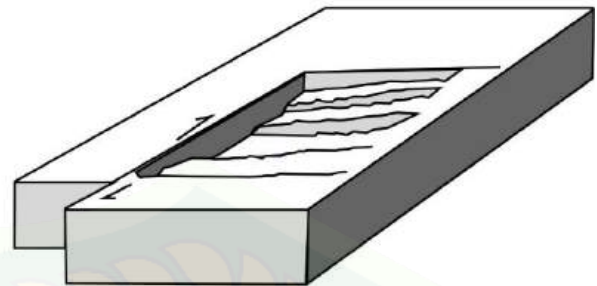
1. *Releasing bend* terbentuk pada tikungan sesar mendatar yang menyebabkan regangan lokal hingga membentuk cekungan akibat pelepasan tekanan di zona tersebut.
2. *Fault Termination* umumnya muncul di ujung sesar yang berakhir secara tiba tiba sehingga menyebabkan penurunan blok batuan secara lokal.
3. *Pull - apart basin* terbentuk pada segmen sesar mendatar yang mengalami tarikan hingga menyebabkan penurunan blok batuan di antara dua segmen sesar yang bergerak saling menjauh. Sedangkan
4. *Fault branch* merupakan cabang sesar yang berkembang dari sesar utama dan membentuk lembah akibat pergerakan relatif yang berbeda pada cabang tersebut.

Lembah-lembah ini mencerminkan adanya penghentian tektonik dan aktivitas sesar yang masih aktif, sehingga fungsinya sangat penting dalam mengidentifikasi dan memetakan sesar, karena morfologi lembah ini memberikan indikasi posisi, jenis, dan mekanisme pergerakan sesar yang mendasarinya, serta membantu dalam menilai potensi risiko geologi seperti gempa bumi dan penurunan tanah, (Sylvester, 1988).

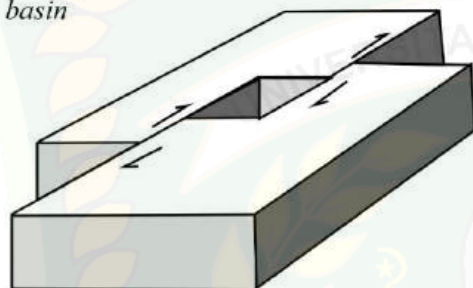
Basin formed at releasing bend



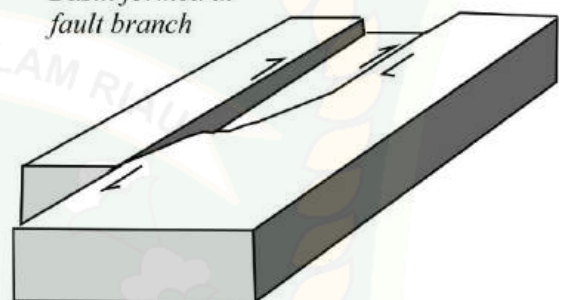
Basin formed at fault termination



Pull-apart basin



Basin formed at fault branch



Gambar 2.13 Ilustrasi *releasing bend*, *fault termination*, *pull-apart basin*, dan *fault branch*.

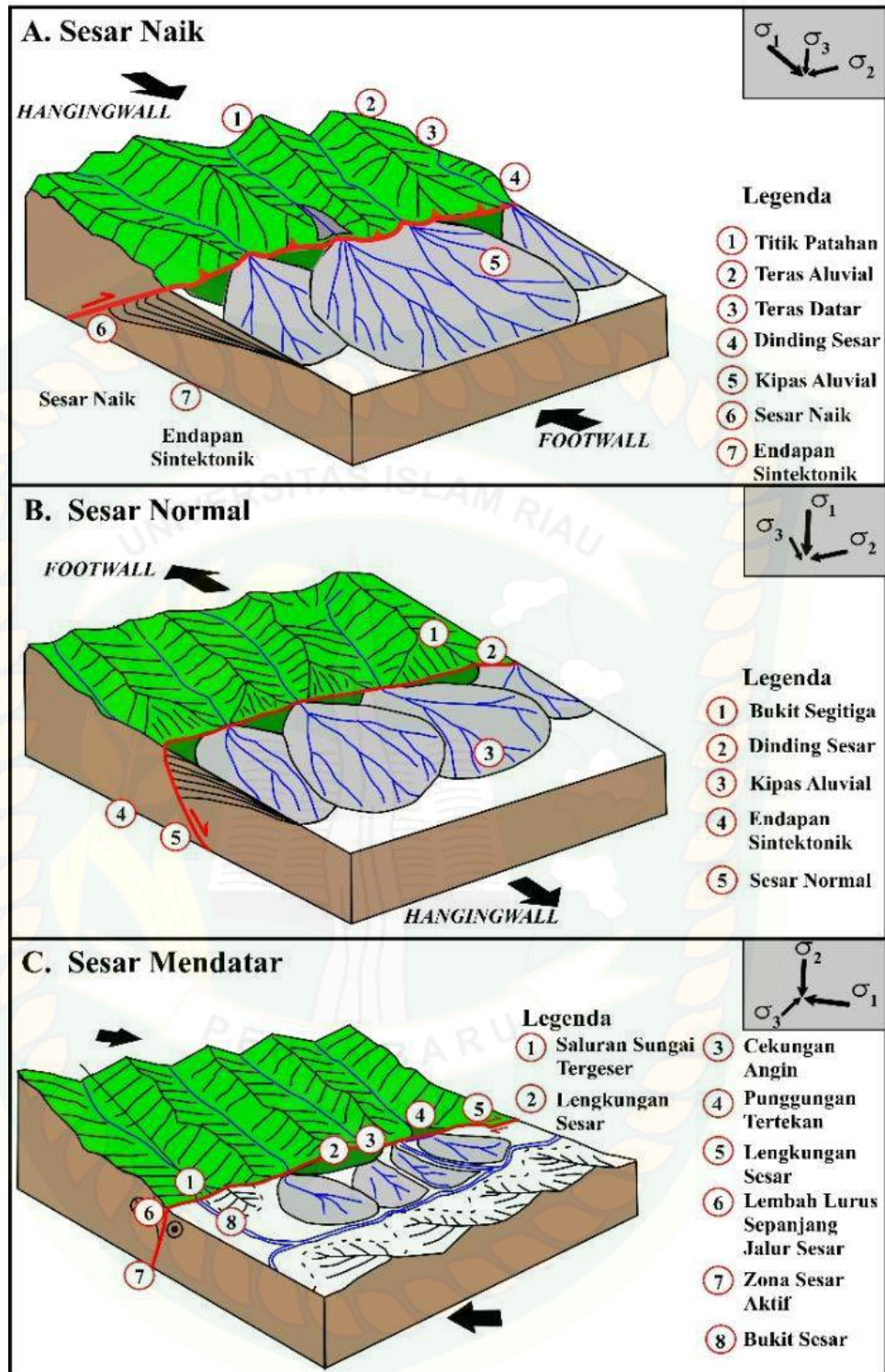
2.4.2 Bukit Segitiga (*Triangular Facet*)

Bukit Segitiga merupakan morfologi khas yang terbentuk sebagai hasil interaksi proses tektonik dan eksogen, khususnya pada jalur sesar normal, yang mengakibatkan munculnya dan penurunan blok-blok batuan di sepanjang sesar, ditunjukkan pada **Gambar 2.14**. Proses pembentukannya diawali dengan pergerakan sesar yang menghasilkan bidang miring dan garis gerus pada permukaan batuan (Hovius dan Meunier, 2010). Garis gerus ini kemudian menjadi saluran aliran air yang mengerosi batuan di sekitarnya, membentuk pola aliran segitiga yang khas (Bishop, 2007). Erosi yang terus-menerus memperjelas morfologi segi segitiga pada citra topografi *hillshade*, di mana kemiringan lereng yang curam sering mengindikasikan sesar aktif, sedangkan kemiringan yang lebih landai dapat menunjukkan sesar tidak aktif (Meyer dan Hilley, 2009; Davis dan Hutton, 1989).

Korelasi erat antara bukit segitiga dengan keberadaan sesar menjadikan bentuk lahan ini indikator penting dalam pemetaan struktur geologi aktif. Analisis

sudut kemiringan segi segitiga melalui citra *hillshade* dari data topografi menjadi alat krusial dalam identifikasi aktivitas sesar dan mendukung mitigasi bencana geologi, terutama di wilayah dengan kondisi tektonik kompleks seperti Indonesia maupun Sabah, Malaysia, yang memiliki potensi rawan bencana akibat aktivitas sesar dan proses subduksi (Schumm, 1977). Dengan demikian, pemetaan segi segitiga tidak hanya memperkuat pemahaman tentang dinamika sesar tetapi juga berperan dalam strategi pengelolaan risiko bencana geologi.



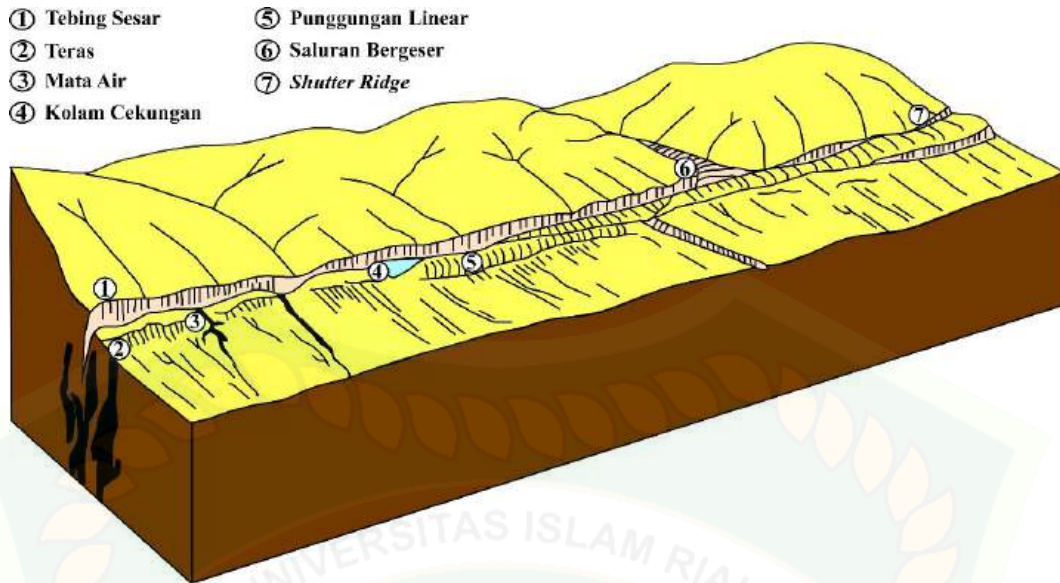


Gambar 2.14 Ilustrasi Morfologi Bukit Segitiga / *Triangular Facet*

2.4.3 Punggungan (*Ridge*)

Punggungan merupakan fitur geomorfologi yang terdiri dari rangkaian gunung atau bukit dengan puncak yang berkesinambungan dalam suatu wilayah tertentu, (Azzaman dkk., 2017; Kundanurdoro, 2011; Valente dkk., 2019), ditunjukkan pada **Gambar 2.15**. Terbentuknya punggungan erat kaitannya dengan dinamika pergerakan lempeng tektonik, baik pada zona konvergen, divergen, maupun *transform*.

Dalam konteks tektonik sesar, orientasi punggungan memberikan informasi penting mengenai medan tegasan yang bekerja di bawah permukaan batuan. Punggungan yang terbentuk tegak lurus terhadap jalur sesar biasanya merupakan hasil dari kompresi tegas yang mengakibatkan pengangkatan blok batuan vertikal atau pembentukan struktur antiklin, sehingga mencerminkan arah tegasan maksimum (σ_1) yang mengarah tegak lurus terhadap sesar (Keller dan Pinter, 2002; Burbank dan Anderson, 2013). Sebaliknya, punggungan yang sejajar dengan jalur sesar sering kali muncul akibat sinyal geser mendatar (*strike-slip*), di mana tekanan lateral membentuk fitur linier seperti *pressure ridge* atau *shutter ridge* yang sejajar dengan arah pergerakan sesar, mencerminkan arah tegasan utama horizontal (σ_1 atau σ_3), (Sylvester, 1988; Burbank dan Anderson, 2013). Selain itu, karakteristik punggungan juga dipengaruhi oleh sifat mekanik batuan di zona sesar, yang dapat bersifat rapuh maupun plastis, sehingga orientasi punggungan dapat menyesuaikan dengan kondisi tersebut. Dengan demikian, analisis pola dan orientasi punggungan relatif terhadap jalur sesar menjadi alat penting untuk menginterpretasikan jenis dan arah pergerakan sesar serta memahami medan tegasan regional secara lebih mendalam.



Gambar 2.15 Ilustrasi Fitur Punggungan (*Ridge*)

2.4.4 Focal Mechanism Solution

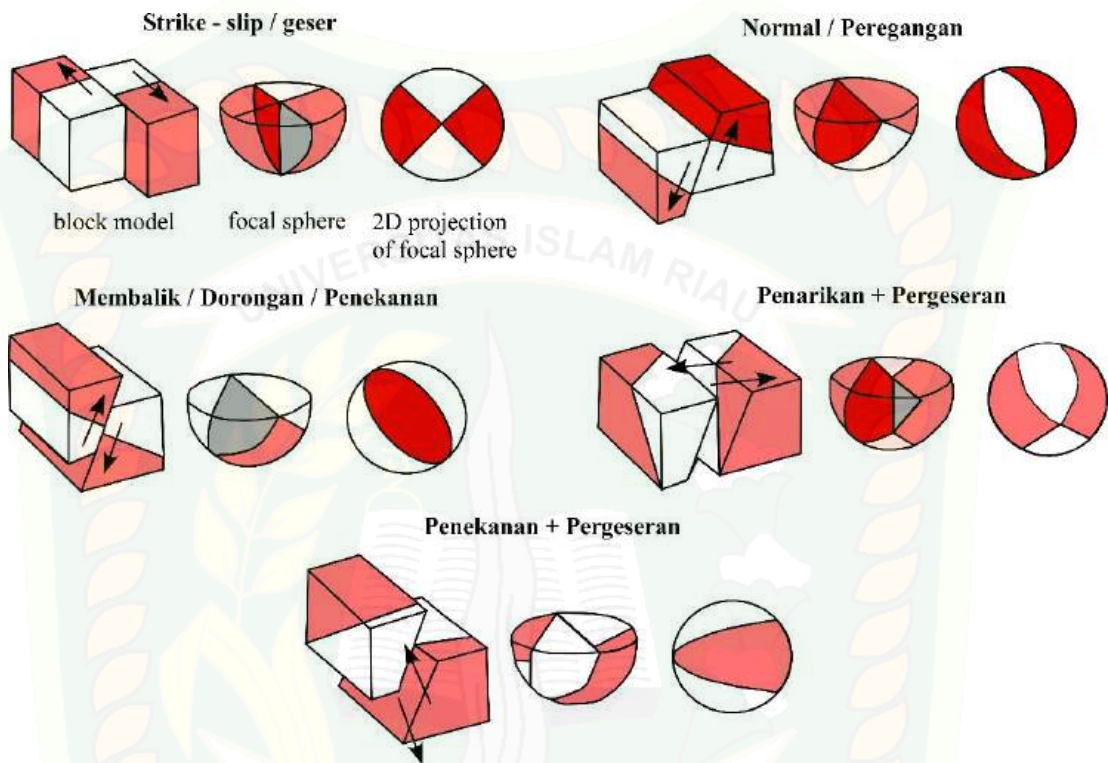
Konversi Aki dan Richards (1980) adalah standar internasional untuk menganalisis mekanisme sumber gempa dan orientasi bidang sesar, seperti terlihat (**Gambar 2.16**). Metode ini mengkorelasikan gaya seismik, arah pergeseran (*slip*), dan bidang sesar ke dalam suatu solusi mekanisme fokus (*focal mechanism solution*) yang divisualisasikan sebagai *focal sphere*.

Focal sphere memberikan representasi grafis dari jenis deformasi kerak apakah normal, *reverse*, atau *strike-slip* yang terjadi selama gempa. Gambar yang disajikan memvisualisasikan model blok dan proyeksi 2D *focal sphere* untuk berbagai jenis sesar, termasuk *strike-slip*, normal, *reverse*, dan kombinasi *oblique-slip*. Pola warna (merah dan putih pada gambar ini) pada bola fokus mewakili arah gerak relatif dan zona tekanan/tegangan pada bidang sesar.

Berdasarkan konvensi ini, jenis sesar dapat diidentifikasi dari bentuk dan orientasi pola warnanya:

1. Sesar geser (*strike-slip*): dicirikan oleh bidang berwarna yang bersebelahan secara vertikal atau horizontal dengan simetri yang jelas.
2. Sesar Normal: Bagian tengah didominasi warna putih (zona tensional), mengindikasikan perluasan kerak bumi.

3. Sesar Naik (*Reverse/Thrust*): Bagian tengah didominasi warna merah atau hitam (zona kompresi), menandakan pergerakan naik.
4. Sesar Oblik (*Oblique-slip*) ditunjukkan oleh kombinasi pola tegasan dan asimetri pada bidang, merepresentasikan gabungan gerak geser dan dorongan atau tarikan.



Gambar 2.16 Menunjukkan Aki Konversi Aki dan Richard yang digunakan untuk tafsiran bidang sesar

Visualisasi blok model tersebut memperkuat hubungan spasial antara arah pergerakan lempeng (panah), jenis tegasan dominan, dan proyeksi 3D bidang sesar. Oleh karena itu, konvensi ini menjadi landasan vital untuk menginterpretasi struktur bawah permukaan dari data seismik, menilai bahaya gempa, dan memodelkan zona patahan aktif (Lay dan Wallace, 1995).

Pemetaan struktural merupakan metode utama dalam mengobservasi geologi struktur dan geometri bawah permukaan (Parkinson, 1998; Shyu, dkk., 2005). Pengamatan detail dapat membuktikan keberadaan deformasi dan sesar, seperti patahan, kemiringan, dan lipatan. Keakuratan identifikasi sesar

direpresentasikan dengan simbol; garis tebal menandakan sesar terkonfirmasi, sementara garis putus-putus menunjukkan sesar tersembunyi atau terburukan.

Pada penelitian ini, Hukum-V diaplikasikan untuk memprediksi perpotongan antara lapisan sedimen dan sesar, khususnya di permukaan dengan eksposur terbatas. Arah kemiringan (*dip*) sesar menentukan blok naik (*hanging wall*) dan blok turun (*footwall*), yang menjadi dasar pengukuran dan klasifikasi jenis sesar. Sebagai contoh:

1. Sesar Normal: Bidang sesar miring menuju blok turun.
2. Sesar Naik: Bidang sesar miring menuju blok naik.
3. Sesar Geser: Bidang sesar umumnya vertikal.

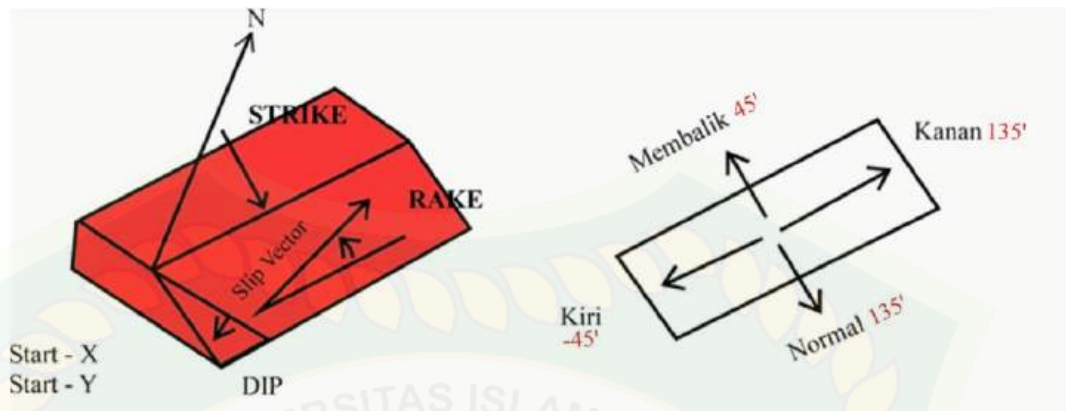
Analisis didukung oleh representasi *Centroid Moment Tensor* (CMT) yang menginterpretasikan mekanisme sumber gempa, khususnya arah *slip* (*rake*) pada bidang sesar. CMT, hasil olah data seismik, memberikan informasi orientasi tegasan utama dan mekanisme deformasi. Parameter kunci *rake* adalah sudut antara arah jurus (*Strike*) dan vektor (*Slip*) pada bidang sesar (Aki dan Richards, 1980; Lay dan Wallace, 1995), yang pengukurannya mengikuti konversi pada gambar.

Ilustrasikan sumbu koordinat bidang sesar- jurus (*strike*), kemiringan (*dip*), dan *rake* beserta arah *slip* yang khas untuk setiap jenis sesar (**Gambar 2.17**). Visualisasi ini sangat penting untuk memahami hubungan spasial dalam deformasi kerak dan menjadi alat fundamental dalam studi geologi struktur dan seismologi.

Sistem *Centroid Moment Tensor* (CMT), parameter *rake* dihitung secara simultan dengan *strike* dan *dip* untuk membentuk solusi mekanisme gempa, yang kemudian divisualisasikan sebagai diagram "*beachball*" atau bola fokus. Pemahaman terhadap nilai *rake* memiliki peran kritis karena dapat dimanfaatkan untuk:

- a. Mengklasifikasikan tipe gempa berdasarkan mekanisme sumbernya (*normal*, *reverse*, atau *strike-slip*).
- b. Menafsirkan gaya tektonik dominan yang bekerja, apakah kompresi, ekstensi, atau geser murni.

- c. Memetakan zona tektonik aktif dan karakteristiknya berdasarkan analisis data seismik regional.



Gambar 2.17 Visualisasi *Centroid Moment Tensor*

2.5 Gempabumi

Klasifikasi gempabumi secara umum dibagi berdasarkan tiga parameter utama, yaitu besaran magnitudo (M_w), kedalaman hiposenter, dan jenis sumber gempa. Gempabumi dengan magnitudo $< 2,0$ dikategorikan sebagai mikro-gempa dan umumnya tidak terasa oleh manusia, sedangkan gempa dengan magnitudo $\geq 8,0$ tergolong *megathrust* yang berpotensi menimbulkan kerusakan global dan tsunami besar, seperti yang terjadi di Aceh pada tahun 2004 dan Tohoku, Jepang tahun 2011, (USGS, 2023; Kanamori, 1977).

Dari aspek kedalaman, gempabumi diklasifikasikan menjadi dangkal (< 70 km), menengah (70–300 km), dan dalam (> 300 km). Gempa dangkal biasanya lebih merusak karena lebih dekat ke permukaan, sedangkan gempa dalam sering kali tidak terasa namun penting dalam memahami dinamika zona subduksi, terutama pada zona Benioff (Gutenberg dan Richter, 1954; Scholz, 2002).

Jenis gempabumi berdasarkan mekanisme sumbernya juga menjadi aspek penting dalam klasifikasi. Gempa tektonik merupakan jenis paling umum dan sering terjadi di batas lempeng, baik di zona sesar transform maupun zona subduksi. Di sisi lain, terdapat pula gempa vulkanik yang berkaitan dengan aktivitas magma di sekitar gunung api, serta gempa induksi buatan yang disebabkan oleh aktivitas manusia seperti pertambangan, pembangunan bendungan, dan injeksi fluida ke dalam kerak bumi (McGarr, 2014; McNutt, 2005).

Klasifikasi ini tidak hanya penting untuk kebutuhan ilmiah, tetapi juga untuk mitigasi bencana dan perencanaan kebijakan pembangunan wilayah rawan gempa. Pengetahuan yang komprehensif mengenai jenis dan karakteristik gempabumi memungkinkan permodelan risiko yang lebih akurat, termasuk dalam prediksi potensi tsunami, likuifaksi, maupun kerusakan infrastruktur (Lay dan Wallace, 1995; Stein dan Wyss, 2003). Klasifikasi gempabumi berdasarkan *Moment magnitude* (M_w), kedalaman, dan jenis gempa dapat dilihat pada **Tabel 2.7**.

Tabel 2.7 Klasifikasi Gempabumi Berdasarkan Magnitudo (M_w), Kedalaman, dan Jenis Gempa

Klasifikasi	Besaran Magnitudo (M_w)	Kedalaman Hiposenter (km)	Jenis Gempa	Keterangan
Mikro	< 2.0	Umumnya < 10	Tektonik, Vulkanik, Induksi	Tidak terasa oleh manusia, hanya tercatat oleh seismograf.
Kecil	2.0 – 3.9	Umumnya < 30	Tektonik, Vulkanik	Kadang terasa di permukaan, tidak menimbulkan kerusakan.
Menengah	4.0 – 4.9	< 70 (dangkal)	Tektonik, Vulkanik	Dapat dirasakan luas, kadang menimbulkan kerusakan ringan.
Moderat	5.0 – 5.9	< 70 – 300 (menengah)	Tektonik, Vulkanik, Induksi	Berpotensi menyebabkan kerusakan lokal, umum di zona aktif.
Kuat	6.0 – 6.9	< 300	Tektonik (Subduksi, Sesar Mendatar)	Menimbulkan kerusakan parah pada area padat penduduk; potensi tsunami jika di laut.
Besar	7.0 – 7.9	< 70 – 300	Tektonik Subduksi/ Sesar Transform	Merusak secara luas, dapat menyebabkan tsunami dan likuifaksi.
Sangat Besar (Megathrust)	8.0	Umumnya < 70 (zona subduksi)	Tektonik Subduksi (Megathrust)	Sangat merusak, cakupan global. Dapat menyebabkan gempa susulan besar, tsunami besar. Contoh: Aceh 2004 (M_w 9.1).
Dalam	Variatif	> 300	Tektonik Zona Benioff (subduksi)	Jarang terasa di permukaan, tetapi membantu memahami proses geodinamika dalam mantel.
Induksi Buatan (Induced)	< 5.5	Dangkal < 5 – 10	Tambang, Bendungan, Injeksi Fluida Umumnya di wilayah aktivitas manusia (tambang, eksplorasi energi),	berpotensi merusak secara lokal.
Vulkanik	< 6.0	Dangkal – menengah	Aktivitas magma / dapur magma Berkaitan dengan pergerakan magma,	sering terjadi menjelang letusan gunung api

2.6 Studi Terdahulu

Berbagai fitur geomorfologi tektonik aktif di Sabah yang mencerminkan deformasi neotektonik kontemporer, seperti *triangular facet* yang berkembang pada sesar dorong berarah NE-SW, offset sungai yang signifikan pada sesar geser naik-turun (oblik) berarah NW-SE, serta manifestasi geofluida berupa vulkanik lumpur

dan mata air panas yang menandakan rezim tekanan kompresi WNW-ESE akibat interaksi Lempeng Filipina - Lempeng Pasifik dengan Lempeng Eurasia. Fitur-fitur tersebut terbentuk sebagai respons terhadap *uplift* progresif Pegunungan Crocker – Pegunungan Trusmi akibat deformasi kompresi regional, diikuti oleh ekstensi pasca-kompresi pada punggung *anticlinorium* yang menghasilkan pembentukan cekungan graben Kuarterer (Tongkul, 2017). Namun pada daerah penelitian khususnya daerah Beluran belum ada penelitian terkait geomorfologi tektonik pada daerah penelitian.

Pola seismisitas Sabah menunjukkan aktivitas neotektonik aktif. Data seismik mencatat sekitar 65 kejadian gempa bumi ringan hingga sedang dengan *moment magnitude* lebih dari 3 sejak tahun 1900. Episenter gempa bumi melayang di zona pantai timur seperti Lahad Datu–Kunak dan di zona barat laut seperti Kundasang–Ranau. Mekanisme fokal menampilkan kombinasi sesar dorong, geser mendatar, dan normal yang konsisten dengan rezim mengulangi kompresi berarah WNW–ESE serta ekstensi lokal. Gempa signifikan seperti kejadian Ranau Mw 6.0 tahun 1991 dan 2015 berhubungan dengan Sesar Lobou–Lobou jenis normal. Pola spasial ini menegaskan potensi seismik tinggi pada struktur sesar aktif yang membatasi cekungan Kuarterer dan pegunungan lipatan utama Sabah (Sapin dkk, 2013; Tongkul, 2015). Namun pada daerah penelitian khususnya Beluran belum ada penelitian terkait seismisitas dengan menggunakan parameter *beachball* yang di korelasikan dengan geometri bidang sesar pada daerah penelitian.

Gempa bumi Ranau 2015 (Mw 6.0) dikategorikan sebagai "gempa normal *fault* dangkal" karena terjadi pada ekstensi Sesar Lobou-Lobou dengan panjang sesar (*rupture length*) ~15 km yang menghasilkan deformasi permukaan teramati (*fault scarp* 1-2 m) tetapi *peak ground acceleration* relatif pertengahan (*moderate*) <0.3g (Tongkul, 2017). Pemodelan seismik menunjukkan *slip* maksimum 1.5 m pada kedalaman 5-10 km yang efektif memicu longsor masif di daerah Kundasang-Ranau daripada kerusakan infrastruktur luas, mencerminkan karakteristik sesar normal pasca-kompresi di Pegunungan Crocker. Namun, terdapat kesenjangan pengetahuan karena kurangnya pemetaan dan analisis kelengkapan data *Moment magnitude* khusus daerah penelitian, padahal katalog tersebut diperlukan untuk

menilai interaksi sesar, sebaran kedalaman hiposentral, dan potensi gempa lokal yang sering terabaikan sebelum ini.

Bukti geologi berupa kelurusan aliran sungai yang *ter-offset* signifikan, pembentukan *triangular facets* pada lereng sesar, serta *displaced ridges* menjadi indikator nyata dari aktivitas neotektonik Sesar Lobou-Lobou dan Sesar Mensaban di Sabah (Tongkul, 2017). Dokumentasi lapangan ini menjadi bukti konkret bahwa struktur sesar aktif di Pegunungan Crocker memiliki potensi gempa merusak yang dapat menimbulkan *surface rupture* dalam skala sedang hingga besar, sebagaimana teramati pada gempa Ranau 1991 dan 2015. Namun demikian, terdapat kesenjangan keilmuan yang signifikan, yaitu kurangnya pemetaan dasar, pencatatan data lapangan geologi secara sistematis mengenai struktur geologi aktif, meliputi sesar, lipatan, punggungan dan *offset* stratigrafi sedimen Kuartar. Rangkuman mengenai penelitian terdahulu dan kesenjangan pengetahuan dapat dilihat pada **Tabel 2.1**

Tabel 2. 1 Tabel Kesenjangan Peneleitian Terdahulu

NO	ASPEK PENELITIAN	PENELITIAN TERDAHULU	KESENJANGAN PENELITIAN
1	Geomorfologi Tektonik	Evolusi Tektonik Sabah, Malaysia (Tongkul, 1991)	Belum ada penelitian lebih spesifik mengenai geomorfologi tektonik berbasis SRTM di daerah penelitian
2	Seismisitas	Penilaian bahaya seismik probabilistik di Sabah, Malaysia timur: memperhitungkan aktivitas gempa lokal di dekat Ranau (Khalil dkk, 2018)	Belum ada penelitian lebih spesifik terkait seismisitas berbasis CMT yang di korelasikan dengan geometri sesar di daerah penelitian
3	Skenario Gempabumi	Gempa Gunung Kinabalu berkekuatan Mw 6,0 tahun 2015 : patahan yang jarang terjadi dalam sistem patahan Crocker di Malaysia Timur. (Wang dkk, 2017)	Kurangnya pemetaan dan analisis serta kelengkapan data <i>Momen magnitude</i> khusus pada daerah penelitian
4	Bukti Lapangan	Evolusi Tektonik Sabah, Malaysia (Tongkul, 1991) ; Deformasi tektonik aktif di sepanjang sesar yang mengalami peremajaan di Kalimantan tropis: Kesimpulan yang diperoleh dari evaluasi tektono-geomorfik	Kurangnya pemetaan dasar, pencatatan data lapangan geologi secara sistematis mengenai struktur geologi aktif meliputi: Sesar, Lipatan, Punggungan dan <i>Offset</i> statigrafi sedimen kuartar

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Tahap Persiapan

Tahap persiapan meliputi persiapan alat dan bahan yang digunakan dalam pemetaan geologi. Adapun alat dan bahan yang digunakan pada pemetaan geologi yang memenuhi standar nasional adalah sebagai berikut :

- a. Kompas Geologi.
- b. Palu Geologi (Beku dan Sedimen).
- c. *Smartphone* (Peta elektronik)
- d. Skala pembanding (ukuran 1M dan 10 Cm).
- e. Buku catatan lapangan (lembar deskripsi batuan).
- f. Alat tulis (pensil 2B, spidol, dan lain-lain).
- g. Meteran.
- h. Papan *clipboard*.
- i. Plastik Sampel.
- j. Kamera.

3.2 Tahap Penelitian

Penelitian ini mengintegrasikan data primer dan data sekunder untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai aktivitas tektonik di wilayah penelitian. Data primer diperoleh melalui observasi langsung di lapangan yang bertujuan untuk memverifikasi hasil interpretasi berbasis data sekunder, serta untuk mengidentifikasi dan mendokumentasikan bukti-bukti fisik deformasi aktif. Observasi lapangan ini mencakup identifikasi fitur geomorfologi dan struktur geologi seperti sesar, lipatan, kekar, dan *triangular facet*. Fitur-fitur tersebut digunakan sebagai indikator dalam menilai aktivitas tektonik permukaan serta sebagai dasar dalam interpretasi arah tegasan regional dan perkembangan struktur geologi (Yeats dkk., 1997; Wesnousky, 2005; Twiss dan Moores, 2007).

Sebagai pelengkap, data sekunder diperoleh dari berbagai sumber spasial dan digital seperti peta geologi regional, citra satelit topografi (SRTM), serta data seismisitas dari basis data seperti IRIS atau GeoMapApp. Pengolahan data dilakukan secara digital menggunakan perangkat lunak sistem informasi geografis (GIS) seperti ArcGIS, yang menghasilkan luaran berupa peta geomorfologi tektonik, peta aktivitas seismik, dan peta skenario potensi gempa. Peta-peta ini berfungsi untuk mengevaluasi hubungan spasial antara morfologi permukaan dan dinamika tektonik aktif yang sedang berlangsung di kawasan penelitian (van der Beek dan Bishop, 2003; Allen dan Allen, 2013; Jackson dan McKenzie, 1988).

3.3 Tahap Pengambilan Data

Tahap pengambilan data pada penelitian ini terdiri dari data sekunder dan data primer. Penjelasan detail tentang keduanya dijelaskan pada sub bab di bawah ini.

3.3.1 Pengumpulan Data Sekunder

Pengumpulan data sekunder dilakukan untuk memperoleh data sekunder terkait penelitian yang akan dilakukan seperti data SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) bersolusi 30m untuk digunakan dalam analisis geomorfologi tektonik dan *shapefile* peta geologi yang digunakan sebagai pendukung data SRTM.

3.3.2 Pengambilan Data Lapangan/Primer

Pengambilan data lapangan dilakukan untuk memperoleh data primer terkait struktur geologi dan bukti aktivitas tektonik di daerah Paitan hingga Linkabau, Beluran Sabah, Malaysia, dilakukan untuk memperoleh data primer geomorfologi tektonik dan struktur permukaan seperti sesar, kekar, dan rekahan, dengan pemetaan detail pola kelurusan serta dokumentasi jenis sesar seperti sesar naik, sesar mendatar, sesar mendatar dan kekar. Setiap lokasi dicatat koordinatnya menggunakan GPS untuk memastikan akurasi spasial. Pengukuran dilakukan secara sistematis terhadap orientasi bidang sesar, sumbu lipatan, dan pola kekar menggunakan kompas geologi untuk memperoleh data akurat mengenai arah jurus (*strike*) dan kemiringan (*dip*) struktur-struktur tersebut. Data pengukuran ini kemudian dicatat dalam formulir lapangan dan

diplot pada peta geologi untuk Analisis pola deformasi regional. Hasil pengukuran akan memberikan informasi dasar tentang gaya-gaya tektonik yang bekerja dan hubungannya dengan struktur geologi yang berkembang di daerah penelitian.

3.3.3 Dokumentasi Visual

Dokumentasi visual merupakan komponen kunci dalam penelitian ini untuk memastikan validitas dan kelengkapan data lapangan. Foto-foto lapangan diambil secara sistematis menggunakan kamera menggunakan aplikasi *timestamp*, fokus pada struktur geologi utama seperti bidang sesar, zona geser, lipatan, dan rekahan batuan, serta bukti aktivitas tektonik seperti gores-garis sesar dan breksiasi. Setiap foto dilengkapi dengan informasi koordinat GPS, skala, dan orientasi untuk memudahkan analisis lebih lanjut. Pendekatan dokumentasi ini tidak hanya berfungsi sebagai bukti lapangan, tetapi juga memungkinkan verifikasi ulang data dan mendukung interpretasi sejarah tektonik daerah penelitian secara lebih akurat.

3.4 Analisis Data Sekunder

Data sekunder dalam penelitian ini dibagi ke dalam tiga kategori utama, yaitu data geomorfologi tektonik, data seismisitas, dan data *Moment magnitude* (Mw). Tahap analisis data sekunder mencakup proses pengolahan dan interpretasi yang menghasilkan tiga jenis luaran utama peta geomorfologi tektonik, peta distribusi seismisitas, dan peta skenario gempabumi . Pembuatan ketiga peta tersebut menggunakan peta dasar (*base map*) yang dipilih secara selektif berdasarkan kebutuhan analisis serta tingkat resolusi yang sesuai dari berbagai sumber terpercaya.

3.4.1 Geomorfologi Tektonik

Digitasi sesar dimulai pada titik sesar itu dimulai dan dilukis sepanjang garis sesar yang kelihatan pada topografi yang menunjukkan kelurusan dan diakhiri pada pemberhentian topografi. Untuk sesar yang terlihat dengan jelas kelurusannya pada topografi menggunakan simbol berupa garis tegas berwarna merah sedangkan sesar yang telah terkubur oleh aluvium muda pada lembah

tertentu atau biasa disebut sesar dugaan diberikan simbol garis putus-putus berwarna merah.

Punggungan (*ridge axis*) merupakan salah satu elemen geomorfologi tektonik yang umumnya digambarkan sebagai garis linear berwarna kuning pada peta, menunjukkan bentuk topografi yang menonjol dan berkaitan langsung dengan aktivitas tektonik (Keller dkk., 2015). Berdasarkan orientasinya terhadap jalur sesar, punggungan diklasifikasikan menjadi dua tipe utama: punggungan sejajar sesar dan punggungan tegak lurus sesar. Punggungan sejajar sesar terbentuk searah dengan pergerakan sesar, biasanya dihasilkan oleh gaya geser mendatar atau kompresi lateral, dan sering kali memperlihatkan asimetri morfologi di kedua sisi sesar (Yeats dkk., 1997). Sementara itu, punggungan tegak lurus sesar berkembang akibat pengangkatan vertikal pada zona sesar naik atau lipatan, umum dijumpai di wilayah kompresional aktif seperti sabuk lipatan dan patahan (*fold-and-thrust belts*), dan mencerminkan pengaruh tegasan utama maksimum (σ_1) yang berorientasi tegak lurus terhadap sesar aktif. Fitur ini juga dapat terbentuk dari reaktivasi struktur geologi lama yang mengalami deformasi ulang di bawah rezim tegasan baru. Secara umum, pola orientasi punggungan terhadap sesar memberikan informasi penting mengenai arah medan tegasan dan dinamika struktural kawasan (Twiss dan Moores, 2007; Allen dan Allen, 2013).

Dalam studi geomorfologi struktural, lipatan umumnya direpresentasikan pada peta sebagai garis berwarna coklat yang menandai posisi sumbu lipatan. Lipatan diklasifikasikan menjadi dua bentuk utama, yaitu antiklin dan sinklin. Antiklin adalah lipatan dengan bentuk cembung ke atas yang umumnya muncul sebagai punggungan atau zona elevasi tinggi di permukaan, sedangkan sinklin memiliki bentuk cekung ke bawah dan sering kali tampak sebagai lembah atau zona topografi rendah. Dalam interpretasi citra *hillshade*, antiklin tampak sebagai deretan pegunungan linear yang memanjang, mencerminkan bagian puncak lipatan, sementara sinklin terlihat sebagai alur memanjang yang mengikuti dasar lipatan. Pola berulang yang teratur antara punggungan dan lembah ini mengindikasikan adanya pengaruh gaya kompresi regional yang menghasilkan deformasi berstruktur lipatan, khususnya pada lingkungan

tektonik aktif (Twiss dan Moores, 2007; Van der Pluijm dan Marshak, 2004). Begitu juga untuk lapisan (*bedding*) ditandai dengan warna ungu pada peta untuk menunjukkan arah kemenerusan lapisan.

Bukit segitiga (*triangular facet*) merupakan salah satu fitur geomorfologi struktural yang umum ditemukan pada lereng perbukitan atau pegunungan yang mengalami pengangkatan akibat aktivitas sesar. Fitur ini terbentuk melalui proses erosi pada blok sesar yang mengalami kenaikan relatif, sehingga menciptakan permukaan lereng datar hingga miring yang berbentuk menyerupai segitiga. Keberadaan bukit *triangular facet* secara umum mengindikasikan adanya sesar aktif dengan komponen gerak vertikal, seperti sesar naik atau sesar geser-oblik (Yeats dkk., 1997; Twiss dan Moores, 2007). Dalam interpretasi citra *hillshade*, *triangular facet* terlihat sebagai bidang lereng halus berbentuk segitiga yang terpotong tajam oleh lembah-lembah erosi. Pada citra resolusi tinggi, fitur ini tampak sebagai segmen lereng yang lebih lurus, planar, dan kontras dibandingkan dengan lereng sekitarnya, serta cenderung tersusun secara berulang mengikuti pola linear di sepanjang kaki perbukitan. Keberadaan pola tersebut sangat membantu dalam mengidentifikasi segmentasi sesar secara geomorfik, serta memberikan informasi penting mengenai aktivitas dan arah pergerakan struktur tektonik di wilayah tersebut (Clark dkk., 2004; Allen dan Allen, 2013).

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) (Ryan dkk, 2009). CMT ini berbentuk simbol grafik berupa bola pantai yang mengindikasikan tipe sesar yang menghasilkan gempabumi, diantaranya: Sesar gesar, 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 sesar, arah kemiringan serta tanggal terjadinya gempabumi di masa lalu. Hasil dari Analisis seismisitas menghasilkan peta seismisitas yang menunjukkan parameter sesar.

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 bukit segitiga (*triangular facet*) menunjukkan arah kemiringan sesar dan pembelokkan sungai menunjukkan pola sesar geser baik ke arah kanan (*dextral*) maupun ke kiri (*sinistral*), punggung (*ridge axis*), lipatan dan perlapisan. Nilai dari fitur-fitur sesar seperti jurus (*strike*), kemiringan (*dip*) dan *rake* akan diolah secara stereografis menggunakan perangkat lunak *faultKin 8* untuk menghasilkan nilai rekomendasi CMT (Marrett dan Almendinger, 1990; Almendinger dkk, 2012).

3.4.3 Area Retakan/Patahan

Area rekahan (A) merupakan produk dari panjang patahan (L) dan lebar (W) (Shyu dkk., 2005). 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.

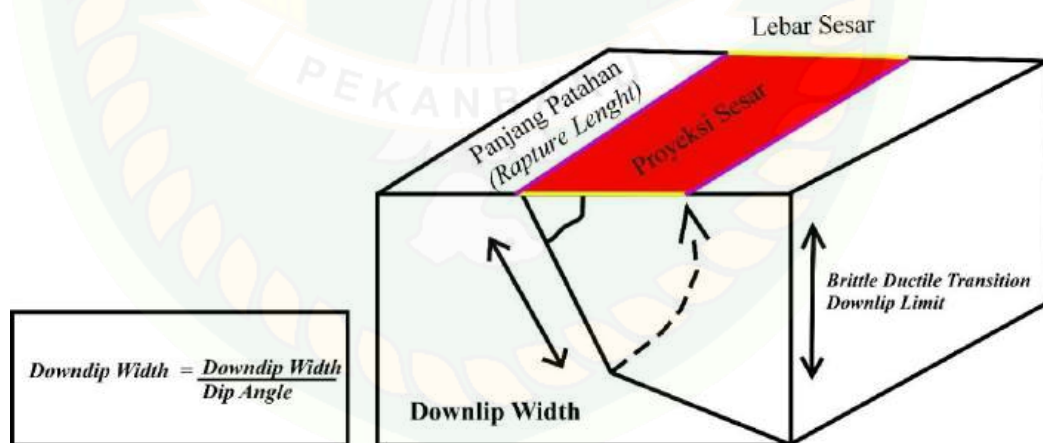
3.4.4 Perhitungan Moment Magnitudo Gempabumi

Analisis *Moment magnitude* (M_w) menghasilkan peta skenario gempabumi (neotektonik). Analisis ini memerlukan input data parameter sesar diantaranya: jurus (*strike*), kedalaman (*dip*), *rake*, orientasi geometri sesar dan

downdip limit. Kemudian menggunakan formula yang telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya untuk menghitung lebar (W), luas area (A), *slip rate* (Mo), rata-rata pergerakan (D) dan hasil akhir berupa besaran potensi *Moment magnitude* (Mw) 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 (*rupture width*) ditandai dengan garis berwarna kuning dan luas sesar atau disebut juga zona rekahan di tandai dengan polygon warna-warni dalam bentuk tampalan (*rupture patch*). Diatas *rupture patch* diberikan nilai *Moment magnitude* (Mw) 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.

Peta ini juga dilengkapi dengan nama sesar beserta simbol kinematik berupa panah untuk sesar geser (*strike-slip*) dan segitiga untuk sesar naik (*thrust/reverse*), sebagai validasi kinematik yang diperkuat oleh simbol *beachball* dari nilai CMT yang menggambarkan mekanisme sumber gempa historis untuk kemudian dibandingkan dengan peta skenario gempa yang dihasilkan.



Gambar 3.1 Memperlihatkan bidang patahan yang diproyesikan ke permukaan

3.4.5 Sudut Kemiringan Sesar (*Dip Angle*)

Sudut kemiringan sesar digunakan untuk mengklasifikasikan jenis sesar berdasarkan orientasinya. Sesar dengan kemiringan $>45^\circ$ umumnya

UNIVERSITAS ISLAM RIAU

dikategorikan sebagai sesar naik (*reverse fault*), sedangkan sesar dengan kemiringan $<45^\circ$ sering disebut sesar naik berkemiringan landai (*thrust fault*) (Twiss dan Moores, 2007). Sebaliknya, sesar turun (*normal fault*) biasanya memiliki sudut kemiringan yang lebih curam, berkisar antara 45° hingga 70° (Fossen, 2016). Variasi sudut ini menunjukkan hubungan erat antara gaya tektonik dan deformasi kerak bumi.

Sudut kemiringan sesar yang digunakan untuk setiap segmen patahan diperoleh dari katalog *Centroid Moment Tensor* (CMT) yang tersedia dan mudah diakses di aplikasi *Geomapapp*. Setelah mendapatkan sudut kemiringan, ambil nilai rata-rata dan masukkan ke dalam perhitungan. Persyaratan sudut kemiringan (*dip*) harus $\geq 30^\circ$ karna nilai *dip* $< 30^\circ$ menghasilkan perhitungan *W* yang terlalu besar, berpotensi menyebabkan estimasi nilai *M_w* yang berlebihan. (Shyu dkk., 2005; Shah dan Sieh, 2013). Nilai *dip* digunakan dalam perhitungan nilai *W* dengan menggunakan formula :

$$W = \frac{Depth}{\sin(Dip)} \quad (\text{Rumus 1})$$

Keterangan:

W = Lebar patahan (km)

Depth = Kedalaman downdip limit (Km)

Dip = Sudut kemiringan sesar (*dip angle*, $^\circ$)

3.4.6 Kedalaman Downdip Limit

Dalam penelitian ini, nilai *downdip limit* ditetapkan pada kedalaman 5 km, yang merepresentasikan batas maksimum transisi rapuh-ulet (*brittle-ductile transition*) pada kerak atas di wilayah Sabah. Kedalaman tersebut sejalan dengan temuan beberapa studi yang menunjukkan bahwa zona transisi antara deformasi elastik rapuh dan plastis ulet pada kerak benua umumnya berada pada kisaran 5 hingga 20 km tergantung pada gradien suhu dan karakteristik batuan (Sibson, 1982; Bürgmann dan Dresen, 2008). Meskipun gempabumi pada kedalaman lebih dari 50 km telah dilaporkan di beberapa zona subduksi atau kerak bawah yang lebih tebal, kedalaman 5 km dianggap representatif untuk kondisi litologi Sabah yang didominasi oleh batuan sedimen terdeformasi dan batuan dasar bersifat sedang hingga lemah secara rheologis (Jackson, 2002). Pemilihan nilai ini bertujuan untuk mencerminkan kedalaman maksimum

potensi deformasi seismogenik di kerak atas, khususnya pada sistem sesar aktif di wilayah tektonik Sabah.

3.4.7 Lebar Patahan

Lebar patahan (*rupture width*) secara umum didefinisikan sebagai jarak vertikal antara permukaan awal dan akhir dari bidang sesar yang aktif saat terjadi gempa, biasanya dihitung dari kedalaman hiposenter hingga kedalaman maksimum pergeseran (Kanamori dan Brodsky, 2004). Lebar ini juga dapat diinterpretasikan sebagai zona deformasi aktif dalam kerak bumi tempat pergeseran terjadi.

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 daerah penelitian dan sekitarnya (Shyu dkk, 2005). Nilai lebar patahan dihitung menggunakan formula :

$$A = L \times W \quad \text{(Rumus 2)}$$

Keterangan:

A: Luas Patahan

L: Panjang jurus patahan

W: Lebar *down dip* patahan

3.4.8 Slip Rate

Slip rate memberikan indikasi tentang seberapa cepat tegangan tektonik terkumpul di sepanjang patahan, yang kemudian berhubungan langsung dengan potensi magnitudo dan frekuensi gempabumi. Semakin tinggi *slip rate*, umumnya semakin besar pula potensi patahan tersebut untuk menghasilkan gempa besar dalam waktu yang lebih singkat (Wesnousky, 1986).

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

$$D = \frac{M_o}{\mu \times A} \quad (\text{Rumus 3})$$

Keterangan:

D : *slip rate*

M_o : *seismic moment*

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

A : luas sesar , km²

3.4.9 *Moment Magnitude* (M_w)

Skala magnitudo merupakan parameter penting dalam seismologi untuk mengukur ukuran gempabumi. Skala yang paling umum digunakan saat ini adalah *Moment magnitude* (M_w) karena dapat memberikan estimasi energi gempa secara lebih akurat dibandingkan skala Richter, terutama untuk gempa besar (Kanamori, 1977; Hanks dan Kanamori, 1979). *Moment magnitude* (M_w) didasarkan pada konsep momen seismik, yang dihitung dari besarnya pergeseran, luas bidang sesar, dan kekakuan batuan.

Jenis sesar sangat memengaruhi besar *Moment magnitude* (M_w) yang dihasilkan. Sesar naik berpotensi menghasilkan M_w yang sangat besar karena bidang sesarnya luas, sedangkan sesar normal dan geser cenderung menghasilkan M_w yang lebih kecil meskipun pergeseran signifikan.

Moment Magnitude (M_w) merupakan besaran nilai energi yang dilepaskan saat terjadi gempa, nilai M_w berhubungan erat dengan luas sesar (A dalam km²) (Wells dan Coppersmith, 1994). Untuk tiga jenis sesar menggunakan rumus seperti dibawah ini:

Sesar geser (*Strike-slip Fault*): $M_w = 3,98 + 1,02 \log A$ (Rumus 4)

Sesar normal (*Normal Fault*) : $M_w = 3,93 + 1,02 \log A$ (Rumus 5)

Sesar Naik (*Reverse/Thrust Fault*): $M_w = 4,33 + 0,90 \log A$ (Rumus 6)

Keterangan:

Mw: *Moment magnitude* (Mw)

A: Luas patahan dalam km².

3.4.10 *Seismic Moment* (Mo)

Seismic moment (Mo) dipengaruhi oleh geometri dan mekanisme sesar. Misalnya, sesar naik (*thrust fault*) di zona subduksi dapat menghasilkan Mo yang sangat besar karena luas bidang sesar (A) yang sangat besar. Sebaliknya, sesar normal dan geser memiliki luas bidang yang lebih kecil, sehingga biasanya menghasilkan nilai Mo yang lebih rendah (Lay dan Wallace, 1995).

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

$$Mo = \mu \times W \times L \times D \quad (\text{Rumus 7})$$

Keterangan:

Mo: *seismic moment*

μ : modulus geser ($3 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$), (Hanks dan Kanamori, 1979)

W : Lebar *downdip* sesar

L: Panjang sesar

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

Nilai *Seismic moment* (Mo) kemudian di konversi menjadi nilai *Moment Magnitude* (Mw) dengan menggunakan rumus :

$$Mw = \frac{2}{3} \cdot \log \log Mo - 10.737 \quad (\text{Rumus 8})$$

Keterangan:

Mw: *Moment magnitude* (Mw)

Mo: *Seismic Moment*

03.5 Analisis Data Primer

Analisis data primer dilakukan untuk menganalisis data yang didapat dari observasi langsung di lapangan seperti litologi, struktur geologi berupa kekar,

Lipatan dan sesar. data primer ini dianalisis bersama data sekunder di studio, termasuk peta geologi, citra satelit, dan kajian literatur. Hasil integrasi kedua jenis data tersebut digunakan untuk menghasilkan peta tematik dan analisis geomorfologi tektonik secara menyeluruh.

3.6 Perangkat Lunak dan Aplikasi Pendukung

Sumber data yang digunakan untuk menghasilkan peta fitur gempa pada penelitian ini berasal dari berbagai aplikasi dan data sekunder, antara lain *Iris Earthquake* yang berfungsi sebagai informasi gempabumi beserta lokasinya, besaran *Moment magnitude* (MW). Selain itu, aplikasi lain seperti *Geomapapp*, ArcGIS digunakan untuk memperoleh gambar geografis, batimetri, *Centroid Moment Tensor*, fitur tektonik aktif, geologi dan kejadian gempabumi. *Software Canvas X* digunakan untuk digitasi peta tematik gempabumi sesuai kebutuhan penelitian. Aplikasi *timestamp* pula digunakan pada perangkat seluler android untuk merekamkan bukti lapangan geomorfologi.

3.5.1 ArcGIS

ArcGIS merupakan salah satu *software* pendukung dalam penelitian ini, software ArcGIS digunakan untuk membuat peta geomorfologi tektonik yang mana langkah awal dari peta ini adalah mempersiapkan data raster seperti SRTM resolusi ~30 m yang dapat diunduh secara terbuka melalui aplikasi Jaxa, data yang sebelumnya sudah di siapkan lalu di masukan ke Arcgis, data raster tersebut berupa data *pixel* yang terpisah dan harus di mozaic menggunakan *tools mozaic to new raster* pada Arcgis.

Setelah data raster tersebut di *mozaic* maka akan dilakukan pemotongan sesuai dengan kawasan daerah penelitian menggunakan *tools clip*. Setelah melakukan dua tahapan tersebut maka langkah selanjutnya adalah menambahkan data koordinat pada data raster tersebut pada menu *coordinat system* sesuai dengan lokasi penelitian, khususnya wilayah sabah menggunakan sistem koordinat WGS 1984 51N.

Kemudian langkah selanjutnya membuat hillshade menggunakan *tools 3D analysis tools raster surface hillshade*. Lalu untuk melengkapi data permukaan dilakukan interpretasi dari *hillshade* tersebut seperti Sesar pasti

ditandai dengan garis warna merah tegas, sesar dugaan ditandai dengan garis warna merah putus putus, ini dikarenakan sesar tersebut sudah tertutup akibat proses pengendapan sedimen kuarter namun masih sedikit terlihat apabila diinterpretasi melalui *hillshade*, Lipatan ditandai dengan garis warna coklat, *bedding* ditandai dengan garis berwarna ungu, *ridge* (punggungan) ditandai dengan garis berwarna kuning, *triangular facet* ditandai dengan garis berwarna hijau dan *Offset* Sungai ditandai dengan garis berwarna biru. lalu setelah itu ditambahkan batimetri guna melengkapi imej tersebut.

3.5.2 *GeoMapApp*

Geomapp merupakan suatu *software* yang dirancang untuk menganalisis data geosains serta geospasial dalam format peta interaktif. Dalam penelitian ini geomapp digunakan untuk memvisualisasikan mekanisme fokal gempa dalam bentuk *beach ball* yang menggambarkan jenis dan orientasi patahan saat terjadi gempa. *Software* ini juga dapat membantu menentukan apakah gempa disebabkan oleh sesar normal, sesar naik, atau sesar geser. Langkah pertama zoom in peta di daerah penelitian, kemudian klik pada bagian *overlay* lalu centang opsi *distance* untuk memunculkan skala, Setelah itu zoom sampai skala menunjukkan 1:10.000. Kemudian klik pada bagian grid pilih portal pada toolbars dan centang *earthquake focal* (CMT) kemudian tunggu beberapa saat hingga *beach ball* nya muncul. Informasi geometri sesar berupa jurus (*strike*), kemiringan (*dip*), rake akan muncul dengan dua pilihan. Penulis akan memilih salah satu dari pilihan tersebut menyesuaikan dengan fitur geomorfologi tektonik di daerah penelitian. Namun memandang minimnya data geometri sesar, justru beberapa kawasan penulis memberikan nilai rekomendasi geometri sesar menyesuaikan dengan keadaan geomorfologi tektoniknya yang khas.

3.5.3 *GeoRose*

GeoRose adalah perangkat lunak khusus yang dirancang untuk analisis dan visualisasi data orientasi struktur geologi, seperti sesar, kekar, lipatan, dan foliasi. *Software* ini banyak digunakan dalam penelitian geologi struktur untuk membuat diagram stereografis (*stereonet*) dan diagram mawar (*rose diagram*),

yang membantu dalam interpretasi pola deformasi batuan dan arah tegasan (*stress*) di suatu daerah.

Langkah kerja umum GeoRose meliputi: (1) input data orientasi, baik secara manual maupun dari file eksternal dalam format teks (CSV, TXT); (2) pemilihan jenis diagram yang diinginkan, seperti *rose* diagram untuk arah jurus atau stereonet untuk orientasi tiga dimensi; (3) pengaturan parameter visualisasi, seperti interval kelas, warna, atau arah rotasi; dan (4) ekspor hasil visualisasi ke dalam format gambar atau PDF untuk keperluan dokumentasi dan publikasi (Wang, 2011). GeoRose juga menyediakan opsi untuk melakukan analisis statistik dasar, seperti menghitung arah dominan dan menyajikan data polarisasi, yang sangat berguna dalam mengidentifikasi pola regional tegasan atau deformasi (Lisle dkk., 2011).

3.5.4 *Faultkin*

Faultkin merupakan *software* yang dirancang khusus untuk menganalisis data struktur geologi, terutama dalam interpretasi bidang sesar dan orientasi bidang patahan serta *slip vector*. Dalam penelitian ini, Faultkin digunakan untuk memvisualisasikan data bidang sesar dan arah slip guna menentukan mekanisme yang terjadi di daerah penelitian.

Secara teknis data geometri sesar dimasukkan, FaultKin akan memplot bidang sesar dan vektor gerakan pada diagram stereografik (stereonet) menggunakan proyeksi bola bawah. Dari hasil pemetaan ini, perangkat lunak akan menerapkan metode analisis inversi tegasan menggunakan pendekatan Bingham (*Bingham stress inversion*) untuk menghitung dan memproyeksikan arah tegasan utama (σ_1 , σ_2 , σ_3). Hasil proyeksi ini memungkinkan penentuan arah lawan proyeksi gerakan sesar, yang berguna dalam menginterpretasikan lingkungan tegasan regional dan orientasi tegasan dominan (Marrett dan Allmendinger, 1990).

Langkah akhir dalam proses ini adalah pembangunan model visualisasi focal mechanism berupa simbol *beachball*, yang menggambarkan jenis dan arah sesar (misalnya sesar naik, sesar geser, atau sesar turun) secara grafis. Gambar *beachball* ini dihasilkan berdasarkan orientasi bidang patahan dan vektor *slip*

yang telah dihitung, dan secara visual dapat mengonfirmasi jenis sesar yang terlibat serta arah pergerakannya.

3.5.5 Canvas X

Canvas X merupakan perangkat lunak desain grafis yang banyak digunakan dalam bidang teknik dan sains, termasuk dalam aplikasi geospasial seperti pengeditan dan penyempurnaan peta tematik. Dibandingkan dengan perangkat lunak pengeditan grafis lainnya seperti Adobe Illustrator atau CorelDRAW, Canvas X tergolong ringan dan efisien, namun tetap memiliki kapabilitas profesional dalam pengolahan elemen-elemen grafis teknis.

Dalam konteks pemetaan, Canvas X sering dimanfaatkan untuk menyempurnakan visualisasi peta hasil olahan dari *software* GIS atau pemodelan geologi seperti ArcGIS, QGIS, atau GeoMapApp. Fitur-fitur utama yang umum digunakan mencakup: penambahan dan pengeditan legenda, pengaturan layout halaman peta, pemrosesan tulisan ilmiah atau label kartografi, serta meningkatkan resolusi gambar (*upscaling*) untuk kebutuhan publikasi cetak maupun digital. Selain itu, Canvas X juga mendukung format vektor dan raster, memungkinkan fleksibilitas dalam penggabungan elemen visual dari berbagai sumber ke dalam satu peta yang utuh dan terstruktur (Wang dan Zhang, 2021).

Kemampuan Canvas X untuk menyatukan elemen grafis teknis dan artistik menjadikannya pilihan ideal dalam dokumentasi ilmiah dan penyajian data geospasial yang membutuhkan tingkat ketelitian tinggi, seperti dalam laporan geologi, hasil survei lapangan, hingga publikasi akademik.

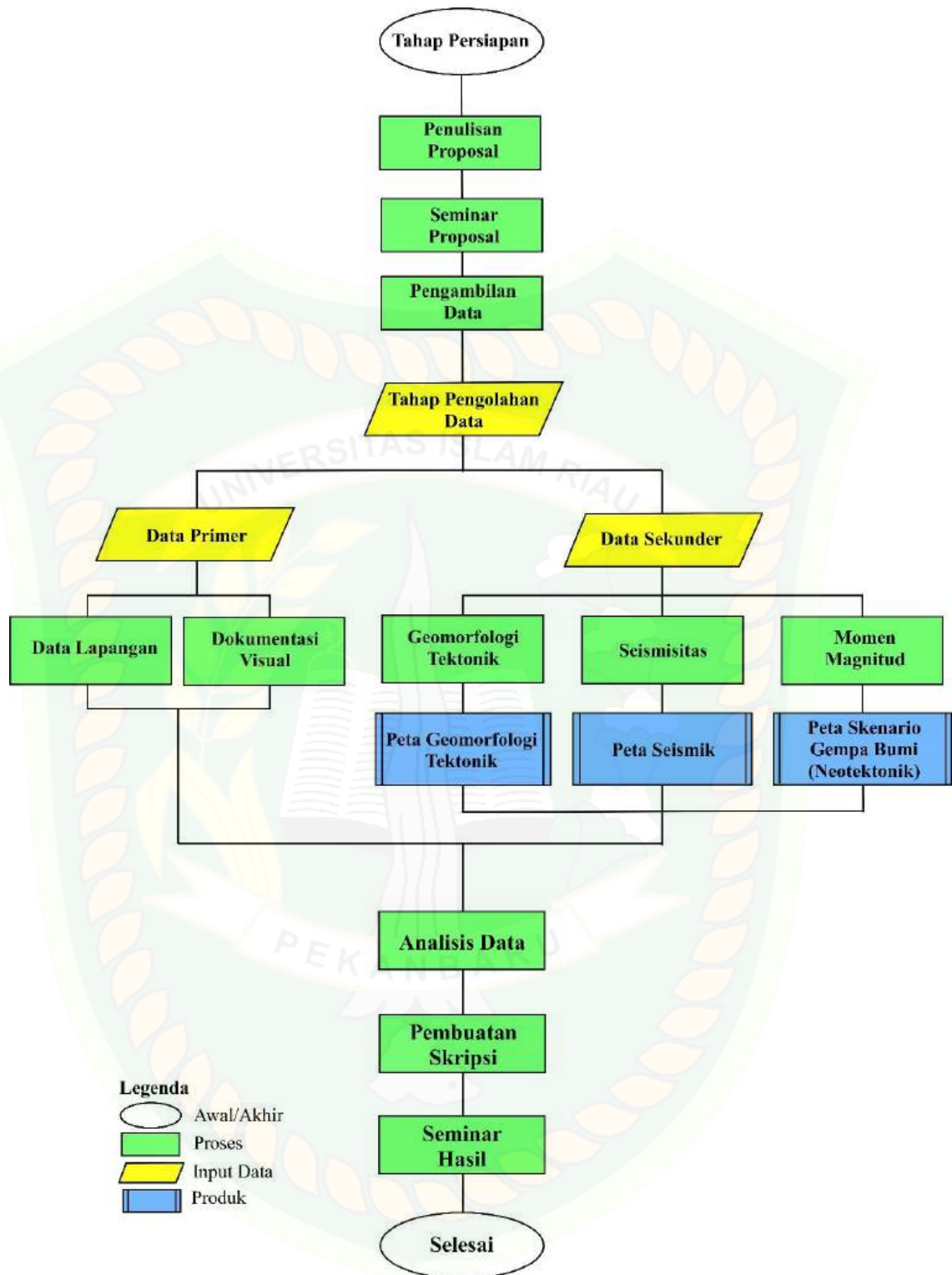
3.5.6 Timestamp

Aplikasi *timestamp* merupakan sebuah perangkat lunak yang dirancang khusus untuk mendokumentasikan data lapangan secara sistematis dan terstruktur, terutama dalam penelitian geologi dan survei lapangan. Aplikasi ini dilengkapi dengan fitur-fitur canggih yang memungkinkan pengguna untuk merekam berbagai informasi penting secara otomatis, seperti koordinat GPS, waktu pengambilan data, arah mata angin (*azimuth*), ketinggian lokasi (*altitude*), serta tanggal dan jam secara *real-time*. Dengan adanya fitur-fitur tersebut, aplikasi *timestamp* memastikan bahwa setiap data yang dikumpulkan

memiliki referensi spasial dan temporal yang akurat, sehingga memudahkan proses validasi dan Analisis data di kemudian hari.

3.7 Alur Penelitian

Penelitian ini diawali dengan tahap persiapan dan dilanjutkan dengan penyusunan proposal penelitian, kemudian dipresentasikan dalam seminar proposal untuk mendapatkan masukan dan persetujuan. Setelah proposal disetujui, tahap selanjutnya adalah penguasaan perangkat lunak yang akan digunakan dalam pengolahan data. Proses pengolahan data meliputi dua jenis data utama, yaitu data lapangan yang mencakup dokumentasi lapangan, analisis geomorfologi tektonik, pemetaan seismisitas, dan penentuan *Moment magnitude* (Mw), serta data sekunder yang diolah menjadi peta tematik seperti peta geomorfologi tektonik, peta seismisitas, dan peta skenario gempabumi. Setelah semua data terkumpul dan terolah, dilakukan analisis data secara mendalam untuk memperoleh hasil penelitian. Temuan penelitian kemudian dituangkan dalam bentuk skripsi dan dipresentasikan dalam seminar hasil sebagai tahap akhir dari rangkaian penelitian ini. Alur penelitian ini dirancang secara sistematis untuk memastikan kelancaran dan keberhasilan pelaksanaan penelitian. Rangkaian alir penelitian ditunjukkan secara mendetail pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3.96 Bagan Alir Alur Penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Geomorfologi Tektonik.

Analisis Geomorfologi Tektonik dilakukan terlebih dahulu untuk mengetahui bentang alam yang dipengaruhi aktivitas tektonik di daerah penelitian. Data geomorfologi tektonik diperoleh melalui analisis lapangan yang teliti serta rekorelasi data pembelokan sungai, punggungan, sesar, dan bukit segitiga (*triangular facet*) dan lipatan. Tujuan utama pemetaan ini adalah membedakan struktur tektonik tua dari yang muda berdasarkan karakteristik geomorfik bentang alam yang dominan. Selain peta geomorfologi tektonik, hasilnya juga mencakup peta seismisitas yang terintegrasi, sehingga membentuk dasar pembuatan peta skenario gempa bumi. Analisis Geomorfologi Tektonik meliputi tujuh daerah, diantaranya Marmahat, Paitan, Takeban, Linkabau, Botitian, Kaniongan, dan Pamol.

4.1.1. Marmahat

Daerah Marmahat terdiri dari tiga sesar utama yaitu Sesar Mamahat (MhF), Sesar Marmahat (MrF), Sesar Pamol 1 (PF1) (**Gambar 4.1**).

Daerah ini memiliki dua lembah ditandai Sebagai Lembah Marmahat (MV) yang terbentuk dari hasil pergerakan sesar MrF dengan luas 9,4 km². Lembah Pamol (PV) yang terbentuk akibat pergerakan sesar PF1 dengan luas 15,66 km², kedua lembah ini diklasifikasikan sebagai lembah *fault termination*.

Fitur Tektonik aktif lain yang terbentuk di daerah ini adalah lipatan melingkar yang terdapat pada bagian baratlaut. Hal ini menunjukkan bahwasanya dominasi batuan pada daerah ini bersifat plastis (*ductile*), membentuk morfologi perbukitan dengan elevasi tertinggi hingga 93 m di bagian baratlaut.

Sesar Mamahat (MhF) membentang sepanjang 17 km yang arah lintasan nya berarah baratlaut – tenggara. Diidentifikasi sebagai jenis sesar geser mengangan (*dextral*). Sepanjang sesar ini terdapat empat pembelokan sungai dengan rata – rata *offset* sepanjang 0,9 Km. Sesar Marmahat (MrF) membentang sepanjang 13,2 km yang lintasannya berarah utara – baratdaya, sesar ini diidentifikasi sebagai sesar geser mengiri (*sinistral*). Sesar Pamol 1 (PF1) membentang sepanjang 44,4 km

dengan arah lintasan berarah timurlaut – baratdaya, serta di jumpai satu pembelokan (*offset*) sungai dengan panjang 1 km.

Geologi di daerah ini di dominasi oleh Formasi Crocker dan Aluvium Muda. Formasi Crocker tersusun atas litologi batuan sedimen berupa batupasir, serpih dan lempung yang berumur Oligosen hingga Kuarter. Sedangkan Aluvium muda di daerah ini terdiri dari pasir, lanau dan lempung berumur Kuarter.

4.1.2 Paitan

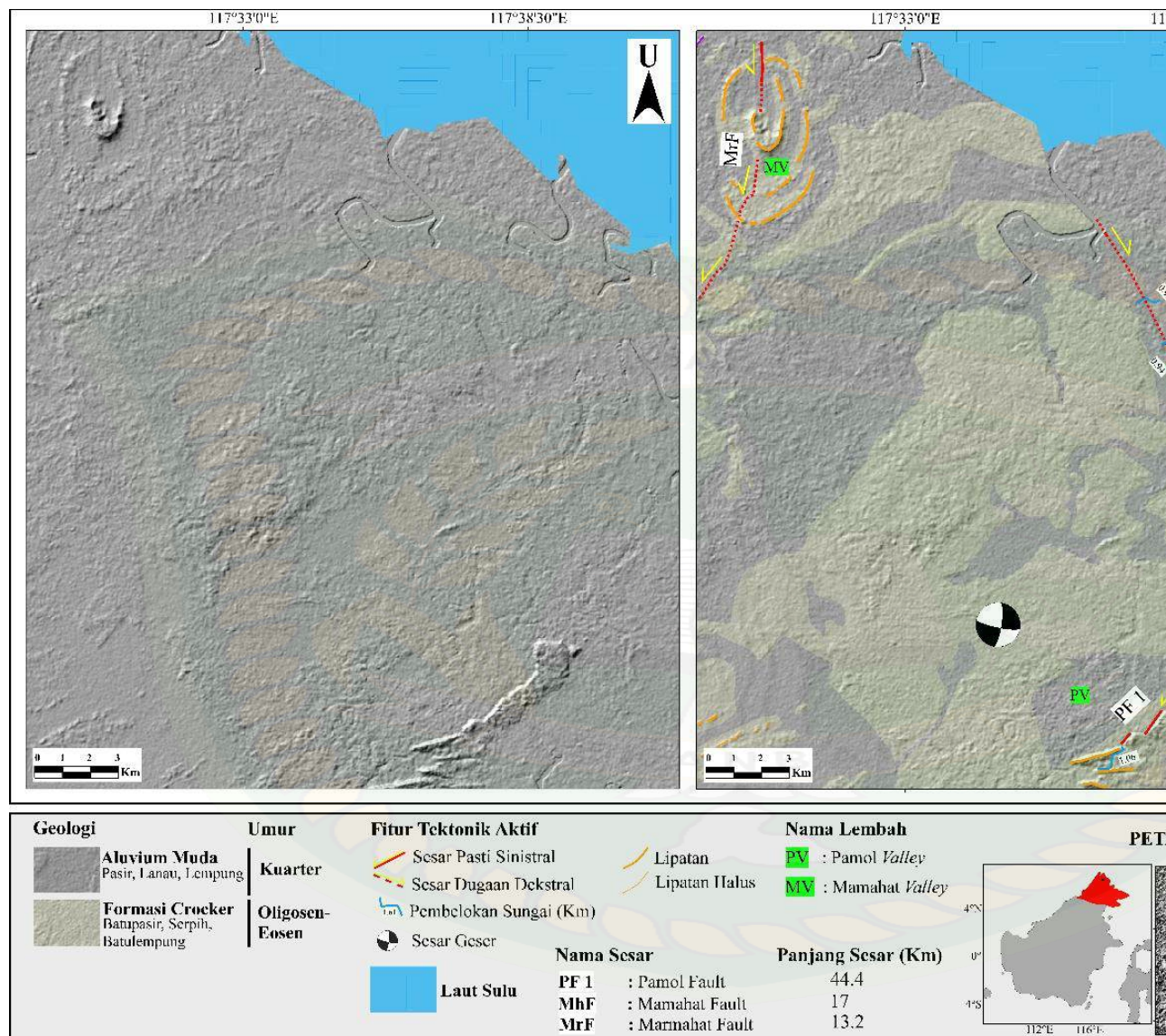
Pada daerah Paitan dijumpai fitur tektonik berupa lipatan dan Sesar Beluran (BF), lipatan dan sesar ini kemungkinan besar terbentuk akibat pergerakan Sesar Mapun yang berada 118 km ke arah timur laut Cekungan Laut Sulu. Sesar Mapun yang berada di laut, tidak dipetakan pada penelitian ini, disebabkan peneliti hanya fokus pada sesar yang berada di daratan Sabah.

Sesar Beluran merupakan sesar yang paling mendominasi di daerah penelitian dengan panjang 18.7 Km. Sesar ini tersegmentasi dengan sangat banyak menjadi 35 segmen sesar dengan arah membentuk lipatan mega yaitu *Beluran Mega Fold*. Punggungan lipatan ini searah dengan segmentasi Sesar Beluran yaitu baratlaut-tenggara membentuk lengkungan ke arah timurlaut. Kondisi batuan penyusun berupa batuan sedimen Formasi Crocker yang sebagian besar terdiri dari selanglapis batupasir dan batulempung yang bersifat plastis (*ductile*), mendukung terbentuknya lanskap morfologi perbukitan yang terlipat dengan elevasi tertinggi mencapai 336 m (**Gambar 4.2**).

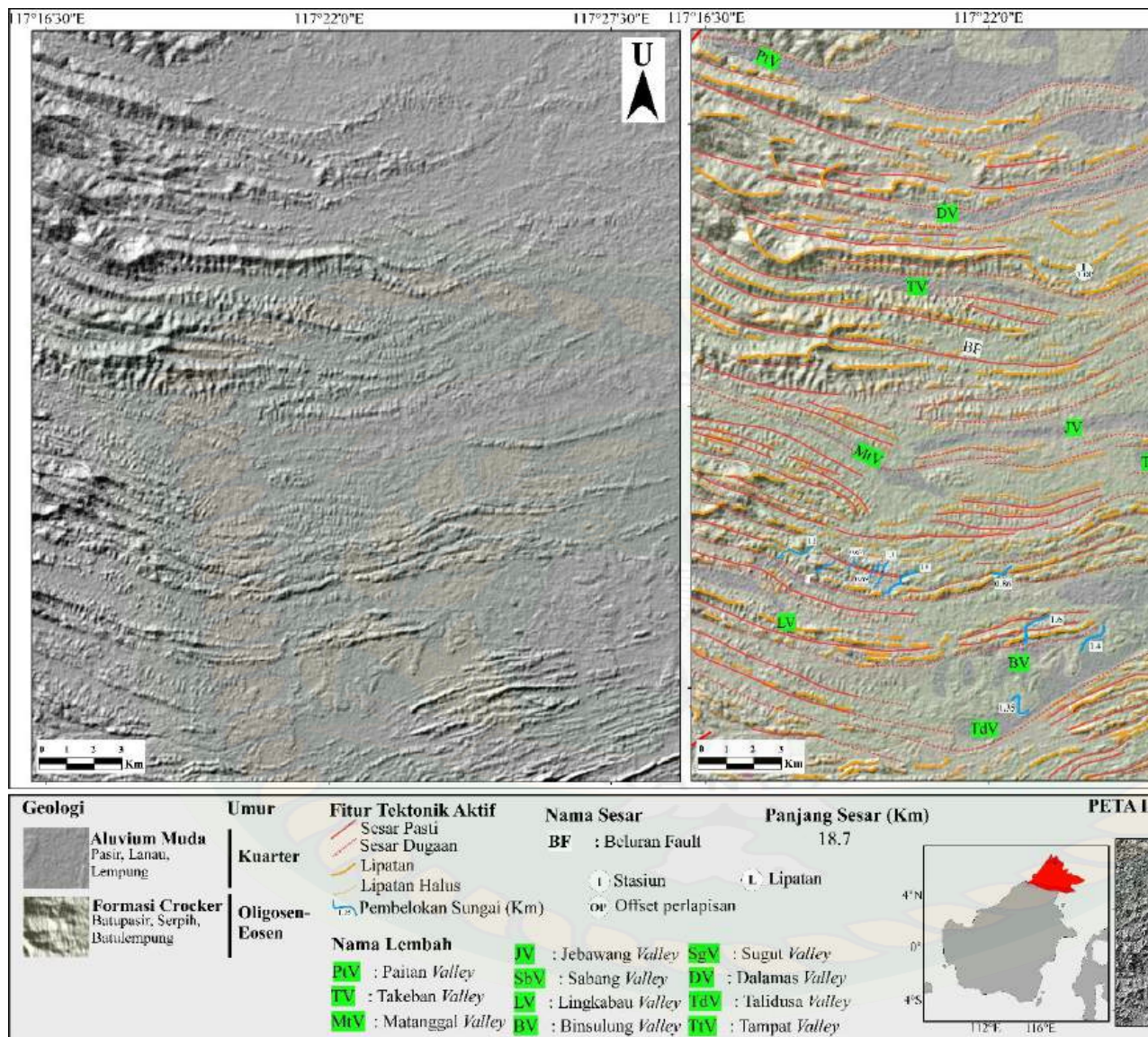
Pada daerah ini dijumpai beberapa 11 lembah sempit diantara dua bukit lipatan diantaranya adalah Lembah Paitan (PtV) dengan luas 1,28 km², Lembah Dalamas (DV) dengan luas 0,72 km², Lembah Takeban (TV) dengan luas 4,24 km², Lembah Jebawang (JV) dengan luas 3,8 km², Lembah Matanggal (MtV) dengan luas 12 km², Lembah Tapat (TtV) dengan luas 0,42 Km², Lembah Sabang (SbV) dengan luas 1,3 km², Lembah Linkabau (LV) dengan luas 7,2 km², Lembah Binsulung (BV) dengan luas 4 km², Lembah Sugut (SgV) dengan luas 5,7 km², Lembah Talidusa (TdV) dengan luas 2 km². Lembah-lembah pada daerah ini diklasifikasikan sebagai Lembah Sinklin. Dijumpai juga beberapa pembelokan sungai dengan nilai rata – rata pembelokan sungai 1,1 km.

Geologi di daerah ini di dominasi oleh Formasi Crocker dan Aluvium muda. Formasi Croker tersusun atas litologi batuan sedimen berupa batupasir, serpih dan lempung yang berumur Oligosen hingga Kuartar. Sedangkan Aluvium muda yang terdiri dari pasir, lanau dan lempung berumur Kuartar.





Gambar 4. 1 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Marmahat



Gambar 4. 2 Peta Geomorfologi Tektoik Daerah Paitan

4.1.3 Takeban

Daerah Takeban memiliki tujuh sesar utama yaitu, Sesar Golong 1 (GIF1), Sesar Golong 2 (GIF2), Sesar Takeban 1 (TkF1), Sesar Takeban 2 (TkF2), Sesar Linkabau (LF), Sesar Matanggal (MaF) dan Sesar Moroli (MiF) (**Gambar 4.3**).

Daerah ini memiliki satu lembah yaitu Lembah Linkabau (LV) dengan luas 12 km², lembah ini terbentuk dari hasil pergerakan Sesar MaF yang kemudian diklasifikasikan sebagai jenis lembah *fault termination*.

Fitur Tektonik aktif lainnya yang dijumpai pada daerah ini adalah Punggungan, punggungan yang mendominasi pada daerah ini berarah Baratlaut – Tenggara (R1) (**Gambar 4.4**) pada bagian barat daya. Arah punggungan berbanding tegak lurus terhadap sesar MaF dan MiF, membentuk geomorfologi perbukitan terjal dengan elevasi tertinggi mencapai 354 m pada bagian selatan. Kemudian ditemukan *Offset Bedding* yang terbentuk akibat pergeseran Sesar LF, serta terdapat lipatan pada bagian utara daerah Golong.

Sesar Golong 1 (GIF1) membentang sepanjang 11,1 km di bagian utara daerah Golong dengan arah orientasi utara – selatan, yang diidentifikasi sebagai sesar geser menganan (*dekstral*). Sesar Golong 2 (GIF2) membentang sepanjang 14,8 km di bagian utara daerah Golong dengan arah orientasi utara – selatan, yang diidentifikasi sebagai sesar geser menganan (*dekstral*). Sesar Takeban 1 (TkF1) merupakan sesar geser menganan (*dekstral*) dengan panjang sesar 6,4 km yang memiliki orientasi timurlaut – baratdaya pada bagian timurlaut, pada sesar ini di jumpai satu pembelokan sungai dengan panjang pembelokan 1,88 km. Sesar Takeban 2 (TkF2) merupakan sesar geser menganan (*dekstral*) dengan panjang sesar mencapai 6,7 km yang memiliki orientasi timurlaut – baratdaya pada bagian timur laut. Sesar Linkabau (LF) merupakan sesar geser menganan (*dekstral*) yang membentang sepanjang 20,4 km, dengan arah orientasi sesar timurlaut - baratdaya, pada sesar ini di jumpai 4 bukit segitiga (*triangular faccet*). Sesar Matanggal (MaF) membentang sepanjang 16,4 km yang diidentifikasi sebagai sesar turun. Pada sesar ini dijumpai 17 bukit segitiga dan Sesar Moroli (MiF) dengan panjang 11 km dan orientasi sesar berarah timurlaut – baratdaya, diklasifikasikan sebagai sesar geser menganan (*dekstral*).

Geologi di daerah ini di dominasi oleh Formasi Crocker dan Aluvium Muda. Formasi Croker tersusun atas litologi batuan sedimen berupa batupasir, serpih dan lempung yang berumur Oligosen hingga Kuartar. Sedangkan Aluvium muda yang terdiri dari pasir, lanau dan lempung berumur Kuartar.

4.1.4 Linkabau

Pada daerah Linkabau memiliki tiga sesar utama yaitu Sesar Kayangan (KyF), Sesar Linkabau – Kias (LKF), Sesar Salulong (SIF) (**Gambar 4.5**).

Pada daerah ini dijumpai satu lembah, yaitu Lembah Salulong (SV) dengan luas lembah 7,75 km² diklasifikasikan sebagai lembah *fault termination*.

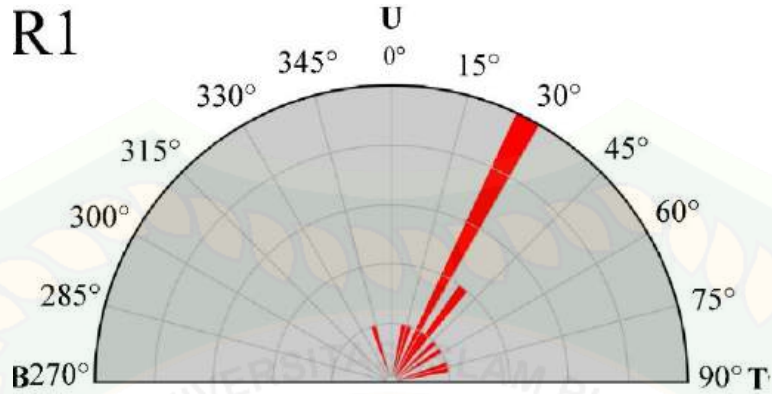
Fitur Tektonik Aktif yang terdapat di daerah Linkabau yaitu punggung yang memiliki arah orientasi timurlaut – baratdaya ditandai dengan R2 (**Gambar 4.6**) berbanding tegak lurus dengan sesar LKF pada bagian barat laut dan punggung R3 (**Gambar 4.7**) yang arah orientasi nya berarah timurlaut – baratdaya yang berbanding tegak lurus dengan sesar LKF pada bagian tenggara.

Sesar Kayangan (KyF) pada bagian timur laut daerah Linkabau membentang sepanjang 8,3 km yang diidentifikasi sebagai sesar geser mengiri (*sinistral*), dengan orientasi sesar ini berarah timur laut – barat daya, serta dijumpai bukit segitiga yang berasosiasi dengan sesar ini. Lipatan dan *offset bedding* dijumpai pada bagian timurlaut dan utara yang terbentuk akibat pergerakan sesar ini, hal ini membuktikan bahwasanya litologi batuan pada daerah ini bersifat plastis (*ductile*), membentuk morfologi perbukitan tinggi dengan elevasi mencapai 336 m di bagian selatan.

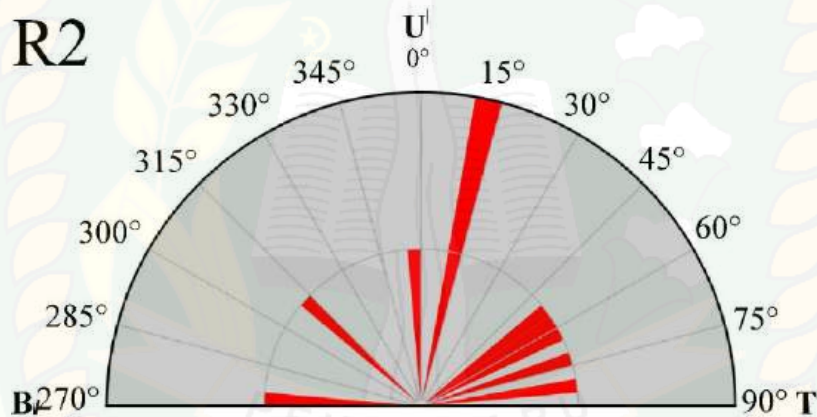
Sesar Linkabau-Kias (LKF) membentang sepanjang 71,6 km pada bagian selatan daerah Linkabau menunjukkan orientasi sesar baratlaut – tenggara yang diidentifikasi sebagai sesar geser menganan (*dextral*) serta dijumpai bukit segitiga dan pembelokan sungai dengan rata rata 0,70 km. Sesar Salulong (SIF) diidentifikasi sebagai sesar geser menganan (*dextral*) membentang sepanjang 8,5 km di bagian tenggara, dengan orientasi sesar baratlaut – tenggara.

Geologi di daerah ini di dominasi oleh Formasi Crocker dan Aluvium Muda. Formasi Croker tersusun atas litologi batuan sedimen berupa batupasir, serpih dan

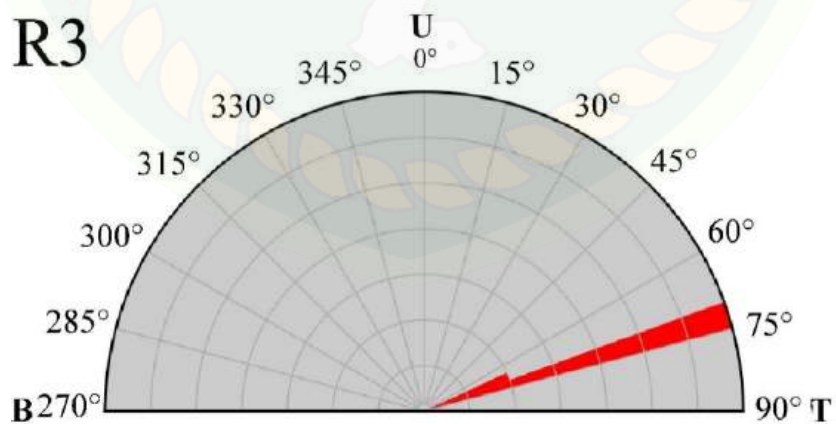
lempung yang berumur Oligosen hingga Kuartar. Sedangkan Aluvium muda yang terdiri dari pasir, lanau dan lempung berumur Kuartar.



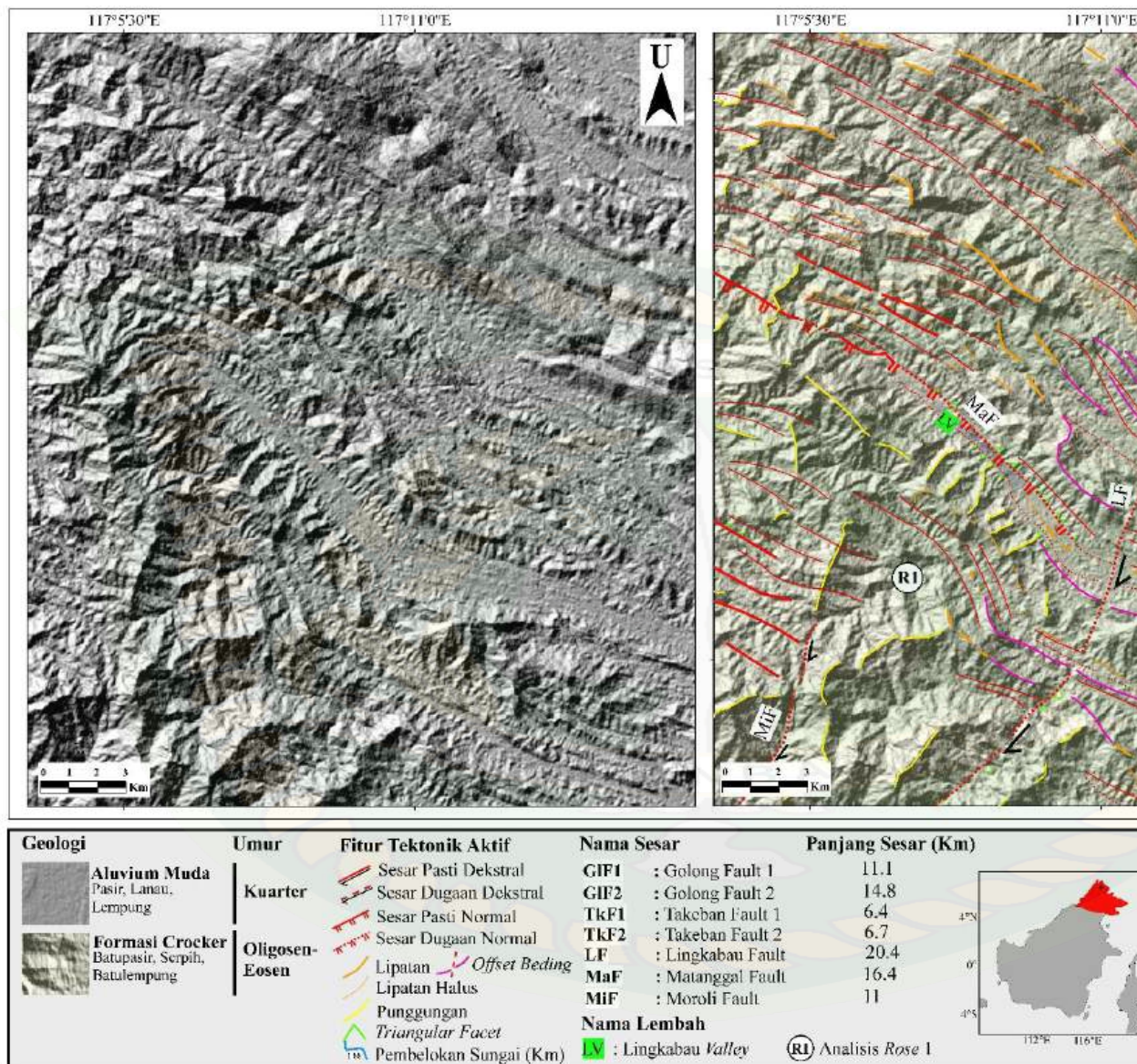
Gambar 4. 3 Analisis Diagram *Rose* (R1) Menunjukkan Dominasi Arah Punggungan Berarah Timurlaut - Baratdaya



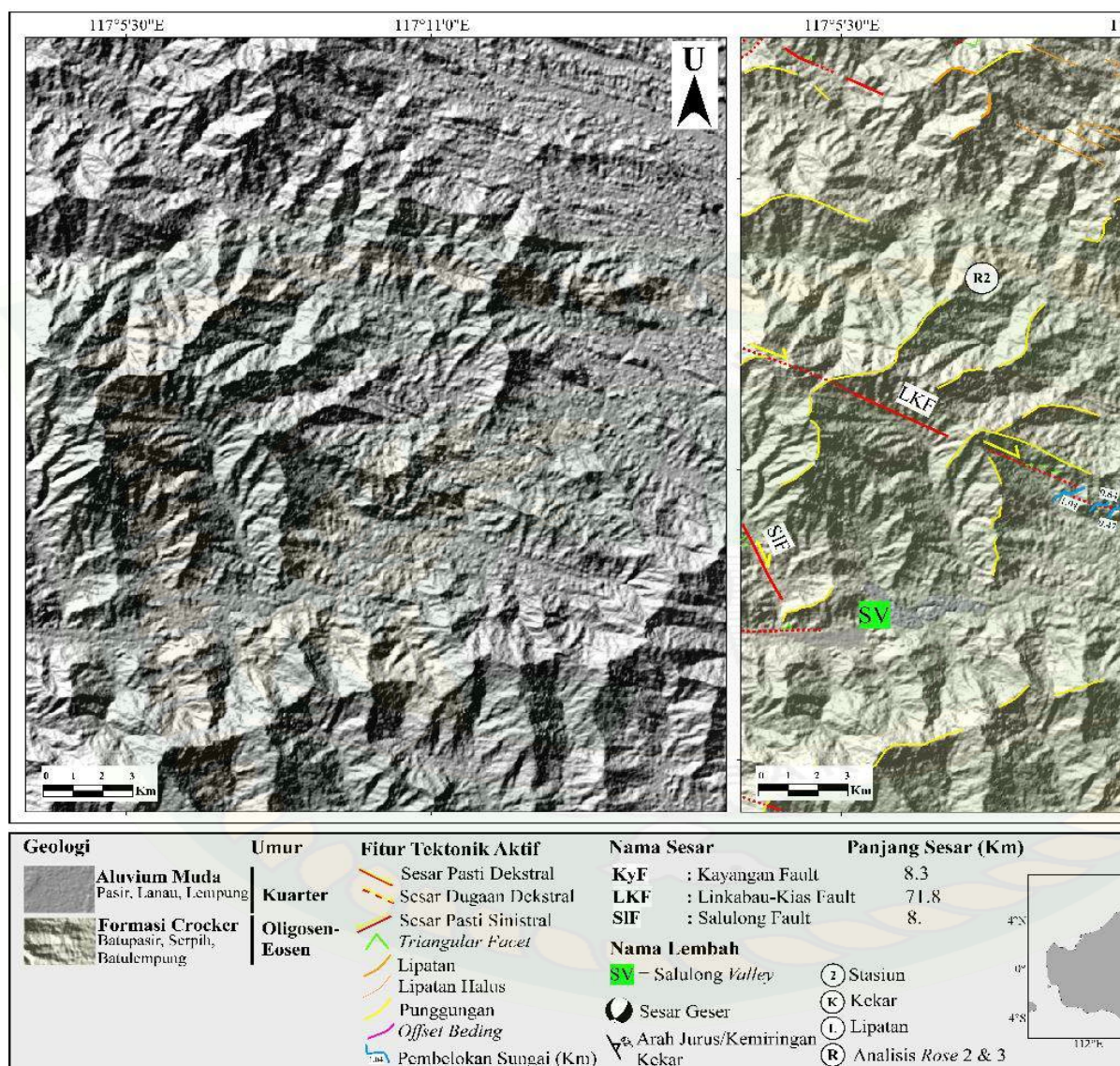
Gambar 4. 4 Analisis Diagram *Rose* (R2) Menunjukkan Dominasi Arah Punggungan Berarah Timurlaut - Baratdaya



Gambar 4. 5 Analisis Diagram *Rose* (R3) Menunjukkan Dominasi Arah Punggungan Berarah Timurlaut - Baratdaya



Gambar 4. 6 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Takeban



Gambar 4. 8 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah

4.1.5 Botitian

Pada daerah ini terdapat lima sesar utama yaitu Sesar Kayangan (KyF), Sesar Linkabau – Kias (LKF), Sesar Salulong (SIF), Sesar Giring (GF) dan Sesar Botitian – Paraganpang (BPF) (**Gambar 4.8**).

Pada daerah ini memiliki tiga lembah, diantaranya Lembah Salulong (SV) dengan luas lembah 7,75 km². Lembah Fortuna (FV) dengan luas lembah 3,25 km² yang terbentuk akibat pergeseran sesar BPF. Lembah Paraganpang (PgV) dengan luas lembah 12,65 km² yang terbentuk akibat pergeseran sesar BPF. Ketiga lembah ini diklasifikasikan sebagai lembah *fault termination*.

Fitur Tektonik aktif lainnya yang di jumpai pada daerah ini adalah yaitu punggung yang memiliki arah orientasi baratlaut – tenggara ditandai dengan R2 searah dengan sesar LKF pada bagian barat laut dan punggung R3 yang arah orientasi nya baratlaut – tenggara yang searah dengan sesar LKF, pada bagian tenggara serta R4 (**Gambar 4.9**) dengan orientasi baratlaut – tenggara yang mana arah orientasi ini sejajar dengan arah orientasi sesar BPF pada bagian selatan, membentuk morfologi perbukitan tinggi dengan elevasi tertinggi mencapai 830 m pada bagian selatan.

Sesar Kayangan (KyF) pada bagian timurlaut daerah Linkabau membentang sepanjang 8,3 km yang diidentifikasi sebagai sesar geser mengiri (*sinistral*), dengan orientasi sesar ini berarah timurlaut – baratdaya, serta dijumpai bukit segitiga yang berasosiasi dengan sesar ini. Sesar Linkabau-Kias (LKF) membentang sepanjang 71,6 km pada bagian selatan daerah Linkabau menunjukkan orientasi sesar baratlaut – tenggara yang diidentifikasi sebagai sesar geser menganan (*dextral*) serta dijumpai 9 bukit segitiga dan pembelokan sungai dengan rata rata 0,7 km. Sesar Salulong (SIF) diidentifikasi sebagai sesar geser menganan (*dextral*) membentang sepanjang 8,5 km di bagian tenggara daerah Linkabau, dengan orientasi sesar baratlaut – tenggara. Sesar Giring (GF) diidentifikasi sebagai sesar geser mengiri (*sinistral*) yang membentang sepanjang 11,8 km pada bagian baratdaya daerah Botitian dengan orientasi sesar baratlaut – tenggara. Pada sesar ini dijumpai 7 bukit segitiga. Sesar Botitian – Paraganpang (BPF) membentang sepanjang 59,5 km pada bagian selatan daerah Botitian yang diidentifikasi sebagai sesar geser mengiri (*sinistral*) dan dijumpai bukit segitiga yang berasosiasi dengan sesar ini.

Geologi di daerah ini di dominasi oleh Batuan Beku, Formasi Crocker dan Aluvium Muda. Batuan Beku pada daerah ini tersusun atas kompleks ofiolit, granit, granidiorit, basal dan gabro yang berumur Trias. Terdapat juga Formasi Crocker tersusun atas litologi batuan sedimen berupa batupasir, serpih dan lempung yang berumur Oligosen hingga Kuartir Sedangkan Aluvium muda yang terdiri dari pasir, lanau dan lempung berumur Kuartir.

4.1.6 Kaniongan

Daerah Kaniongan memiliki empat sesar utama diantaranya Sesar Pamol 1 (PF1), Sesar Pamol 2 (PF2), Sesar Pamol *East* (PEF) dan Sesar Tagas – Tagas (TTF) (**Gambar 4.10**).

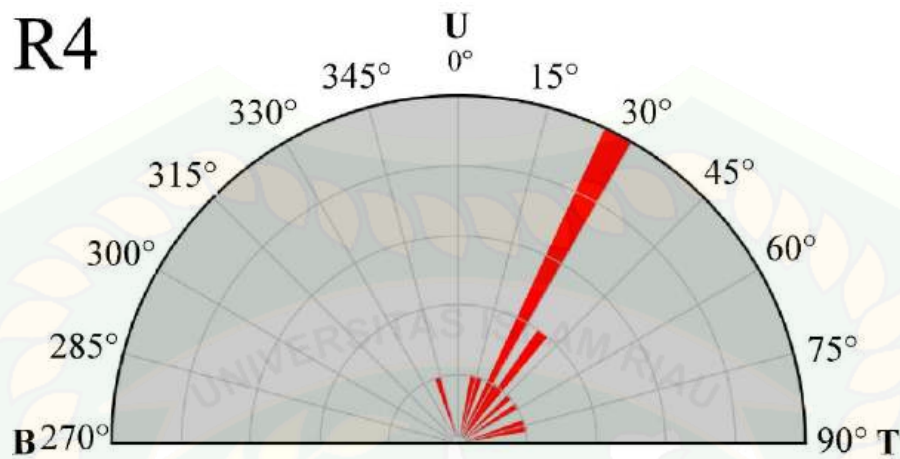
Pada daerah ini terdapat satu lembah yaitu Lembah Sugut (SgV) dengan luas 9,12 km², lembah ini terbentuk akibat pergeseran sesar PF1 yang diidentifikasi sebagai lembah *fault termination*

Fitur Tektonik Aktif lainnya yang dijumpai pada daerah ini adalah lipatan dan *offlet bedding* yang terbentuk akibat pergeseran dari sesar PF1. Terdapat juga geomorfologi perbukitan dengan elevasi tertinggi mencapai 193 m.

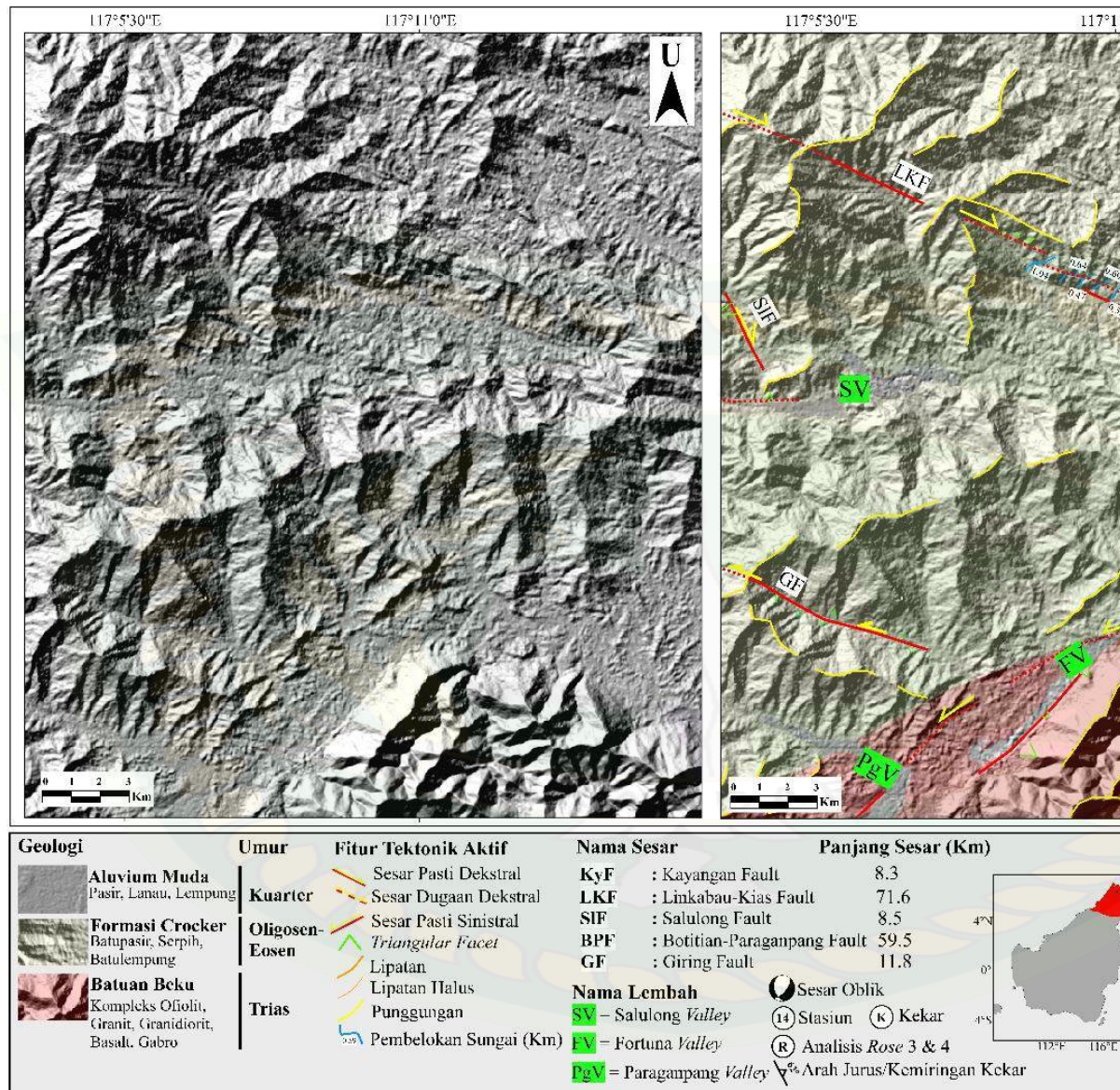
Sesar Pamol 1 (PF1) diidentifikasi sebagai sesar geser mengiri (*sinistral*) dengan orientasi sesar timurlaut – baratdaya membentang sepanjang 44,4 km pada bagian barat laut Kaniongan. Sesar Pamol 2 (PF2) diidentifikasi sebagai sesar geser manganan (*dextral*) yang membentang sepanjang 31,1 km dengan orientasi sesar timurlaut – baratdaya pada bagian barat laut Kaniongan. Sesar Pamol *East* (PEF) diidentifikasi sesar geser mengiri (*sinistral*) yang membentang sepanjang 15,3 km dengan orientasi sesar timurlaut – baratdaya pada bagian barat. Sesar Tagas – Tagas (TTF) membentang sepanjang 11,3 km dengan orientasi sesar timurlaut – baratdaya pada bagian selatan Kaniongan, sesar ini diidentifikasi sebagai sesar turun (*normal fault*).

Geologi di daerah ini di dominasi oleh Formasi Crocker, Batuan Vulkanik dan Aluvium Muda. Formasi Crocker tersusun atas beberapa litologi batuan sedimen berupa batupasir, serpih dan lempung yang berumur Oligosen hingga Kuartir, Battuan Vullkanik tersusun tersusun atas dua litologi yaitu basal dan andesit

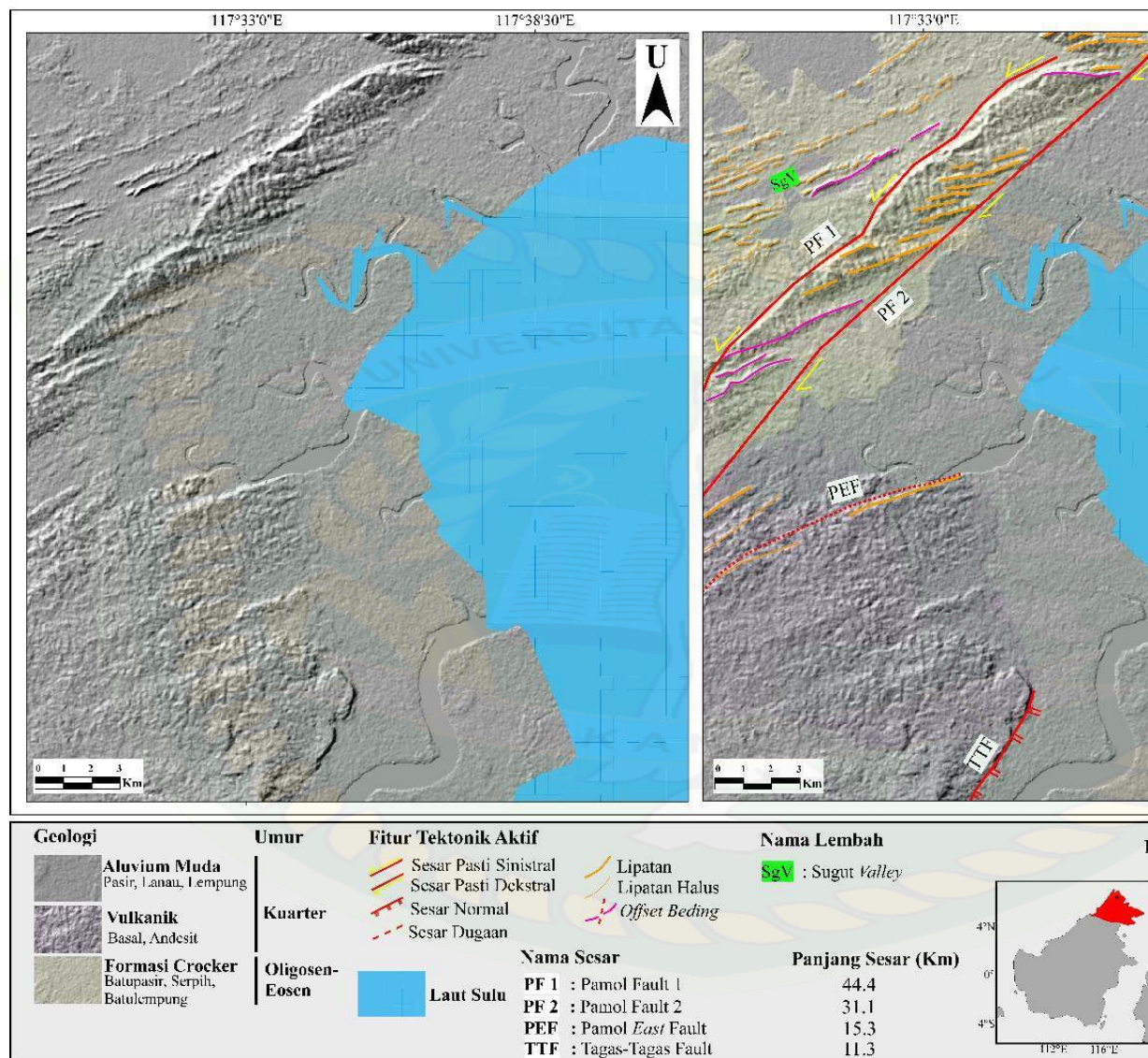
berumur Kuartar. Sedangkan Aluvium muda yang terdiri dari pasir, lanau dan lempung berumur Kuartar.



Gambar 4. 8 Analisis Diagram *Rose* (R4) Menunjukkan Dominasi Arah Punggungan Berarah Timurlaut - Baratdaya



Gambar 4. 9 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Botitian



Gambar 4. 10 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Kanionan

4.1.7 Pamol

Daerah Pamol memiliki empat sesar utama yaitu Sesar Pamol 1 (PF1), Sesar Pamol 2 (PF2), Sesar Botitian – Paraganpang (BPF) dan Sesar Meliau (MuF) (**Gambar 4.11**).

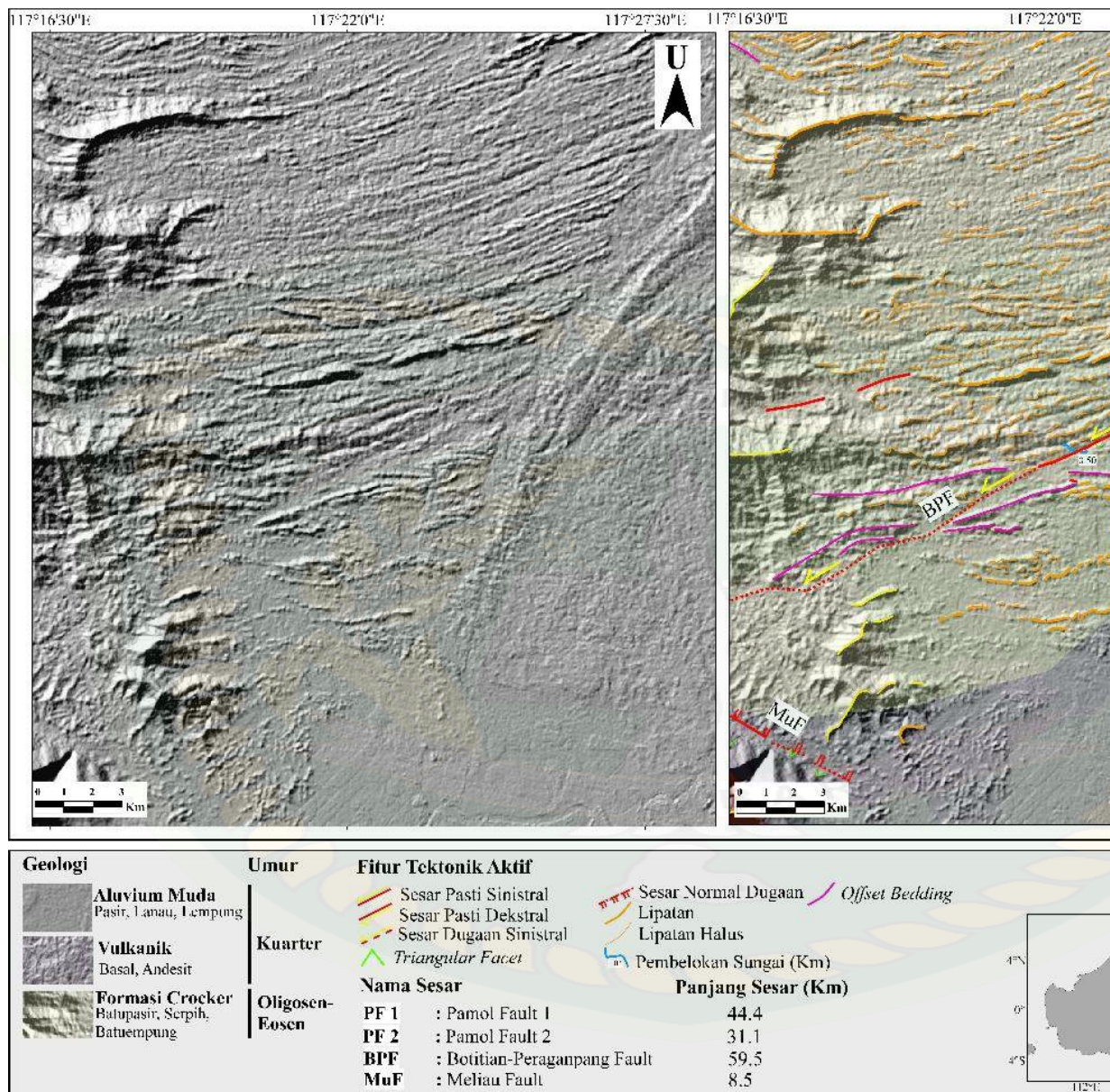
Fitur Tektonik Aktif lainnya yang dijumpai pada daerah ini adalah lipatan, punggungan dan *offset bedding* yang terbentuk oleh pergeseran sesar BPF, membentuk morfologi perbukitan tinggi dengan elevasi tertinggi mencapai 489 m pada bagian baratdaya.

Sesar Pamol 1 (PF1) diidentifikasi sebagai sesar geser mengiri (*sinistral*) dengan orientasi sesar timurlaut – baratdaya membentang sepanjang 44,4 km pada bagian barat laut. Sesar Pamol 2 (PF2) diidentifikasi sebagai sesar geser menganan (*dextral*) yang membentang sepanjang 31,1 km dengan orientasi sesar timurlaut – baratdaya pada bagian barat laut.

Sesar Botitian – Paraganpang (BPF) membentang sepanjang 59,5 km pada bagian selatan yang diidentifikasi sebagai sesar geser mengiri (*sinistral*) dan dijumpai beberapa pembelokan sungai dengan pembelokan rata rata 0,78 km serta dijumpai 1 bukit segitiga yang berasosiasi dengan sesar ini.

Sesar Meliau (MuF) membentang sepanjang 8,52 km pada bagian baratdaya daerah Pamol yang diidentifikasi sebagai sesar turun (*normal fault*) dan dijumpai bukit segitiga yang berasosiasi dengan sesar ini.

Geologi di daerah ini di dominasi oleh Formasi Crocker, Batuan Vulkanik dan Aluvium Muda. Formasi Crocker tersusun atas beberapa litologi batuan sedimen berupa batupasir, serpih dan lempung yang berumur Oligosen hingga Kuarter, Batuan Vulkanik tersusun atas dua litologi yaitu basal dan andesit berumur Kuarter. Sedangkan Aluvium muda yang terdiri dari pasir, lanau dan lempung berumur Kuarter.



Gambar 4. 11 Peta Geomorfologi Tektonik Daerah Pamol

4.2 Seismisitas

Analisis seismisitas pada daerah penelitian ditentukan dengan menganalisis sesar utama yang memiliki panjang >20 km, agar lebih representatif.

Pada daerah Beluran dan sekitarnya sebagian besar tidak memiliki nilai rekomendasi *Centroid Moment Tensor* (CMT) yang di berikan oleh *GeoMapAap*, adapun nilai CMT yang direkomendasikan tidak sesuai dengan parameter geomorfologi tektonik daerah yang dilintasi oleh sesar utama. 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.

Daerah penelitian memiliki lima sesar utama yaitu Sesar Pamol 1 (PF1), Sesar Pamol 2 (PF2), Sesar Linkabau (LF), Sesar Linkabau – Kias (LKF), Sesar Botitian – Paraganpang (BPF).

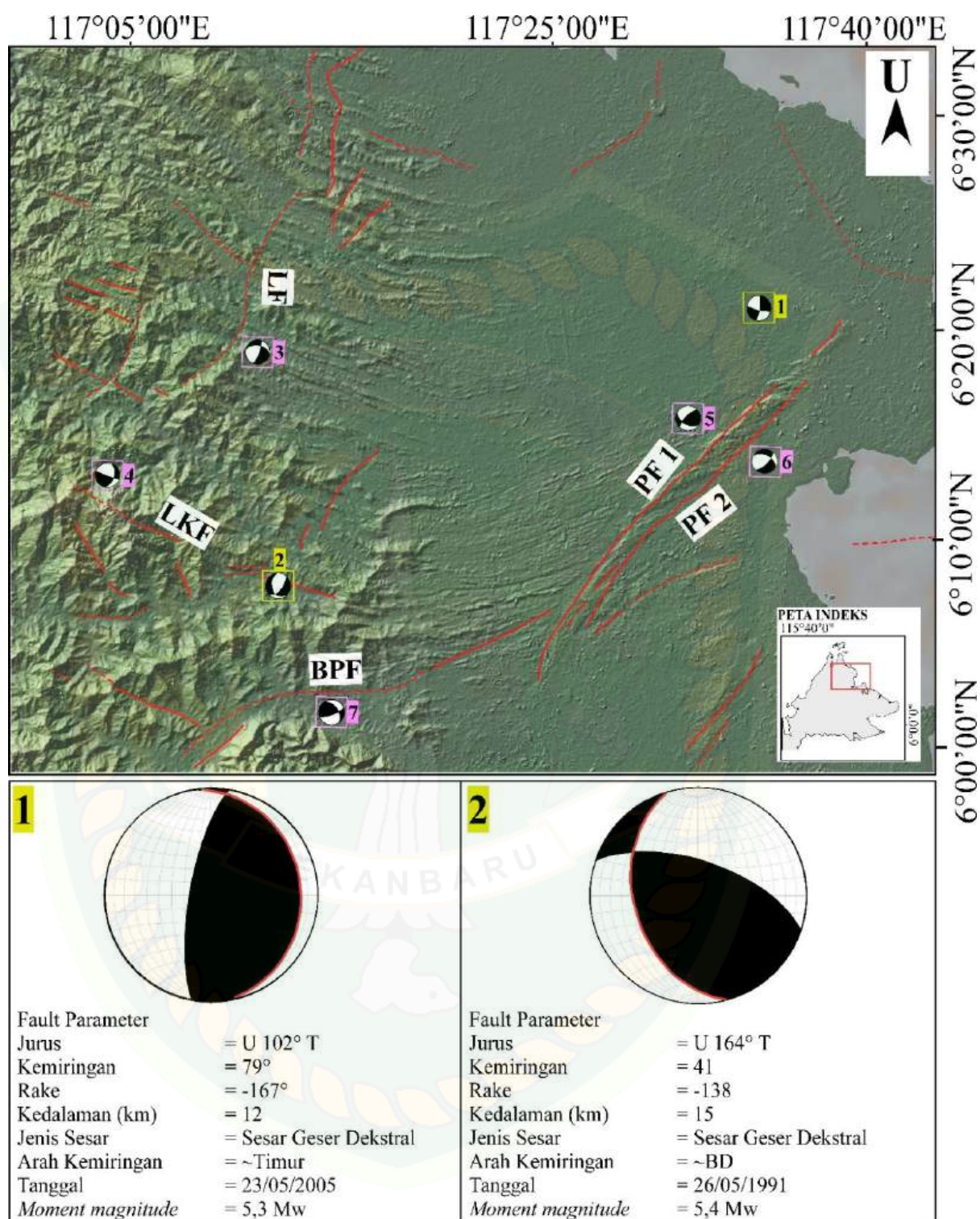
Nilai seismisitas (*Beachball*) PF1 yang di rekomendasikan *GeoMapAap* tidak sesuai, yaitu dengan arah jurus dan kemiringan $U102^\circ T/79^\circ$ ditunjukkan pada no 1 (**Gambar 4.12**). Nilai seismisitas ini tegak lurus terhadap arah lintasan sesar yang berdekatan yaitu Sesar Pamol 1 (PF1). Sesar PF1 berdasarkan geomorfologi tektonik memiliki arah geometri sesar timurlaut – baratdaya. sehingga penulis memberikan nilai rekomendasi jurus dan kemiringannya yaitu $U30^\circ T/79^\circ$ dapat dilihat pada no 5 (**Gambar 4.13**).

Sesar Pamol 2 (PF2) memiliki arah geometri sesar timurlaut – baratdaya. Nilai seismisitas (*Beachball*) PF2 tidak di rekomendasikan *GeoMapAap*, sehingga penulis memberikan nilai rekomendasi jurus dan kemiringannya yaitu $U45^\circ T/70^\circ$ dapat dilihat pada no 6 (**Gambar 4.13**).

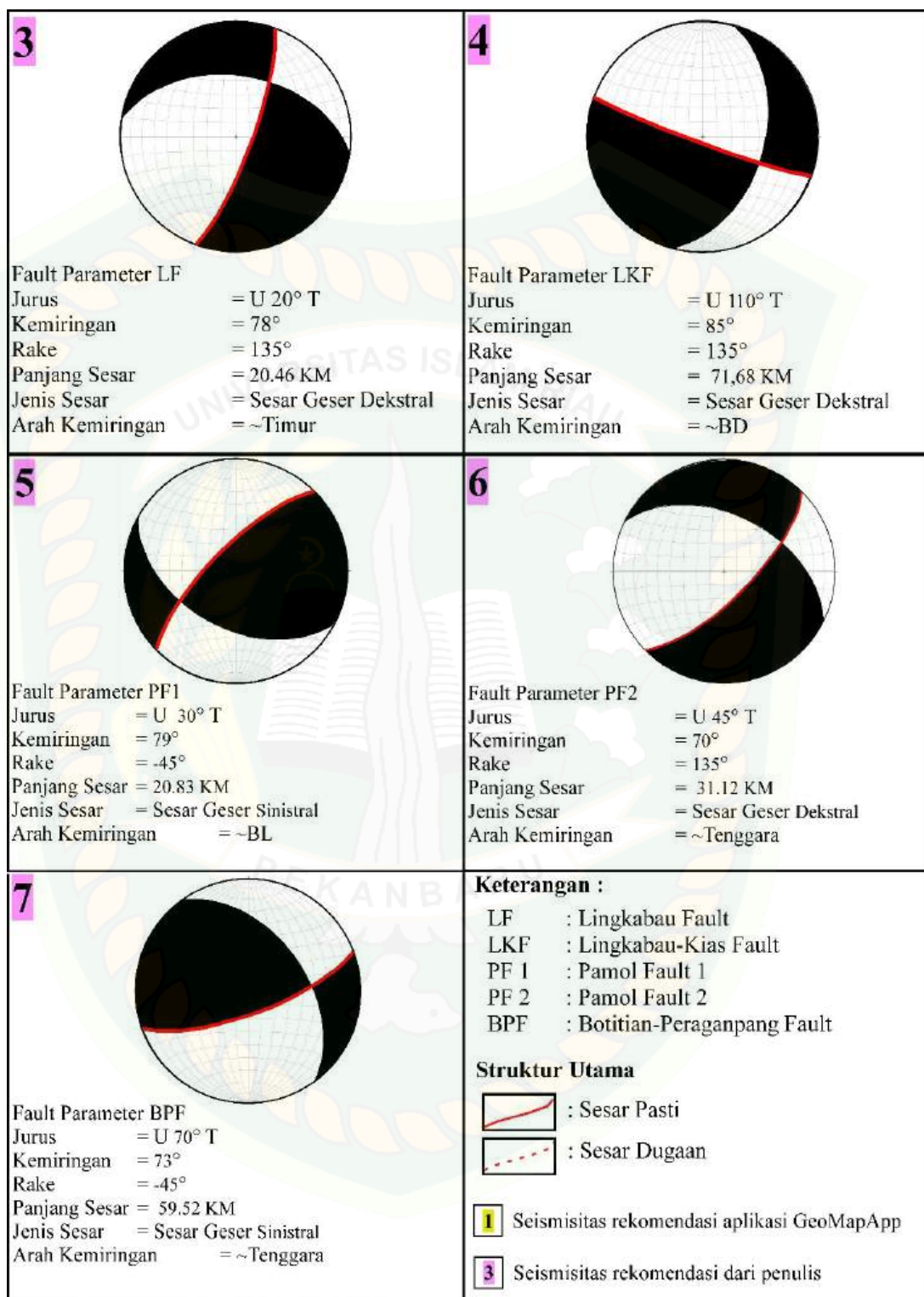
Sesar Botitian – Paraganpang (BPF) memiliki arah geometri sesar timurlaut – baratdaya. Nilai seismisitas (*Beachball*) BPF tidak di rekomendasikan *GeoMapAap*, sehingga penulis memberikan nilai rekomendasi jurus dan kemiringannya yaitu $U70^\circ T/73^\circ$ dapat dilihat pada no 7 (**Gambar 4.13**).

Sesar Linkabau – Kias (LKF) memiliki arah geometri sesar baratlaut – tenggara. Nilai seismisitas (*Beachball*) LKF yang direkomendasikan *GeoMapAap* tidak sesuai, yaitu dengan arah jurus dan kemiringannya $U164^{\circ}T/41^{\circ}$ dapat dilihat pada no 2 (**Gambar 4.12**). Hal ini tidak searah lintasan sebenarnya dari sesar LKF, sehingga penulis memberikan nilai rekomendasi jurus dan kemiringannya yaitu $U110^{\circ}T/85^{\circ}$ dapat dilihat pada no 4 (**Gambar 4.13**)

Sesar Linkabau (LF) memiliki arah geometri sesar timurlaut – baratdaya. Nilai sismisitasnya tidak direkomendasikan oleh aplikasi *GeoMapAap*, sehingga penulis memberikan nilai rekomendasi jurus dan kemiringannya $U20^{\circ}T/78^{\circ}$ dapat dilihat pada no 3 (**Gambar 4.13**).



Gambar 4. 12 Peta Seismisitas Daerah penelitian



Gambar 4. 13 Nilai Seismisitas Rekomendasi Penulis Untuk Parameter Sesar Utama Daerah penelitian

4.3 Skenario Gempabumi

Peta skenario 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 pewarnaan berbeda untuk setiap elemen. Setiap penampang merepresentasikan proyeksi sesar aktif berdasarkan parameter lebar sesar (w) ditandai dengan garis warna biru panjang sesar ditandai dengan garis warna merah, sedangkan proyeksi sesar ditandai dengan garis berwarna hitam.

Pada daerah penelitian terdapat lima sesar utama yang pergerakannya menyebabkan gempabumi di masa mendatang diantaranya: Sesar Linkabau (LF), Sesar Linkabau Kias (LKF), Sesar Botitian Paraganpang (BPF), Sesar Pamol 1 (PF1) dan Sesar Pamol 2 (PF2), ditunjukkan pada **Gambar 4.14**

Sesar Linkabau (LF) merupakan sesar dengan panjang geometri sesar 20,4 km, arah jurus timurlaut – baratdaya dan *rake* 135° . Sudut kemiringan sesar ini adalah 78° ke arah timur, dengan kedalaman dangkal 5,1 km, sesar ini diidentifikasi sebagai sesar geser mengiri (*sinistral*). 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 terimplementasi pada sesar ini di aplikasi seismik, sehingga penelitian ini diperlukan guna meningkatkan akurasi estimasi serta memperkuat pembaruan data M_w pada katalog seismik terbaru.

Sesar Linkabau – Kias (LKF) merupakan sesar dengan panjang geometri sesar 71,6 km, arah jurus baratlaut – tenggara dan *rake* 135° , sudut kemiringan sesar ini adalah 85° ke arah tenggara, dengan kedalaman 5 km. Sesar ini diidentifikasi sebagai sesar geser menganan (*dextral*). Berpotensi menyebabkan gempa dengan besaran *Moment magnitude* (M_w) mencapai 6,5 M_w di masa depan yang di klasifikasikan sebagai gempa kuat. Gempabumi terbesar yang pernah terjadi dua dekade terakhir disebabkan oleh sesar ini yaitu pada 26 Mei 1991 dengan kekuatan 5,4 M_w . Perhitungan prediksi *Moment magnitude* gempabumi yang dihasilkan oleh penulis hampir sama dengan besaran M_w peristiwa terakhir. Hal ini menunjukkan bahwa prediksi besaran gempabumi oleh penulis dapat diandalkan. *Seismic moment*

(M_0) dan *slip rate* (D) hasil dari deformasi sesar tersebut diperkirakan sekitar 6,5 Nm dan 6 m.

Sesar Botitian - Paraganpang (BPF) merupakan sesar dengan panjang geometri sesar 59,5 km, arah jurus timurlaut – baratdaya dan rake - 45°, sudut kemiringan sesar ini adalah 73° ke arah tenggara, dengan kedalaman dangkal 5,2 km sesar ini diidentifikasi sebagai sesar geser mengiri (*sinistral*). Berpotensi menyebabkan gempa dengan besaran *Moment magnitude* (M_w) mencapai 6,4 M_w di masa depan yang di klasifikasikan sebagai gempa kuat. Prediksi *Moment magnitude* ini belum pernah di rekomendasikan di aplikasi manapun, hal ini menunjukkan pentingnya penelitian prediksi ini untuk menambah basis data M_w secara akurat pada katalog seismik yang terbaru.

Sesar Pamol 1 (PF1) merupakan sesar dengan panjang geometri sesar 44,4 km, arah jurus timurlaut - baratdaya dan rake -45°, sudut kemiringan sesar ini adalah 79° ke arah baratlaut, dengan kedalaman dangkal 5 km sesar ini diidentifikasi sebagai sesar geser mengiri (*sinistral*). Berpotensi menyebabkan gempa dengan besaran *Moment magnitude* (M_w) mencapai 6 M_w di masa depan yang di klasifikasikan sebagai gempa kuat. *Seismic moment* (M_0) dan *slip rate* (D) hasil dari deformasi sesar tersebut diperkirakan sekitar 5,9 Nm dan 1,9 m.

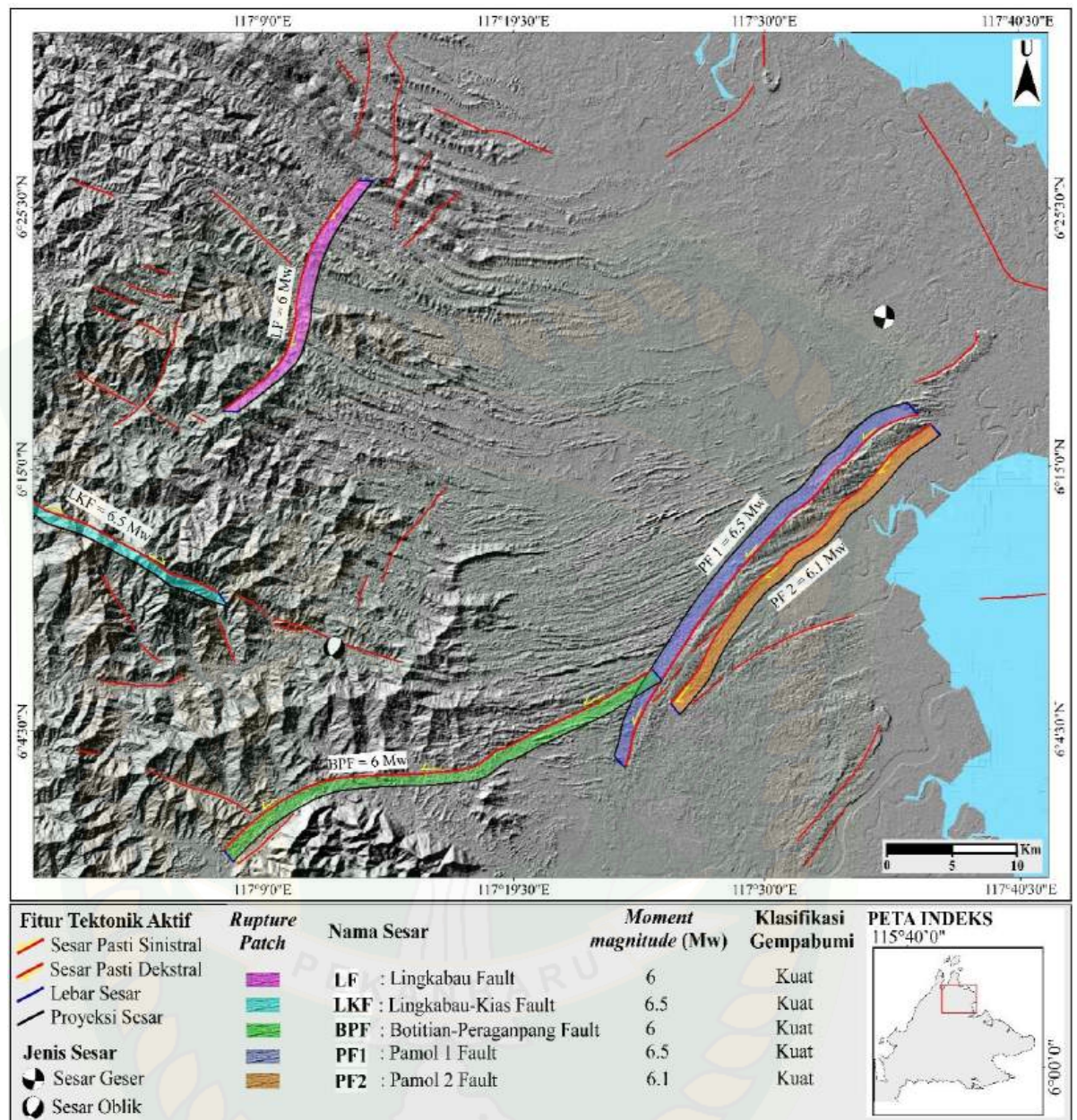
Sesar Pamol 2 (PF2) merupakan sesar dengan panjang geometri sesar 31,1 km, arah jurus timurlaut - baratdaya dan rake 135°, sudut kemiringan sesar ini adalah 70° ke arah tenggara, dengan kedalaman 5,3 km sesar ini diidentifikasi sebagai sesar geser mengangan (*dextral*). Berpotensi menyebabkan gempa dengan besaran *Moment magnitude* (M_w) mencapai 6,1 M_w di masa depan yang di klasifikasikan sebagai gempa kuat. Gempabumi terbesar yang pernah terjadi beberapa dekade disebabkan oleh PF1 dan PF2 ini yaitu pada 23 Mei 2005 dengan kekuatan 5,3. Perhitungan prediksi *Moment magnitude* gempabumi yang dihasilkan oleh penulis nilainya hampir berdekatan dengan besaran M_w peristiwa terakhir. Hal ini menunjukkan bahwa prediksi besaran gempabumi oleh penulis dapat diandalkan. Keseluruhan nilai parameter gempabumi yang dihasilkan oleh sesar utam 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)
Sesar Linkabau (LF)	20.40	D	5	4,8	100	6	5.9	1.9	Kuat
Sesar Linkabau - kias (LKF)	71.60	D	5	4,9	357	6.5	6.5	6	Kuat
Sesar Botitian - Paraganpang (BPF)	20.80	S	5	4,7	102	6.4	6.4	7.3	Kuat
Sesar Pamol 1 (PF1)	59.50	S	5	4,9	284	6	5.9	1.9	Kuat
Sesar Pamol 2 (PF2)	31.1	D	5	4,6	164	6.1	6.1	1.3	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. 14 Peta Skenario Gempabumi Daerah Penelitian

4.4 Bukti Lapangan Geomorfologi Tektonik

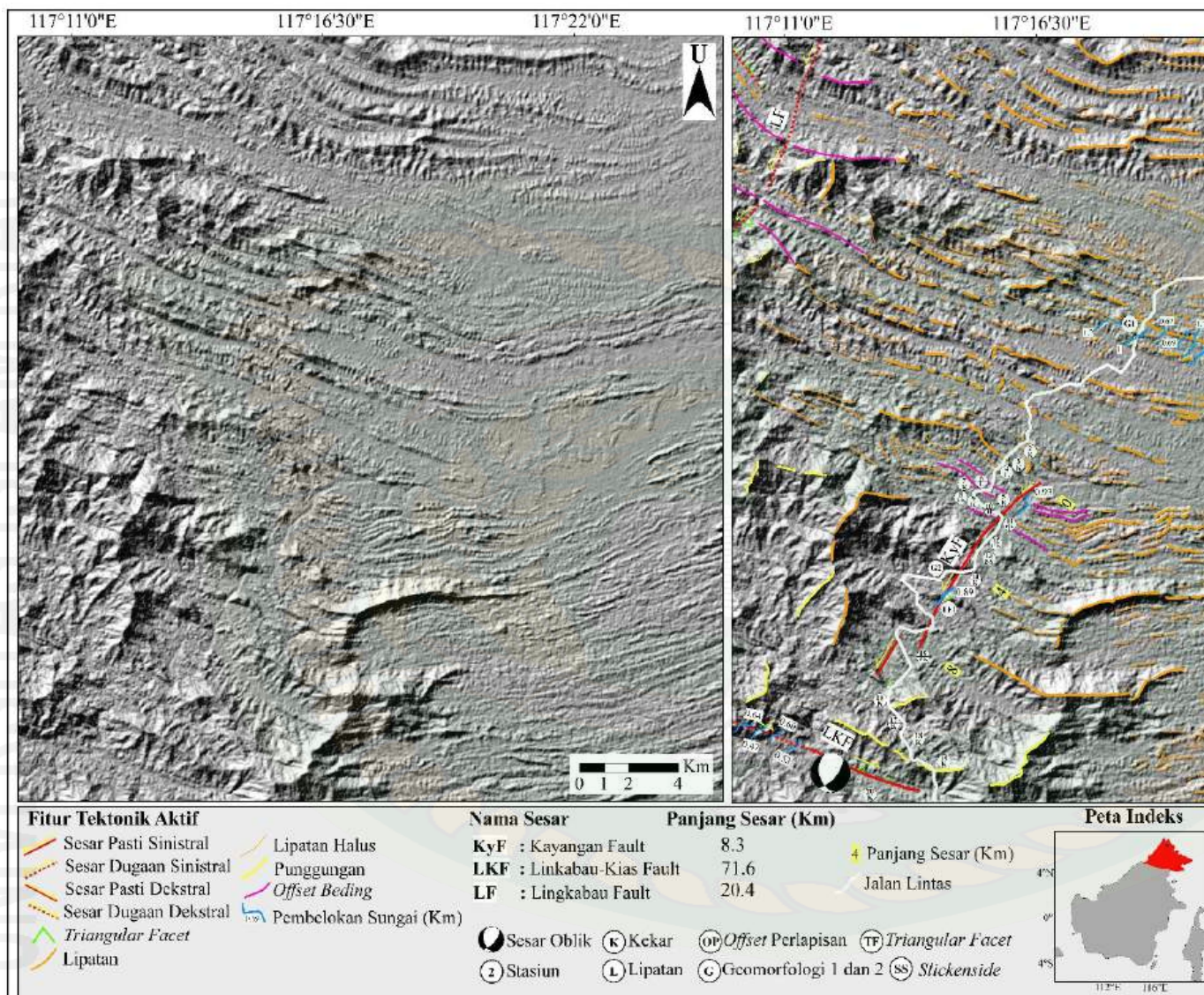
Pada daerah penelitian didapati beberapa bukti lapangan terkait deformasi tektonik seperti punggungan, lipatan dan bukit segitiga (*triangular facet*) dan *offset* perlapisan. Sebaran bukti lapangan deformasi permukaan di daerah penelitian dapat dilihat secara menyeluruh pada peta stasiun dan sebaran bukti lapangan (**Gambar 4.15**). Pada peta ini menyingkap beberapa bukti lapangan secara detail sepanjang Sesar Kayangan. Bukti Sesar Kayangan (KyF) ini dipilih disebabkan aksesnya yang mudah dijangkau dari Jalan lintas di daerah penelitian.

Adapun detail bukti lapangan geomorfologi tektonik pada Sesar Kayangan (KyF) yang dihitung dari orientasi timurlaut dari 0 – 4 km dijumpai pembelokan sungai dengan panjang *offset* 0,9 km, bukit segitiga (*triangular facet*), *offset* perlapisan, dan lipatan dari 12 stasiun singkapan batuan yang dijumpai. Kemudian dilanjutkan dari 4 – 8 km dijumpai punggungan yang di simbolkan huruf G2. Penjelasan rinci terkait fitur – fitur geomorfologi tektonik tersebut dijelaskan pada sub bab di bawah ini.

4.4.1 Punggungan

Pada daerah penelitian dijumpai punggungan yang terletak di daerah Paitan. Perbukitan tinggi ini memiliki arah aksial punggungan relatif berarah barat-timur, pada foto lapangan punggungan ini ditandai dengan garis berwarna kuning dan diberi simbol G1. Pada bukti lapangan yang dijumpai searah dengan lipatan mega yang hadir di daerah penelitian ditandai dengan garis berwarna oren, mengindikasikan kehadiran G1 hasil deformasi lipatan tersebut. (**Gambar 4.16**).

Daerah Linkabau terdapat bukti geomorfologi punggungan. Perbukitan ini memiliki arah punggungan dominan relatif arah yang sama dengan G1 iaitu barat-timur, ditandai dengan warna kuning yang berbanding tegak lurus dengan arah pergerakan Sesar Kayangan (KYF) yang berarah timurlaut – baratdaya ditandai dengan garis merah solid. Pada foto lapangan punggungan ini di tandai dengan garis berwarna kuning dan diberi simbol G2 (**Gambar 4.16**).



Gambar 4. 15 Peta Sebaran Bukti Lapangan Geomorfologi Tektonik Daerah Penelitian



Gambar 4. 16 Foto Geomorfologi Punggungan Pada Daerah Paitan (G1) dan Linkabau (G2)

4.4.2 Bukit Segitiga (*Triangular facet*)

Pada daerah Linkabau dijumpai bukit segitiga (*triangular facet*) di daerah Linkabau, dengan arah kemiringan bukit segitiga yang berarah timur. Sedangkan pada peta geomorfologi tektonik berarah barat, 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 Sesar Kayangan (KYF) 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.

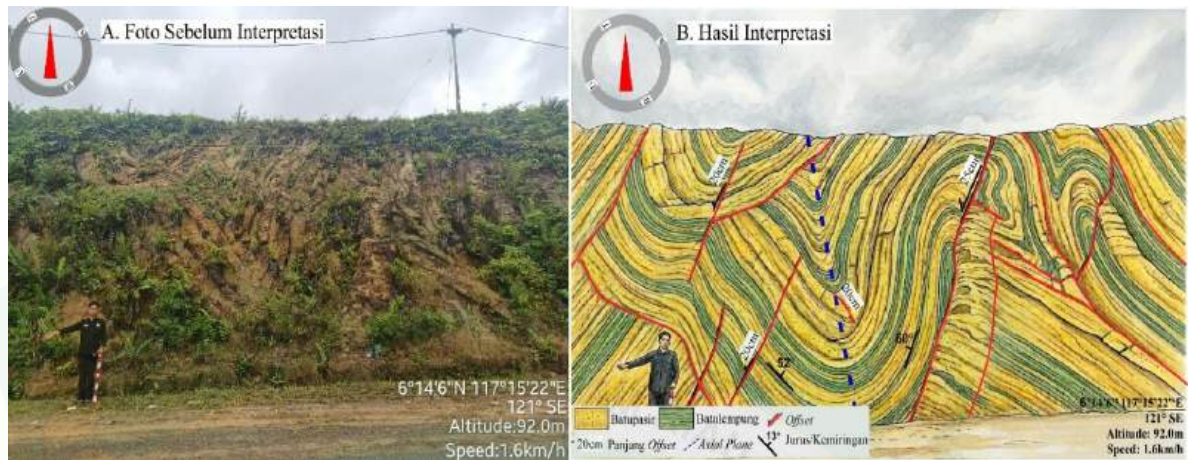


Gambar 4. 17 Foto Proyeksi Bukit Segitiga (*Triangular Facet*), (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Sesudah Interpretasi

4.4.3 Lipatan

Pada daerah penelitian khususnya kawasan Linkabau yang terdapat di Stasiun 4 dijumpai singkapan batuan perlapisan batupasir dan lempung yang mengalami deformasi dari pergerakan Sesar KYF didapati lipatan yang kemudian terpatahkan yang sebagian besar membentuk lipatan sinklin, dengan bacaan strike/dip sayap kanan : $N330^{\circ}E/60^{\circ}$ dan sayap kiri $N227^{\circ}E/52^{\circ}$, dengan nilai *interlimb* 49° , nilai *dip of axial surface* $N20^{\circ}E/65^{\circ}$ *plunge* nya $30^{\circ}/N57^{\circ}E$ dan yang mana pada klasifikasi fluety diklasifikasikan sebagai lipatan simetris dengan nama lipatan *Open Gently Plunging Fold*. Dijumpai

beberapa *offset* dengan pergerakan *offset* rata rata 21 cm, dapat dapat dilihat pada **Gambar 4.18**).



Gambar 4. 18 Foto Singkapan Stasiun 4 Yang Menunjukkan Adanya Lipatan, (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Setelah Interpretasi

4.4.4 *Offset* Perlapisan

Dijumpai *offset* sepanjang 40 dan 43 cm dengan arah relatif mengiri (*sinistral*) pada pada suatu singkapan stasiun 1 batuan di daerah Paitan, offset ini di identifikasi sebagai salah satu bentuk deformasi permukaan akibat aktivitas tektonik yang terbentuk saat pembentukan *Beluran Mega Fold* pada bagian utara Borneo. Singkapan ini memiliki dimensi lebar 6 m dan tinggi 2,3 m, merupakan singkapan batupasir dengan sisipan tipis lempung, dapat dilihat pada (**Gambar 4.19**).

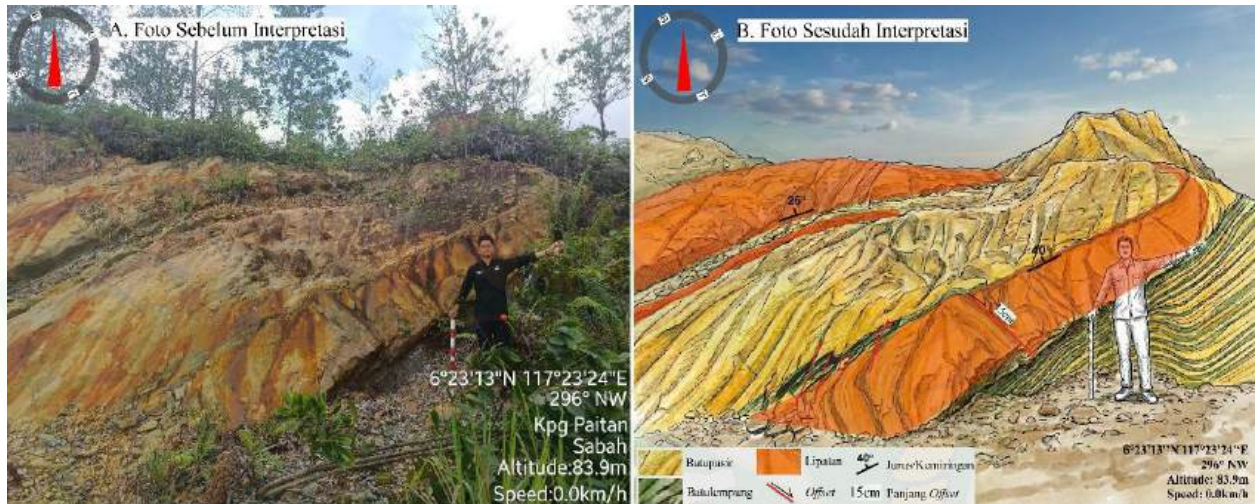


Gambar 4. 19 Foto *Offset* Pelapisan Pada Stasiun 1 (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Setelah Interpretasi

4.4.5 Singkapan Batuan

Pada daerah penelitian dijumpai 6 stasiun singkapan batuan yang memberikan informasi bukti adanya deformasi yang ada pada daerah penelitian. Diantaranya, pada stasiun 1 merupakan singkapan dengan dimensi panjang 6 m dan tinggi 2,5 m yang merupakan singkapan batupasir kasar, dijumpai lipatan dengan nilai jurus dan kemiringan sayap kanan $N170^{\circ}E/40^{\circ}$ dengan nilai *interlimb* 30° , nilai *dip of axial surface* $N20^{\circ}E/65^{\circ}$ dan *Plunge* $43^{\circ}/N15^{\circ}E$ yang mana pada klasifikasi fluety, 1964 diberi nama *close Steeply Inclined Gently Plunging Fold*. Terdapat beberapa offset pelapisan, dapat dilihat pada **Gambar 4.20**. Pada staisun 6 dijumpai singkapan dengan dimensi panjang 10 m dan tinggi 5 m serta di temukan lipatan dengan arah jurus/kemiringan (*strike/dip*) sayap kanan $N20^{\circ}E/40^{\circ}$ dan sayap kiri $N320^{\circ}E/60^{\circ}$, lipatan ini merupakan antiklin dengan nilai *interlimb* 120° , nilai *dip of axial surface* $N46^{\circ}E/81^{\circ}$ nilai *plunge* nya $24^{\circ}/N7^{\circ}E$ yang mana pada

klasifikasi fluety, 1964 diberi nama *close Upright Horizontal Fold*, dapat dilihat pada **Gambar 4.21**.



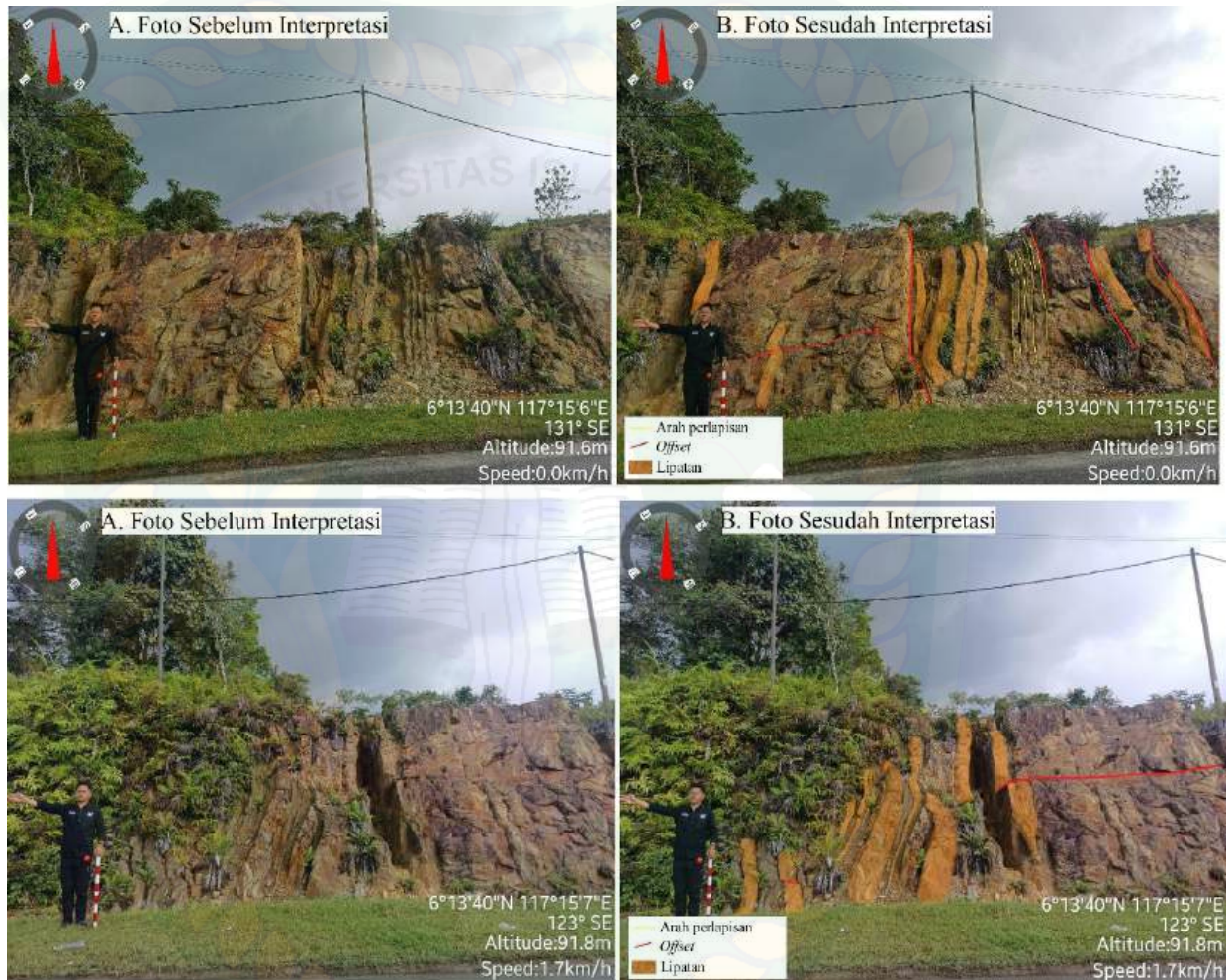
Gambar 4. 20 Foto Singkapan Stasiun 1, (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Setelah Interpretasi Menunjukkan Adanya Lipatan dan *Offset* Perlapisan



Gambar 4. 21 Foto Singkapan Stasiun 6, (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Setelah Interpretasi Menunjukkan Adanya Lipatan dan Perlapisan

Stasiun 8 ijumpai singkapan dengan dimensi panjang 7 m dan tinggi 2,4 m didapati pelapisan yang arah *strike/dip* nya N303°E/79°, pelapisan ini kemudian terlipat dan ter offsetkan (**Gambar 4.22**). Satasiun 11 dijumpai singkapan batuan dengan dimensi panjang 5 m dan tinglgi 4 m, pada singkapan ini didapati pelapisan batuan yang arah *strike/dip* nya N33°E/78°, pelapisan dari singkapan ini sesuai dengan peta bukti lapangan yang telah di buat yang memperlihatkan bahawasannya

pada stasiun ini merupakan bagian dari sayap kanan dari *Beluran Mega Fold*, singakapn ini dapat dilihat pada **Gambar 4.23**. Stasiun 12 dijumpai singkapan batuan yang memiliki dimensi panjang 5 m dan tinggi 4 m yang mana pada singkapan ini didapati pelapisan batuan dengan arah *strike/dip* N266°E/45°, pelapisan ini juga merupakan bagian sayap kiri dari *Beluran Mega Fold* dapat dilihat pada **Gambar 4.24**.



Gambar 4. 22 Foto Singkapan Stasiun 8, (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Setelah Interpretasi Menunjukkan Adanya Perlapisan Yang Terlipat dan *Offset* Perlapisan



Gambar 4. 23 Foto Singkapan Stasiun 11, (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Setelah Interpretasi Menunjukkan Adanya Perlapisan Batuan



Gambar 4. 24 Foto Singkapan Stasiun 12, (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Setelah Interpretasi Menunjukkan Adanya Perlapisan Batuan

Kemudian pada stasiun 13 dijumpai cermin sesar (*slickenside*) yang arah *strike/dip* nya $N249^{\circ}E/33^{\circ}$, cermin sesar ini merupakan bukti dari pergerakan sesar Kayangan (KyF) dapat dilihat pada **Gambar 4.25**. Singkapan stasiun 15 dijumpai pelapisan batuan yang arah *strike/dip* nya $N44^{\circ}E/60^{\circ}$, pelapisan dari singkapan ini merupakan bagian dari sayap kanan dari *Beluran Mega Fold*, singkapan ini dapat dilihat pada **Gambar 4.25**.



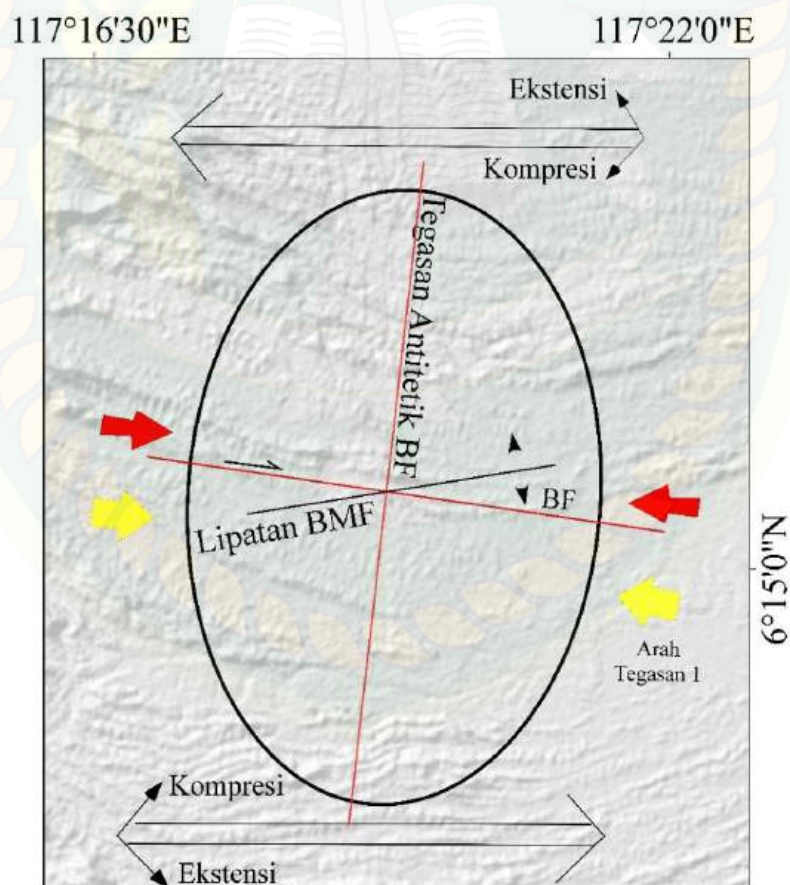
Gambar 4. 25 Foto Singkapan Stasiun 13, (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Setelah Interpretasi Menunjukkan Adanya Cermin Sesar (*Slickenside*)



Gambar 4. 26 Foto Singkapan Stasiun 15, (A) Foto Sebelum Interpretasi, (B) Foto Setelah Interpretasi Menunjukkan Adanya Perlapisan Batuan

4.5 Pemodelan *Strain Ellipsoid Riedl Shear*

Pemodelan *strain ellipsoid riedl shear* pada area penelitian (**Gambar 4.27**) menunjukkan hubungan kinematika antara arah tegasan utama dengan pembentukan struktur sekunder dalam zona sesar mendatar (*strike-slip fault zone*). Orientasi kompresi maksimum mengontrol perkembangan lipatan mega (*Beluran Mega Fold/BMF*) yang terbentuk hampir tegak lurus terhadap arah tegasan, sementara pergerakan Sesar Beluran (BF) berkembang sebagai struktur sintetik pada sudut lancip terhadap arah tegasan dan diikuti oleh sesar antitetik BF dengan orientasi berlawanan. Pola distribusi zona kompresi dan ekstensi di dalam *ellipsoid* menggambarkan diferensiasi regim deformasi akibat gaya geser menganan (dekstral). Secara keseluruhan, konfigurasi struktur tersebut menunjukkan bahwa deformasi berkembang melalui mekanisme pergeseran simpel (*simple shear*) yang menghasilkan kombinasi pergeseran simpel komposit dan ekstensi murni (*composite simple shear and extensional pure shear*).

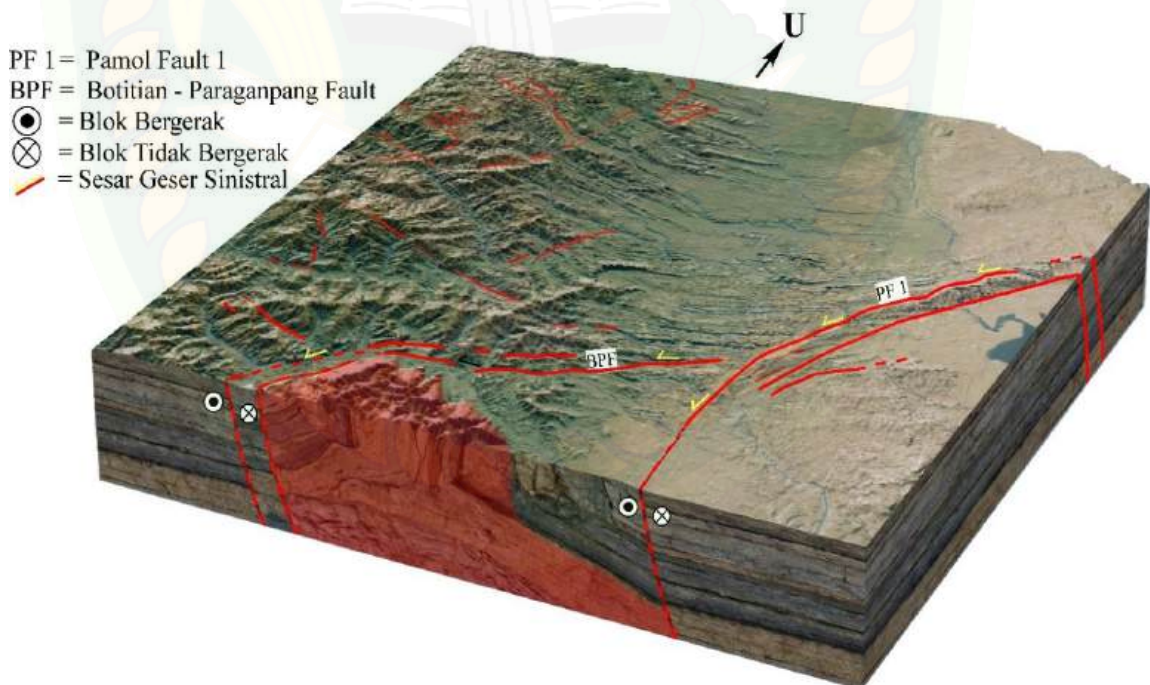


Gambar 4. 27 Pemodelan Sesar BF Pada Daerah Penelitian Menggunakan *Strain Ellipsoid Riedle Shear*

4.6 Pemodelan 3D Sesar Daerah Penelitian

Pada daerah penelitian garis merah merepresentasikan sebuah sesar. Sesar ini mempengaruhi geomorfologi pada daerah penelitian. Terdapat dua sesar yang mendominasi yaitu Sesar Pamol 1 (PF1) yang mana panjang sesar ini mencapai 31km dengan arah kemiringan 78° ke arah timur, diklasifikasikan sebagai sesar geser mengiri (*sinistral*) dengan arah orientasi pergerakan sesar timurlaut – baratdaya. Pergerakan Sesar Pamol 1 (PF1) dengan jenis sinistral dan Sesar Pamol 2 (PF2) dengan jenis dekstral sehingga mengakut Punggungan Pamol timurlaut-baratdaya yang terdapat *offset bedding* dan lipatan. Punggungan Pamol ini memotong *Beluran Mega Fold* di sepanjang lintasan PF1.

Sesar Botitian – Paraganpang (BPF) dengan panjang sesar mencapai 59 km, arah kemiringan 73° ke arah tenggara diklasifikasikan sebagai sesar geser mengiri (*sinistral*) dengan arah orientasi sesar timurlaut – baratdaya. Pergerakan BPF memotong lipatan *Beluran Mega Fold* di bagian barat daya, sehingga terbentuk 3 *offset bedding* sejauh 1,2 Km. Simbol lingkaran merupakan bagian blok sesar yang bergerak dan blok yang tidak bergerak di simbolkan dengan simbol X, dapat dilihat pada **Gambar 4.28**.



Gambar 4. 28 Pemodelan 3D Sesar Di Daerah penelitian

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan beberapa aspek seperti geomorfologi tektonik, sismisitas, skenario gempabumi dan bukti geomorfologi tektonik di lapangan guna menjawab rumusan masalah.

5.1.1 Geomorfologi Tektonik

Geomorfologi tektonik daerah penelitian dibagi menjadi beberapa daerah yaitu: Marmahat, Paitan, Takeban, Linkabau, Botitian, Kaniongan dan Pamol. Pada daerah penelitian dijumpai beberapa sesar utama yaitu Sesar Mamahat (MhF), Sesar Marmahat (MrF), Sesar Beluran (BF), Sesar Pamol 1 (PF1), Sesar Pamol 2 (PF2), Sesar Golong 1 (GIF1), Sesar Golong 2 (GIF2), Sesar Takeban 1 (TkF1), Sesar Takeban 2 (TkF2), Sesar Linkabau (LF), Sesar Matanggal (MaF), Sesar Moroli (MiF), Sesar Kayangan (KyF), Sesar Linkabau – Kias (LKF), Sesar Salulong (SIF), Sesar Giring (GF), Sesar Botitian Paraganpang (BPF), Sesar Pamol *East* (PEF), Sesar Tagas-tagas (TTF) dan Sesar Meliau (MuF).

Terdapat enam belas lembah di daerah penelitian yaitu: Lembah Mamahat (MV), Lembah Pamol (PV), Lembah Dalamas (DV), Lembah Takeban (TV), Lembah Jebawang (JV), Lembah Matanggal (MtV), Lembah Tampak (TtV), Lembah Linkabau (LV), lembah Sugut (SgV), Lembah Talidusa (TdV), Lembah Binsulung (BV), Lembah Salulong (SV), Lembah Sabang (SbV), Lembah Fortuna (FV) dan Lembah Paraganpang (PgV).

Dari hasil data geomorfologi tektonik di daerah penelitian dapat disimpulkan bahwasannya dominasi sesar pada daerah ini adalah sesar geser mengangan (*dextral*) dengan arah lintasan relatif timurlaut-baratdaya.

5.1.2 Seismisitas

Pada daerah penelitian beberapa sesar tidak di berikan nilai rekomendasi *Centroid Moment Tensor* oleh aplikasi *GeoMapApp* yang di interpretasikan 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*). Sesar Pamol 1 (PF1) $U30^{\circ}T/79^{\circ}$, Sesar Pamol 2 (PF2) $U45^{\circ}T/70^{\circ}$, Sesar Botitian – Paraganpang (BPF) $U70^{\circ}T/73^{\circ}$, Sesar Linkabau – Kias (LKF) $U110^{\circ}T/84^{\circ}$, Sesar Linkabau (LF) $U20^{\circ}T/78^{\circ}$.

5.1.3 Skenario Gempabumi

Pada daerah penelitian diperkirakan dapat terjadi gempabumi kuat dengan besaran nilai *Moment magnitude* (Mw) berkisar dari 6 hingga 6.5 Mw pada masa mendatang. Gempabumi ini diakibatkan oleh pergerakan Sesar Pamol 1 (PF1) 6 Mw, Sesar Pamol 2 (PF2) 6.1 Mw, Sesar Botitian – Paraganpang (BPF) 6.4 Mw, Sesar Linkabau – Kias (LKF) 6.5 Mw, Sesar Linkabau (LF) 6 Mw.

5.1.4 Bukti Lapangan Geomorfologi Tektonik

Pada daerah penelitian dijumpai beberapa bukti terkait deformasi permukaan akibat aktifitas tektonik seperti punggungan yang dijumpai di daerah Paitan yang membentang dari timur – barat ditandai dengan G1 dan punggungan pada daerah Linkabau yang membentang dari timurlaut – baratdaya ditandai dengan simbol G2.

Bukit segitiga (*triangular facet*) dengan arah kemiringan berarah tenggara dijumpai di daerah Linkabau ditandai dengan garis segitiga berwarna hijau dan diberi simbol TF.

Lipatan pada daerah penelitian dijumpai pada stasiun 1, 4 dan 6 yang mana pada stasiun 1 diklasifikasikan sebagai *close steeply inclined gently plunging fold*, stasiun 4 didominasi oleh antiklin yang diklasifikasikan sebagai *open gently plunging fold* dan stasiun 6 merupakan diklasifikasikan sebagai *close Upright Horizontal Fold*.

Offset pada singkapan batuan dijumpai pada stasiun satu yang mana singkapan ini memiliki dimensi lebar 6 m dan tinggi 2,3 m, *offset* ini memiliki ukuran panjang 40 dan 43 cm dengan arah relatif mengiri (*sinistral*).

Pada daerah penelitian dijumpai enam stasiun singkapan batuan yang memberikan informasi bukti adanya deformasi tektonik. Yaitu pada stasiun 1,

6, 8, 11, 12, 13, 15 pada stasiun-stasiun ini dijumpai lipatan, pelapisan batuan, *offset* lapisan dan cermin sesar (*slickenslide*).

5.2 Saran

Potensi gempa bumi di masa mendatang diperkirakan akan berkisar antara 6 Mw hingga 6,5 Mw diklasifikasikan sebagai gempa kuat dan berpotensi berdampak langsung pada beberapa lembah dengan tingkat kepadatan penduduk yang tinggi, seperti Lembah Fortuna (FV), Lembah Paitan (PV), Lembah Binsulung (BV) dan Lembah Linkabau (LV). Kondisi ini menuntut adanya langkah-langkah mitigasi yang terencana dan segera oleh Pemerintah setempat guna mengurangi risiko korban jiwa dan kerugian lainnya. Upaya mitigasi tersebut mencakup 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 pengaturan jalur bantuan yang memadai dan mudah diakses.

Penelitian ini penting untuk dipublikasikan sebagai artikel ilmiah agar dapat menjadi sumber informasi dan dasar pertimbangan bagi pengambil kebijakan. Produk yang dihasilkan, seperti peta geomorfologi tektonik, peta seismisitas, dan peta skenario gempa bumi di wilayah ini, belum pernah disusun maupun dikaji secara komprehensif sebelumnya. Oleh karena itu, penelitian lanjutan dengan pendekatan serupa diperlukan untuk meningkatkan kesiapan masyarakat dan pemerintah terhadap potensi gempa di masa mendatang. Selain itu, sejumlah nilai *Centroid Moment Tensor* (CMT) yang sebelumnya belum direkomendasikan oleh *GeoMapApp* telah dievaluasi dan direkomendasikan kembali oleh penulis. Temuan ini menunjukkan pentingnya verifikasi, revisi, dan standarisasi kegempaan data secara kolaboratif antar instansi dan peneliti kebumihan, dengan mengintegrasikan analisis geomorfologi tektonik dan data seismik instrumental.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, W. H., Lee, Y. H., dan Tongkul, F. (2021). *Active tectonics in Sabah: New insights from earthquake data and fault mapping*. *Journal of Asian Earth Sciences*, 215, 104759. 10.1016/j.jseaes.2021.104759
- Allen, P. A., dan Allen, J. R. (2005). *Basin Analysis: Principles and Applications*. Blackwell Publishing.
- Allen, P. A., dan Allen, J. R. (2005). *Basin analysis: Principles and applications (2nd ed.)*. Blackwell Publishing. 10.1002/9781444347166
- Allen, P.A., dan Allen, J.R. (2013). *Basin Analysis: Principles and Application to Petroleum Play Assessment (3rd ed.)*. Wiley-Blackwell.
- Allmendinger, R.W. (2001). *FaultKin 4.0: A Windows program for analysis of fault-slip data*. Cornell University. Allmendinger, R.W., Cardozo, N., dan Fisher, D. (2012). *Structural Geology Algorithms: Vectors and Tensors*. Cambridge University.
- Barber, A. J., Crow, M. J., dan Milsom, J. S. (2005). *Sumatra: Geology, resources and tectonic evolution*. Geological Society of London.
- Bennison, G. M., Moseley, K. A., dan Tucker, M. E. (2011). *An introduction to geological structures and maps (8th ed.)*. Hodder Education.
- Blaschke, T. (2010). *Object based image analysis for remote sensing*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1), 2–16.
- Burbank, D. W., dan Anderson, R. S. (2011). *Tectonic geomorphology (2nd ed.)*. Wiley-Blackwell. 10.1002/9781444345063
- 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.
- Christensen, N. I. (1996). *Poisson's ratio and crustal seismology*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B2), 3139–3156.

- Christie-Blick, N., dan Biddle, K. T. (1985). Deformation and basin formation along strike-slip faults. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 37, 1–34.
- Clark, D., McPherson, A., dan Van Dissen, R. (2004). Long-term behavior of Australian stable continental region (SCR) faults. Tectonophysics, 385(1–4), 1–27.
- Clarke, G. L., Klepeis, K. A., dan Rushmer, T. (1997). Rocks in transition: The brittle–ductile transition in the crust. Journal of Metamorphic Geology, 15(1), 1–17.
- Clarke, G. L., White, R. W., dan Ireland, T. R. (1997). Sillimanite, kyanite, garnet, rutile, quartz assemblages: P–T constraints and evidence for high-pressure melting in pelitic metasedimentary rocks. Journal of Metamorphic Geology, 15(2), 203–221.
- Clarke, M. C. G., dkk. (1997). Geology of the Tawau Area.
- Dahlen, F. A., dkk. (1984). Mechanics of fold-and-thrust belts.
- Davis, G. H., dan Reynolds, S. J. (1996). Structural geology of rocks and regions (2nd ed.). Wiley. Billings, M. P. (1972). Structural geology (3rd ed.). Prentice Hall.
- Fossen, H. (2016). *Structural geology* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316481230>
- Fossen, H. (2016). Structural geology (2nd ed.). Cambridge University.
- Fossen, H., dan Tikoff, B. (1998). Extended models of transpression and transtension, and application to tectonic settings. Journal of Structural Geology, 20(8), 1125–1137.
- 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.

- Grohmann, C. H. (2004). Morphometric analysis in geographic information systems: Applications of free software GRASS and R. *Computers dan Geosciences*, 30(10), 1055–1067. 10.1016/j.cageo.2004.08.002
- Gutenberg, B. dan Richter, C.F. (1954). *Seismicity of the Earth*.
- Hacker, B. R. (1996). Differential stress and strain rate during metamorphism of calcite marbles. *Geology*, 24(10), 945–948.
- Hacker, B. R. (1996). Eclogite formation and the rheology, buoyancy, seismicity, and H₂O content of oceanic crust. *Geophysical Monograph Series*, 96, 337–346. 10.1029/GM096p0337
- Hall, R. (1996). Reconstructing Cenozoic SE Asia. In R. Hall dan D. Blundell (Eds.), *Tectonic evolution of Southeast Asia* (Vol. 106, pp. 153–184). Geological Society of London. 10.1144/GSL.SP.1996.106.01.10
- Hall, R. (2002). Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(4), 353–431.
- Hall, R. (2013). The palaeogeography of Sundaland and Wallacea since the Late Jurassic. *Journal of Limnology*, 72(s2), 1–17.
- Hall, R., Cottam, M.A., dan Wilson, M.E.J. (2008). *The SE Asian Gateway: History and Tectonics of the Australia–Asia Collision*. Geological Society, London, Special Publications, 355, 1–33.
- Hamilton, W. B. (1979). *Tectonics of the Indonesian region* (Vol. 1078). U.S. Geological Survey. 10.3133/pp1078
- Handy, M. R., dkk. (1999). *Crustal Rheology and Deformation*.
- Handy, M. R., Hirth, G., dan Bürgmann, R. (1999). Continental fault structure and rheology from the frictional-to-viscous transition downward. *Tectonophysics*, 308(1–2), 1–28.

Handy, M. R., Hirth, G., dan Burgmann, R. (1999). Plastic deformation of the continental lithosphere: A review of observations and mechanisms. Geological Society, London, Special Publications, 54(1), 179–190.

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>

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>

Hanks, T. C., dan Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5), 2348–2350.

Hatcher, R. D. (1995). Structural geology: Principles, concepts, and problems (2nd ed.). Prentice Hall.

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

Hutchison, C. S. (2005). Geology of North-West Borneo: Sarawak, Brunei and Sabah. Elsevier. 10.1016/B978-044452743-0/50000-4

Jackson, J. A. (2002). Strength of the continental lithosphere: Time to abandon the jelly sandwich? *GSA Today*, 12(9), 4–10.

Jackson, J., dan McKenzie, D. (1988). The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East. *Geophysical Journal International*, 93(1), 45–73.

Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 82(20), 2981–2987. <https://doi.org/10.1029/JB082i020p02981>

Kanamori, H. (1977). The Energy Release in Great Earthquakes. *Journal of Geophysical Research*.

Kanamori, H., dan Brodsky, E. E. (2004). The physics of earthquakes. *Reports on Progress in Physics*, 67(8), 1429–1496. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/67/8/R03>

- Keller, E. A., dan Pinter, N. (2002). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*. Prentice Hall.
- Keller, E. A., dan Pinter, N. (2002). *Active tectonics: Earthquakes, uplift, and landscape* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Keller, E.A., DeVecchio, D.E., dan Gurrola, L.D. (2015). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape* (3rd ed.). Cambridge University.
- Lay, T., dan Wallace, T. C. (1995). *Modern global seismology*. 10.1016/B978-012732870-6/50000-2
- Lay, T., dan Wallace, T. C. (1995). *Modern global seismology*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-732870-6.X5000-6>
- Lee, Y. H., dan Abdullah, W. H. (2019). Reassessment of fault activity in Sabah based on remote sensing and geophysical data. *Journal of Asian Earth Sciences*, 177, 58–70. 10.1016/j.jseaes.2019.03.010
- Lindsey, E. O., dan Fialko, Y. (2021). Geodetic constraints on earthquake cycle deformation in southern California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(3).
- Lisle, R. J., Brabham, P., dan Barnes, J. W. (2011). *Basic geological mapping* (5th ed.). Wiley-Blackwell.
- Marrett, R., dan Allmendinger, R. (1990). Kinematic analysis of fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, 12(8), 973–986. 10.1016/0191-8141(90)90093-E
- Marshak, S. (2015). *Dasar-dasar Geologi* (edisi ke-5). WW Norton dan Company.
- McCaffrey, R. (2009). The tectonic framework of the Sumatran subduction zone. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37, 345–366.
- McClay, K. R. (1991). *The geometry of normal faults*. Geological Society Special Publication.
- McGarr, A. (2014). Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection. *Journal of Geophysical Research*.

- McKenzie, D. (1978). Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 40(1), 25–32.
- McKenzie, D. (1984). The generation and compaction of partially molten rock. *Journal of Petrology*, 25(3), 713–765.
- McNutt, S.R. (2005). Volcanic Seismology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*.
- Mills, S. C. (2011). Geomorphic signatures of active tectonics in a continental interior: Examples from southern Alberta, Canada. *Geomorphology*, 128(3–4), 199–211. 10.1016/j.geomorph.2011.01.021
- Mills, S. C. (2011). Integration of geomorphic and seismic data in active tectonics research. *Journal of Structural Geology*, 33(6), 904–917.
- Montgomery, D. R. (2001). Slope distributions, threshold hillslopes, and steady-state topography. *American Journal of Science*, 301(4–5), 432–454.
- Moore, E. M., dan Twiss, R. J. (1995). *Tectonics*. W. H. Freeman.
- Moss, S. J., dan Wilson, M. E. J. (1998). Biostratigraphy and Evolution of Tertiary Forearc Basin Strata, Central Borneo, Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 16(1), 1–12.
- Narkhede, V. S., dan Patil, K. S. (2014). Lineament extraction from SRTM DEM using open-source tools: A case study from Deccan traps. *International Journal of Remote Sensing dan Geoscience*, 3(4), 1–5.
- Nicolas, A., dan Collette, B. J. (1990). *Ophiolites and Oceanic Lithosphere*.
- Nicolas, A., dan Collette, B. J. (1990). *Structural geology of ophiolites*. Kluwer Academic Publishers.
- Nicolas, A., dan Collette, B. J. (1990). *Structure of ophiolites and dynamics of oceanic lithosphere*. Springer-Verlag.
- Ouimet, W. B., Whipple, K. X., dan Granger, D. E. (2009). Beyond threshold hillslopes: Channel adjustment to base-level fall in tectonically active mountain ranges. *Geology*, 37(7), 579–582.

- Papeschi, S. (2020). Chevron folds and their significance in understanding fold mechanisms. *Geological Journal*, 55(3), 2001–2016.
- Pubellier, M., dan Morley, C. K. (2014). The basins of Sundaland (SE Asia): Evolution and boundary conditions. *Marine and Petroleum Geology*, 58, 555–578.
- Ramsay, J. G., dan Huber, M. I. (1987). The techniques of modern structural geology: Volume 2: Folds and fractures.
- Ramsay, J. G., dan Lisle, R. J. (2000). The techniques of modern structural geology: Volume 3: Applications of continuum mechanics in structural geology.
- Ranalli, G. (1995). *Rheology of the Earth*. Chapman dan Hall.
- Scholz, C. H. (2002). *The mechanics of earthquakes and faulting* (2nd ed.). Cambridge University.
- Scholz, C. H. (2002). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge University.
- Shah, A. A., dan Sieh, K. (2013). Rupture and segmentation of the 2008 Wenchuan earthquake fault, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2A), 970–981.
- Shyu, J. B. H., Sieh, K., dan Chen, Y. G. (2005). Tandem faults along the western foothills of Taiwan: Kinematics, geomorphology, and geologic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B8).
- Sibson, R. H. (1977). Fault rocks and fault mechanisms. *Journal of the Geological Society*, 133(3), 191–213. 10.1144/gsjgs.133.3.0191
- Sibson, R. H. (1982). Fault zone models, heat flow, and the depth distribution of earthquakes in the continental crust of the United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(1), 151–163.
- Tongkul, F. (1995). The Quaternary fault systems of Sabah. *Geological Society of Malaysia Bulletin*, 37, 139–145.

- Sili, E., dan Murjaya, D. (2022). Identifikasi jalur sesar menggunakan DEM dan analisis spasial di daerah seismik aktif. *Jurnal Geosains*, 19(2), 75–85.
- Stein, S., dan Wysession, M. (2003). *An introduction to seismology, earthquakes, and Earth structure*. Blackwell Publishing. 10.1002/9781118688167
- Suppe, J. (1985). *Principles of structural geology*. Prentice Hall.
- Tongkul, F. (1997). Deformasi polifase di daerah Telupid, Sabah, Malaysia. *Jurnal Ilmu Bumi Asia*, 15 (2-3), 175-183.
- Tongkul, F. (2017). Active tectonics in Sabah: Reality or myth? *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 63, 29–36. 10.7186/bgsm63201703
- Twiss, R. J., dan Moores, E. M. (2007). *Structural geology* (2nd ed.). W. H. Freeman.
- Twiss, R. J., dan Moores, E. M. (2007). *Structural geology* (2nd ed.). W. H. Freeman.
- Carrara, A., Bitelli, G., dan Carla, R. (1998). Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(7), 611–634.
- Van der Pluijm, B. A., dan Marshak, S. (2004). *Earth structure: An introduction to structural geology and tectonics* (2nd ed.). W. W. Norton dan Company.
- Wang, H. (2011). Application of GeoRose in geological data visualization. *Geoscience Frontiers*, 2(2), 237–244.
- 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.
- Wesnousky, S. G. (1986). Earthquake models and historic seismicity of the intermountain belt, USA. *Tectonics*, 5(6), 815–825. <https://doi.org/10.1029/TC005i006p00815>
- White, J. C., dkk. (2006). Rheology and fabric development in experimentally sheared granitoids. *Tectonophysics*, 427(1–4), 141–160.

Widiyantoro, S., Gunawan, E., Muhari, A., Rawlinson, N., Mori, J., Hanifa, NR, ... dan Putra, HE (2020). Implikasi gempabumi *megathrust* dan tsunami dari celah seismik di selatan Jawa, Indonesia. *Laporan ilmiah* , 10 (1), 15274.

Yeats, R.S., Sieh, K., dan Allen, C.R. (1997). *The Geology of Earthquakes*. Oxford University.



LAMPIRAN

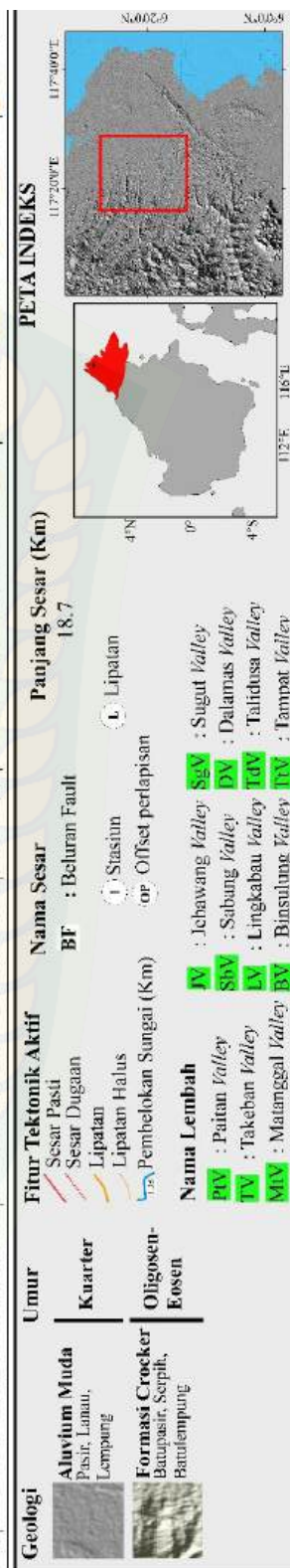
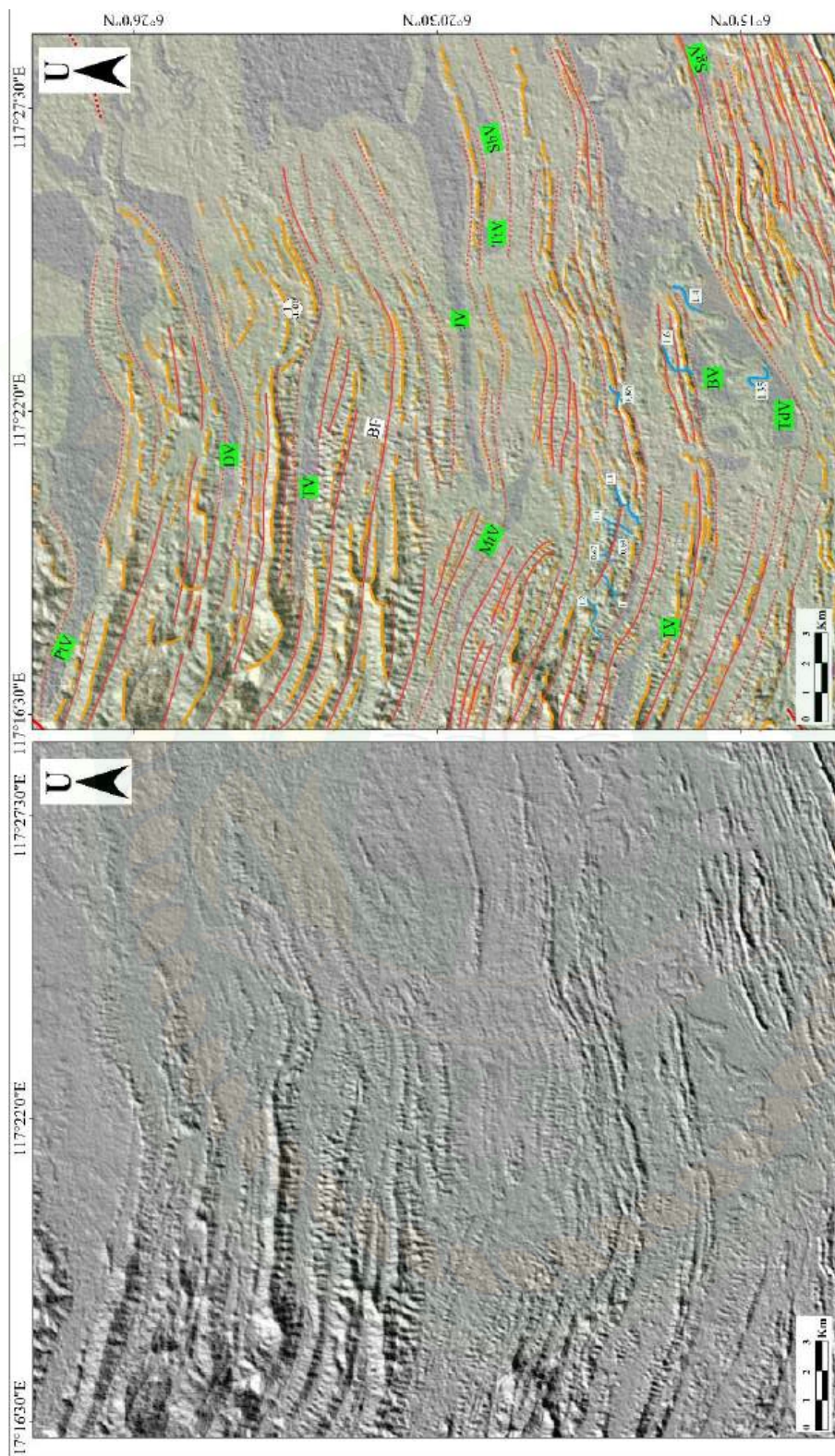
Tabel Perhitungan *Moment Magnitude*

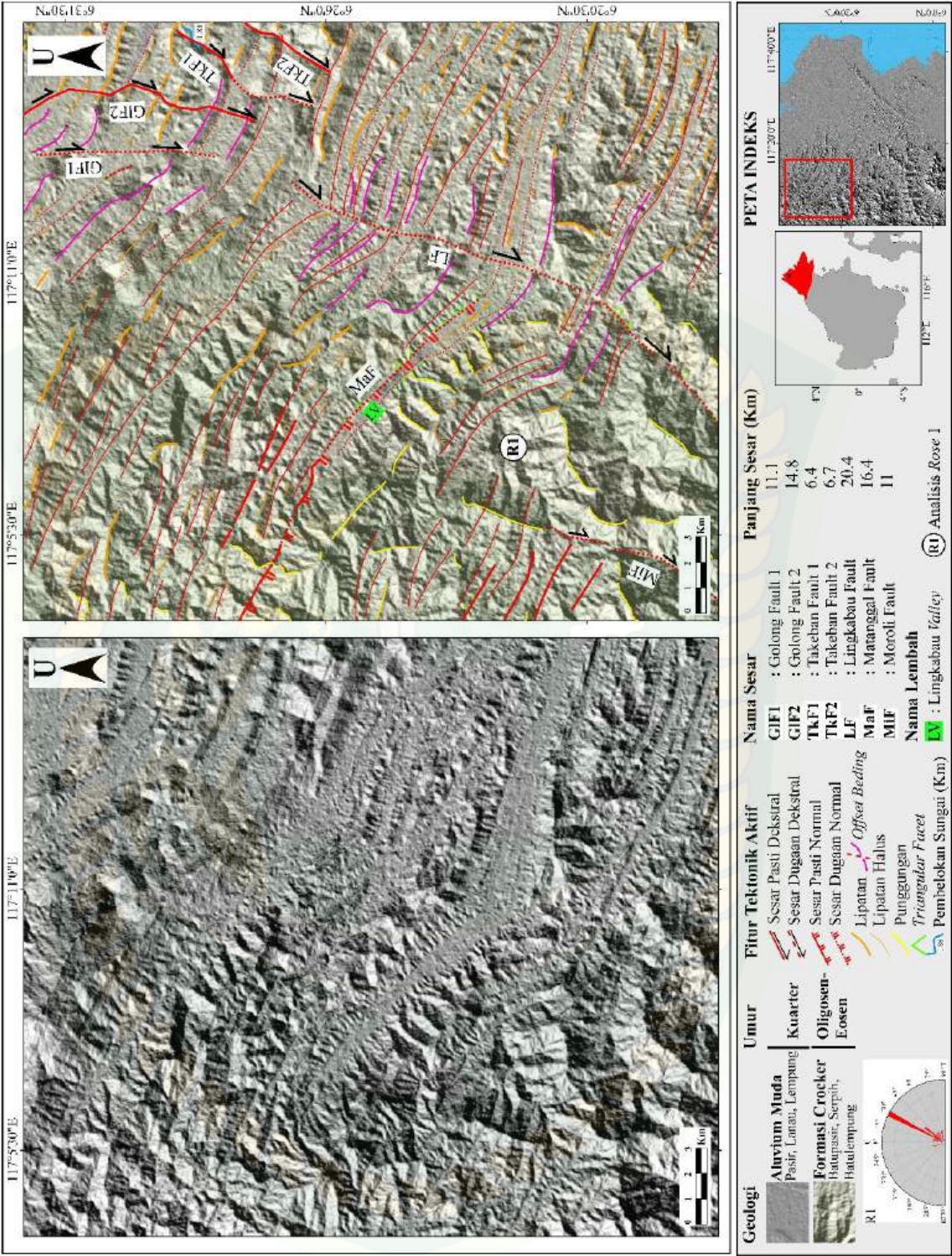
Nama Sesar	L	Jenis Sesar (D)	Downdip Limit ^o	W	A	Mw	Mo	D	Klasifikasi Gempabumi
	(a)	(b)	(c)	(h)	(d)	(e)	(f)	(g)	(i)
Sesar Linkabau (LF)	20.40	D	5	4,8	100	6	5.9	1.9	Kuat
Sesar Linkabau - kias (LKF)	71.60	D	5	4,9	357	6.5	6.5	6	Kuat
Sesar Botitian - Paraganpang (BPF)	20.80	S	5	4,7	102	6.4	6.4	7.3	Kuat
Sesar Pamol 1 (PF1)	59.50	S	5	4,9	284	6	5.9	1.9	Kuat
Sesar Pamol 2 (PF2)	31.1	D	5	4,6	164	6.1	6.1	1.3	Kuat

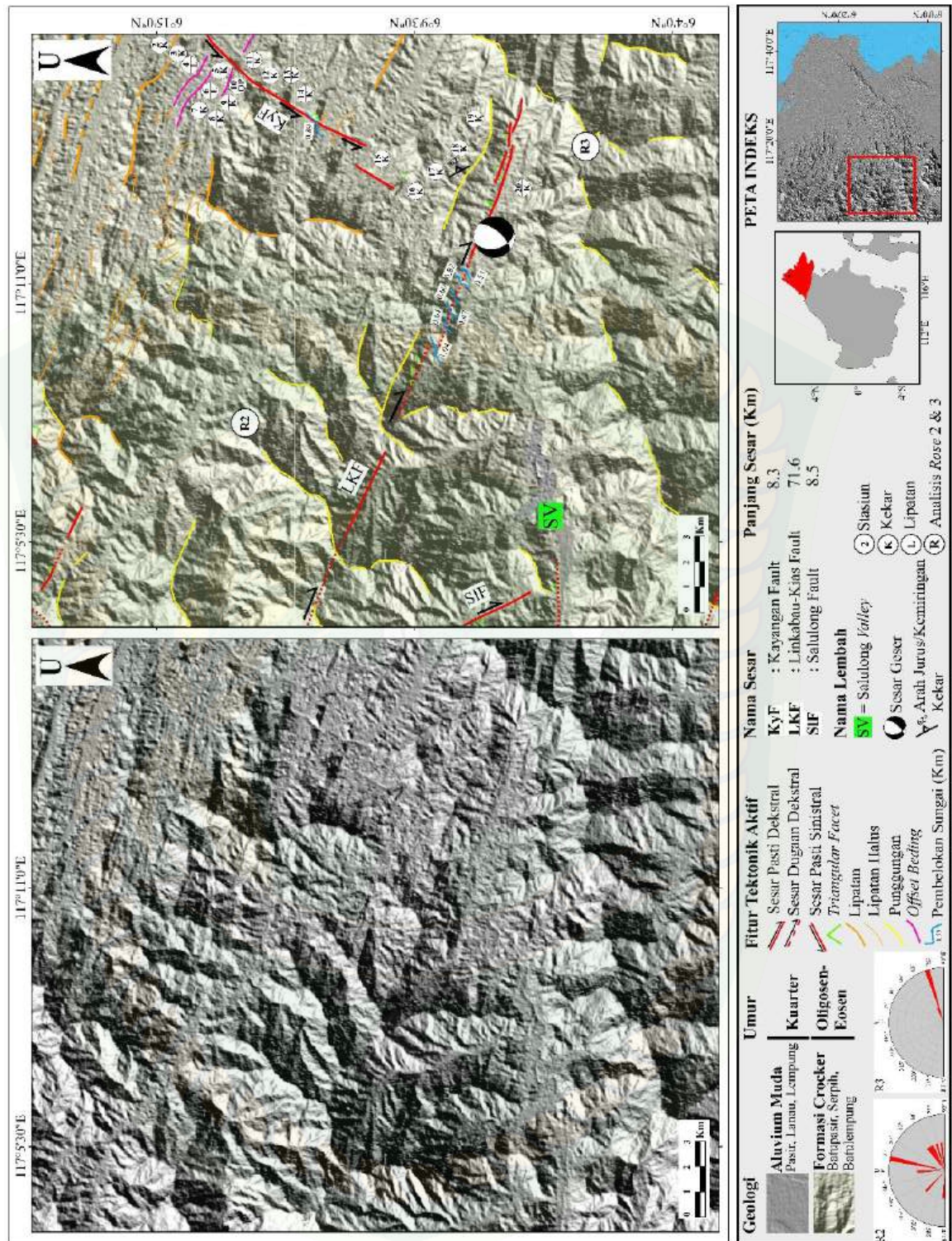
Catatan :

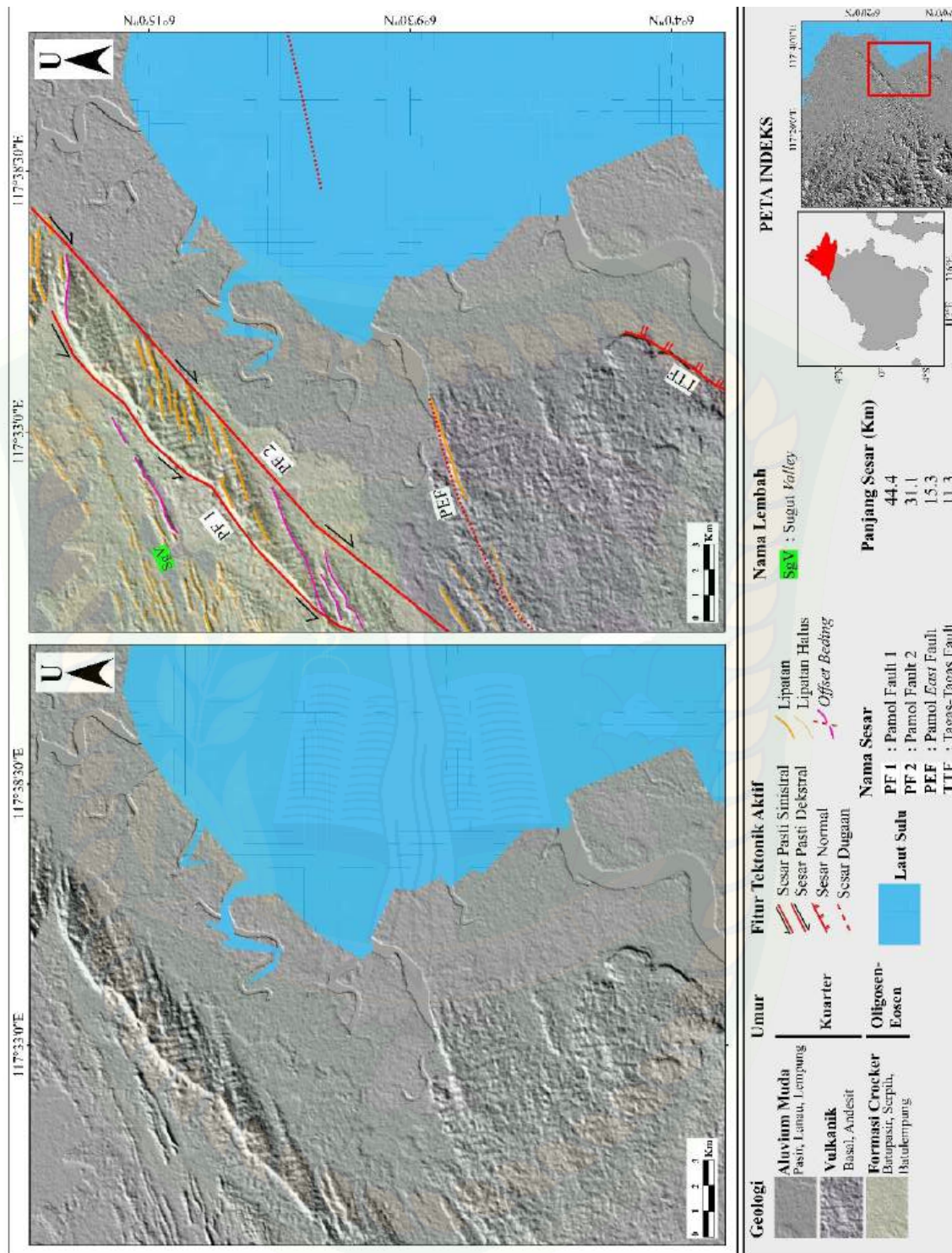
- j) Panjang patahan (L), Km
- k) D: sesar dekstral, S: sesar sinistral N: Sesar normal, T: Sesar Naik
- l) $W = \text{Downdip Limit} / \sin \text{dip}$ patahan, Km
- m) $A = L \times W$, Km²
- n) *Moment magnitude* dihitung menggunakan persamaan:
 Sesar geser $M_w = 3,98 + 1,02 \log A$
 Sesar normal $M_w = 3,93 + 1,02 \log A$
 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)

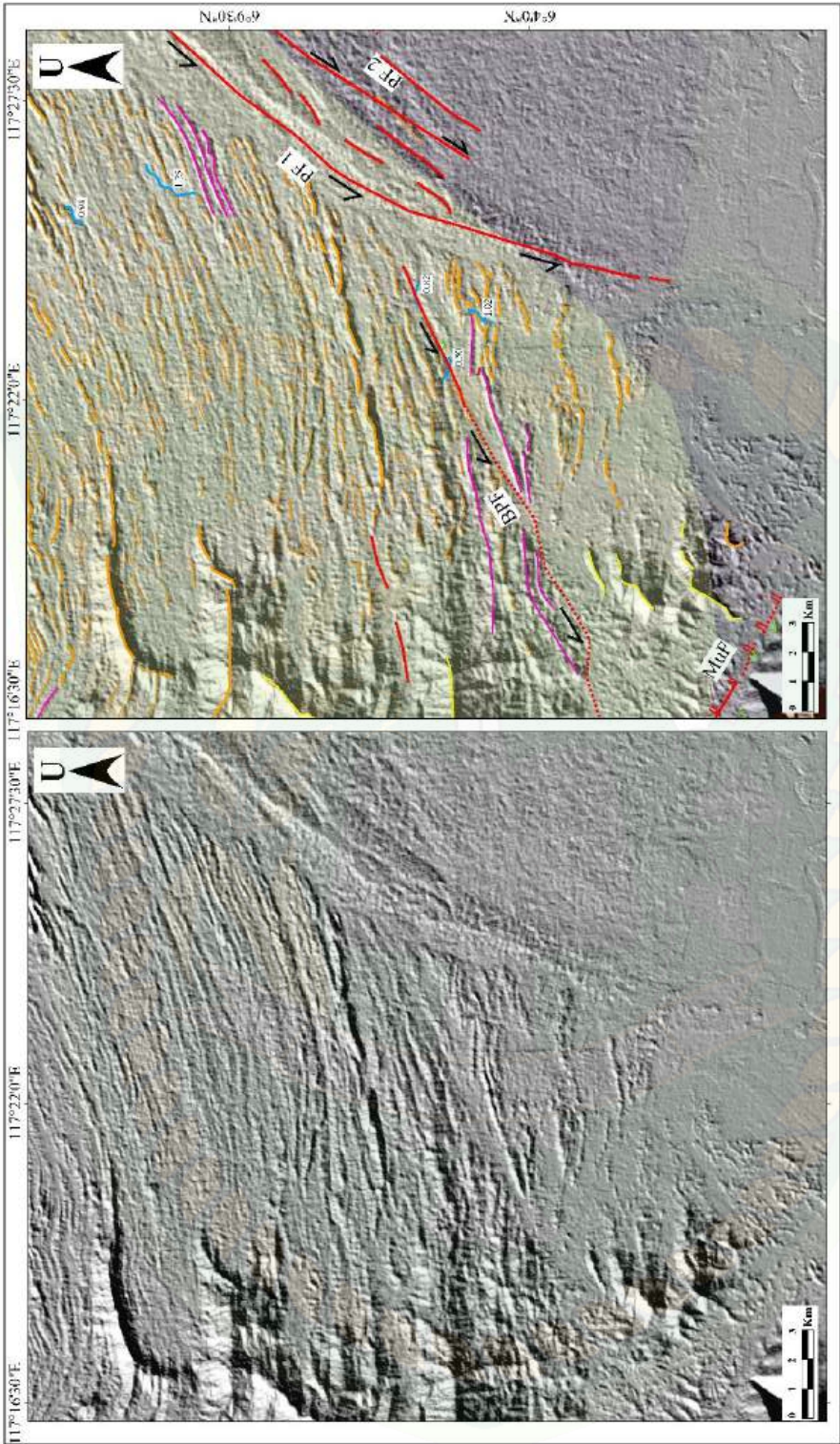


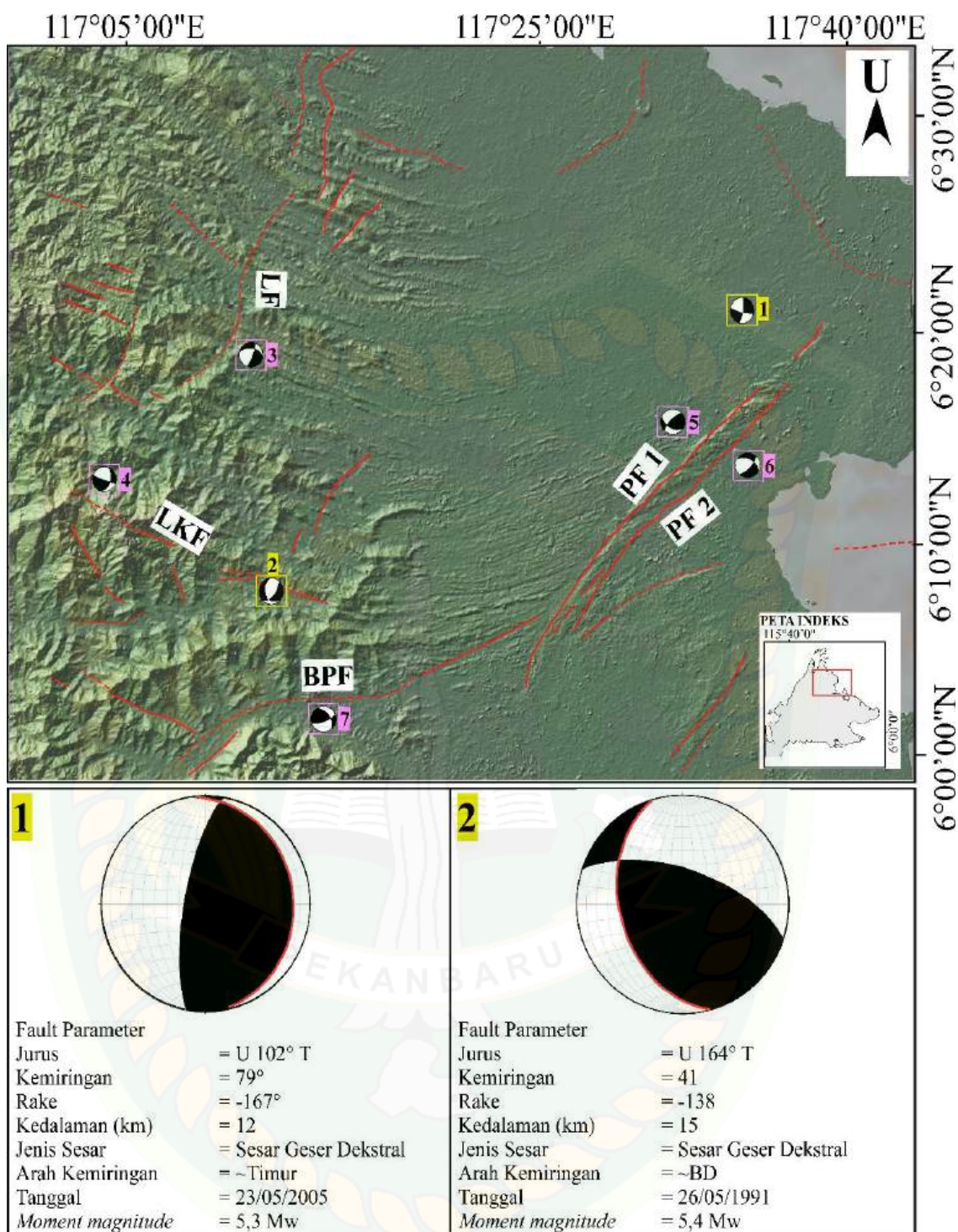


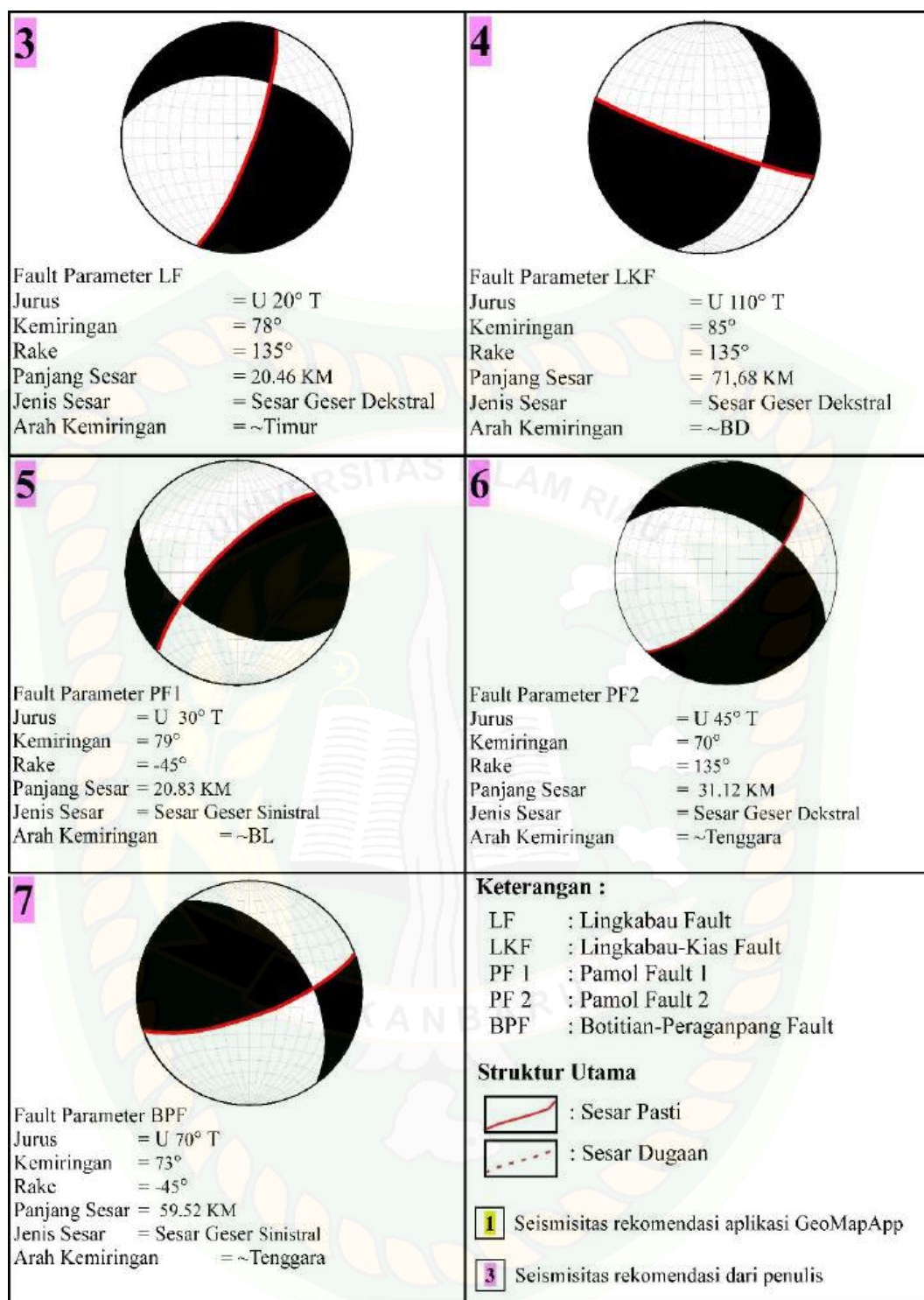


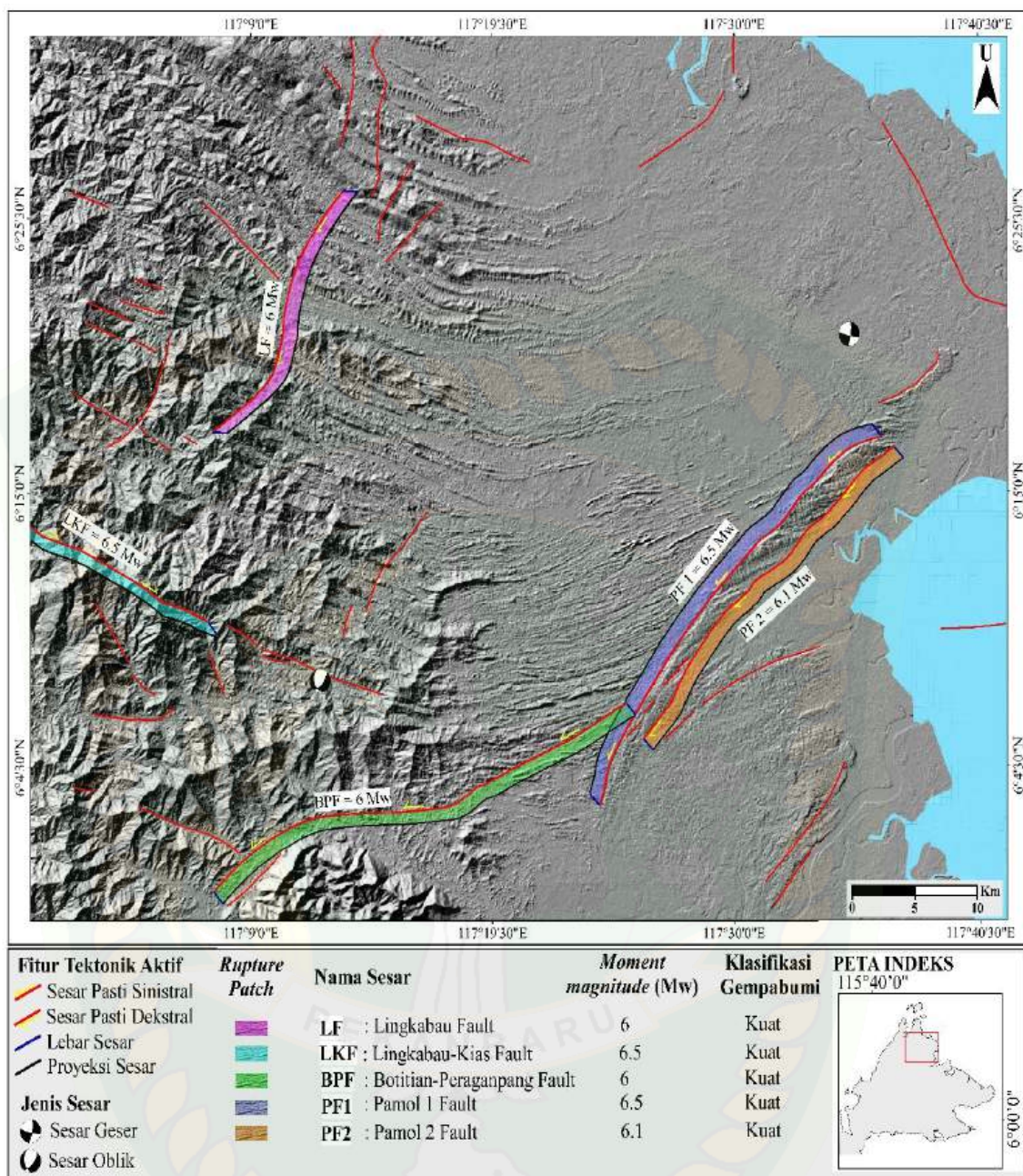


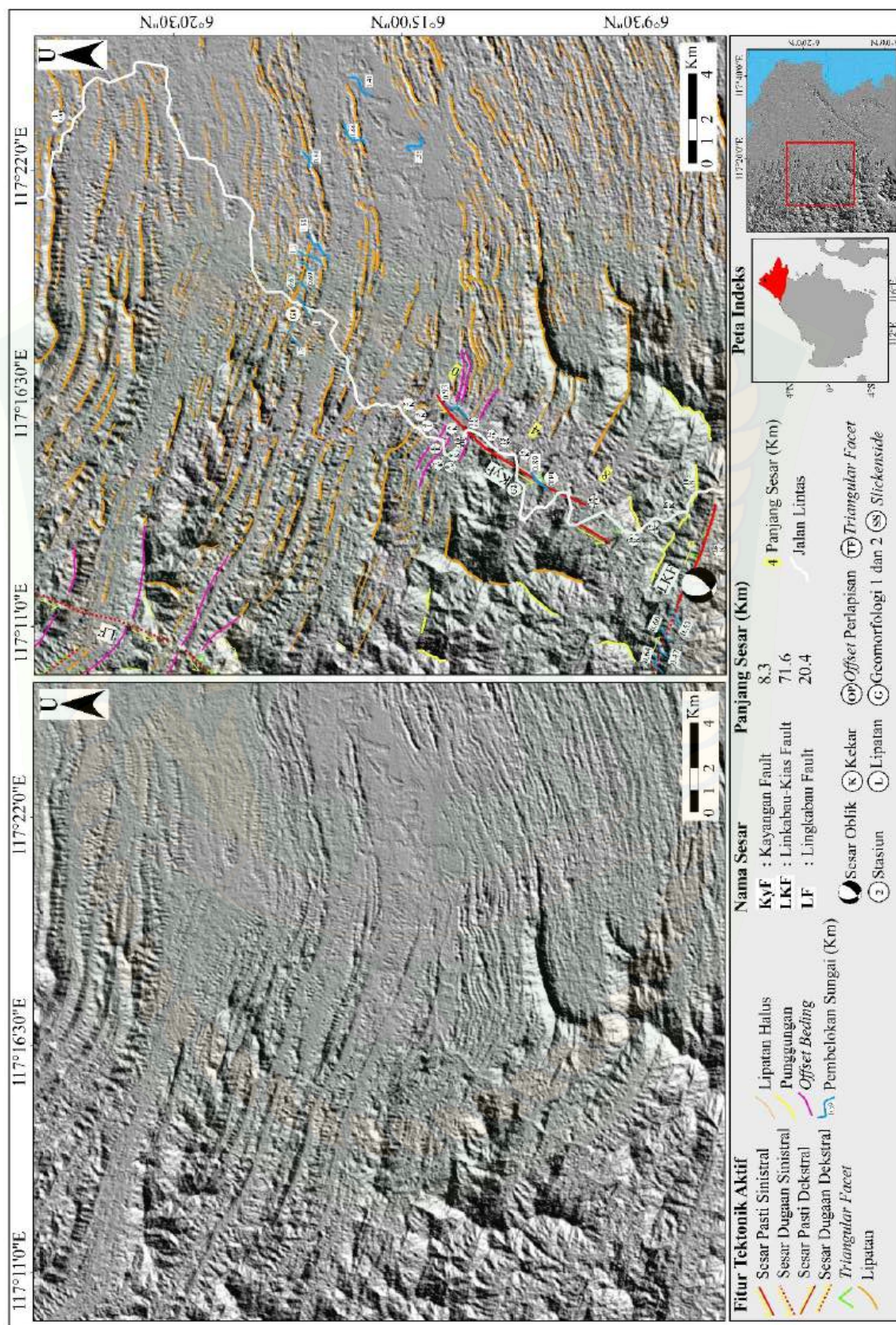












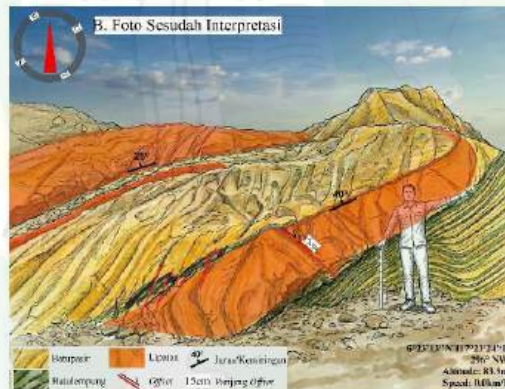


**JURNAL HARIAN
PRODI TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM RIAU**

Hari/Tanggal : Jumat/ 28 Febuari 2025
Stasiun : 01
Lokasi : Beluran
Koordinat : $6^{\circ}23'13''$ N / $117^{\circ}23'24''$ E

Vegetasi : Pohon Akasia
Cuaca : Cerah
Elevasi : 84 m
Morfologi : landai

FOTO :



DESKRIPSI :

St 1 terletak di wilayah Paitan, beluran pada koordinat $6^{\circ}6'54''$ N / $116^{\circ}26'28''$ E pada stasiun ini terdapat singkapan batupasir kaya akan oksida besi dengan bacaan strike/dip perlapisan $N298^{\circ}E/28^{\circ}$ dan panjang 6m dan tinggi 2,5m yang memiliki struktur Sesar minor dengan bacaan $N309^{\circ}/42^{\circ}$ dan offside perlapisan 40cm

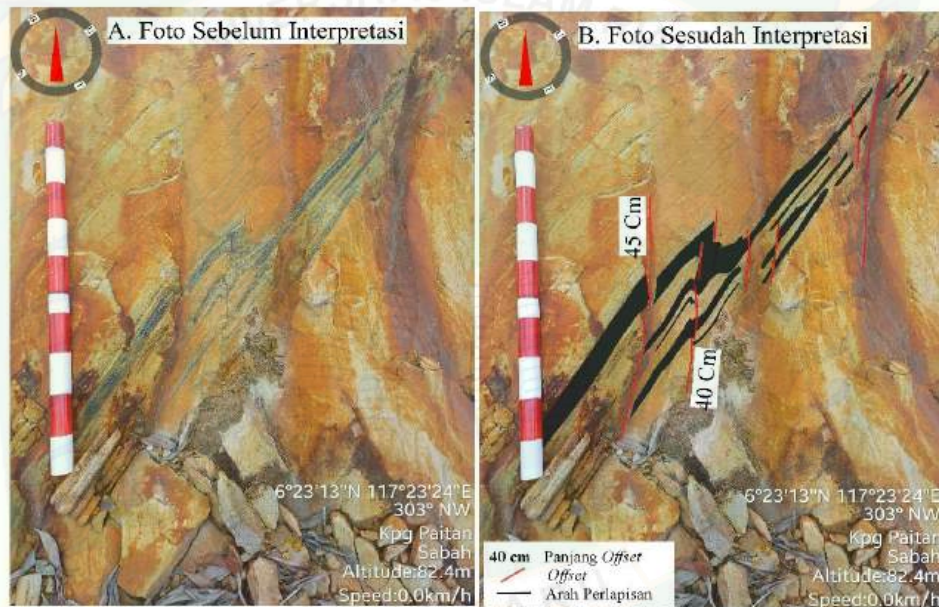


**JURNAL HARIAN
PRODI TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM RIAU**

Hari/Tanggal : Jumat/ 28 Febuari 2025
Stasiun : 01
Lokasi : Beluran
Koordinat : 6°23'13" N / 117°23'24" E

Vegetasi : Pohon Akasia
Cuaca : Cerah
Elevasi : 84 m
Morfologi : landai

FOTO :



DESKRIPSI :

St 1 terletak di wilayah Paitan, beluran pada koordinat 6°6'54" N / 116°26'28" E. Dijumpai offset sepanjang 40 dan 43 cm dengan arah relatif mengiri (sinistral) pada pada suatu singkapan stasiun 1 batuan di daerah Paitan, offset ini di identifikasi sebagai salah satu bentuk deformasi permukaan akibat aktivitas tektonik yang terbentuk saat pembentukan Beluran Mega Fold pada bagian utara Borneo. Singkapan ini memiliki dimensi lebar 6 m dan tinggi 2,3 m, merupakan singkapan batupasir dengan sisipan tipis lempung



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

Hari/Tanggal : Jumat/ 1 Maret 2025
Stasiun : 04
Lokasi : Jl. Sapi-Nagoh
Koordinat : 6°14'6" N / 117°15'22" E

Vegetasi : -
Cuaca : Berawan
Elevasi : 92 m
Morfologi : landai

FOTO :



DESKRIPSI :

Stasiun 4 dijumpai singkapan batuan perlapisan batupasir dan lempung yang mengalami deformasi dari pergerakan Sesar KYF didapati lipatan yang kemudian terpatahkan yang sebagian besar membentuk lipatan sinklin, dengan bacaan strike/dip sayap kanan : N330°E/60° dan sayap kiri N227°E/52°, dengan nilai interlimb 49°, nilai nilai dip of axial surface N20°E/65° plunge nya 30°/N57°E dan yang mana pada klasifikasi fluety diklasifikasikan sebagai lipatan simetris dengan nama lipatan Open Gently Plunging Fold. Dijumpai beberapa offset dengan pergerakan offset rata rata 21 cm,



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

Hari/Tanggal : Jumat/ 1 Maret 2025
Stasiun : 13
Lokasi : Jl. Sapi-Nagoh
Koordinat : $6^{\circ}12'14''$ N / $117^{\circ}14'60''$ E

Vegetasi : -
Cuaca : Cerah
Elevasi : 106 m
Morfologi : landai

FOTO :



DESKRIPSI :

St 13 terletak di wilayah beluran tepatnya jalan sapi-nagoh pada koordinat $6^{\circ}12'14''$ N / $117^{\circ}14'60''$ E pada stasiun ini dijumpai singkapan dengan panjang 5m dan tinggi 4m, dijumpai cermin sesar (slickenside) yang arah strike/dip nya $N249^{\circ}E/33^{\circ}$, cermin sesar ini merupakan bukti dari pergerakan sesar Kayangan (KyF)

SURAT KEPUTUSAN DEKAN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS ISLAM RIAU
NOMOR : 0335/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 : STEVEN ANSER REYGA RAMADHAN

NPM : 213610622

Program Studi : Teknik Geologi

Jenjang Pendidikan : Strata Satu (S1)

Judul Skripsi : ANALISIS PENGARUH AKTIVITAS TEKTONIK TERHADAP GEOMORFOLOGI TEKTONIK, SEISMISITAS DAN STRUKTUR GEOLOGI DI DAERAH BELURAN, SABAH, MALAYSIA

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

Ditetapkan di : Pekanbaru
Pada tanggal : 16 Mei 2025
Dekan,



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



UNIVERSITAS ISLAM RIAU

FAKULTAS TEKNIK

الجامعة الإسلامية الرياوية

F.A.3.20.FT

Alamat : Jalan Kaharuddin Nasution No. 113 Marpoan, 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	:	STEVEN ANSER REYGA RAMADHAN
Dosen Pembimbing	:	CATUR CAHYANINGSIH, B.Sc(Hons)., M.Sc.
NPM	:	213610622
Program Studi	:	Teknik Geologi
Judul Kerja Praktek	:	ANALISIS PENGARUH AKTIVITAS TEKTONIK TERHADAP GEOMORFOLOGI TEKTONIK, SEISMISITAS DAN STRUKTUR GEOLOGI DI DAERAH BELURAN, 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.	30 Juli 2025	Persiapan studi literatur	Mengarahkan mahasiswa untuk mencari latar belakang masalah penelitian dan studi literatur	Sudah ditandatangani
3.	07 Februari 2025	Metode Penelitian	Menentukan tujuan dan metode penelitian yang sesuai untuk geomorfologi tektonik, seismisitas, dan skenario gempabumi	Sudah ditandatangani
4.	13 Maret 2025	Penguasaan software dan digitasi	Mahasiswa menguasai software ArcGIS, Geomapapp, Faultkin, dan Georose	Sudah ditandatangani
5.	02 November 2025	Pembahasan hasil geomorfologi tektonik Beluran	Revisi peta dan sub bab geomorfologi tektonik	Sudah ditandatangani
6.	17 November 2025	Pembahasan hasil seismisitas Beluran	Revisi peta dan sub bab Seismisitas	Sudah ditandatangani

No	Hari/ Tanggal Bimbingan	Materi Bimbingan	Hasil/ Saran Bimbingan	Keterangan
7.	01 Desember 2025	Pembahasan hasil Neotektonik Beluran	Revisi Peta dan Sub bab Neotektonik	Sudah ditandatangani
8.	08 Januari 2026	Pembahasan Hasil Bukti Lapangan	Revisi Peta dan Sub bab Bukti Lapangan	Sudah ditandatangani
9.	22 Desember 2025	Pembahasan hasil Visualisasi 3D tektonik	Revisi Peta dan Sub bab 3D tektonik	Sudah ditandatangani
10.	05 Januari 2026	Pembahasan hasil Riedl Shear	Revisi Peta dan Sub bab Riedl Shear	Sudah ditandatangani

Pekanbaru, 17 Juli 2025 Ketua Program Studi Teknik Geologi.  <u>BUDI PRAYITNO, S.T., M.T.</u>	
---	--

SURAT KEPUTUSAN DEKAN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS ISLAM RIAU
NOMOR : 1439/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 : STEVEN ANSER REYGA RAMADHAN

NPM : 213610622

Program Studi : Teknik Geologi

Jenjang Pendidikan : Strata Satu (S1)

Judul Skripsi : ANALISIS PENGARUH AKTIVITAS TEKTONIK TERHADAP GEOMORFOLOGI TEKTONIK, SEISMISITAS DAN STRUKTUR GEOLOGI DI DAERAH BELURAN, 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 : 23 Juli 2025



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



UNIVERSITAS ISLAM RIAU

FAKULTAS TEKNIK

الْجَامِعَةُ الْإِسْلَامِيَّةُ الرَّيُّوْنِيَّةُ

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: 090/A-UIR/5-FT/2026

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

Nama : **STEVEN ANSER REYGA RAMADHAN**
NPM : 213610622
Program Studi : Teknik Geologi
Jenjang Pendidikan : Strata Satu (S1)
Judul Skripsi TA : ANALISIS PENGARUH AKTIVITAS TEKTONIK TERHADAP GEOMORFOLOGI TEKTONIK, SEISMISITAS DAN STRUKTUR GEOLOGI DI DAERAH BELURAN, 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,

Ka. Prodi Teknik Geologi

Budi Prayitno, S.T., M.T

Pekanbaru,

12 March 2026 M

23 Romadhōn 1447 H

Staff Pemeriksa

Syatra Safira Anjani, S.Pd



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

BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI

Berdasarkan Surat Keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas Islam Riau, Pekanbaru, tanggal 17 April 2026, Nomor: 0061/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 : STEVEN ANSER REYGA RAMADHAN
NPM : 213610622
Judul Skripsi : ANALISIS PENGARUH AKTIVITAS TEKTONIK TERHADAP GEOMORFOLOGI TEKTONIK, SEISMISITAS DAN STRUKTUR GEOLOGI DI DAERAH BELURAN, 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 = 85 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: 213 / SKRIPSI / IV / 2026

Dengan ini menyatakan bahwa mahasiswa:

Nama : Steven Anser Reyga Ramadhan
NPM : 213610622
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